

Simulative Vorhersage und Bewertung von Eigenspannungen

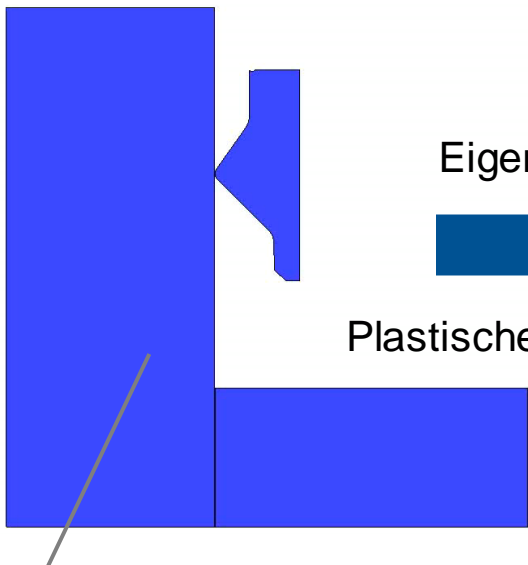
Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im
Rahmen des Schwerpunktprogrammes 2013

Fachkreis Mechanik und Simulation

Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Kästner

Technische Universität Dresden

Professur für Numerische und Experimentelle Festkörpermechanik



Resultierende
Eigenspannungsverteilung

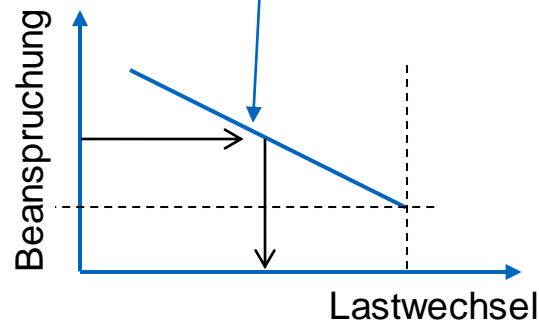
Eigenspannungen



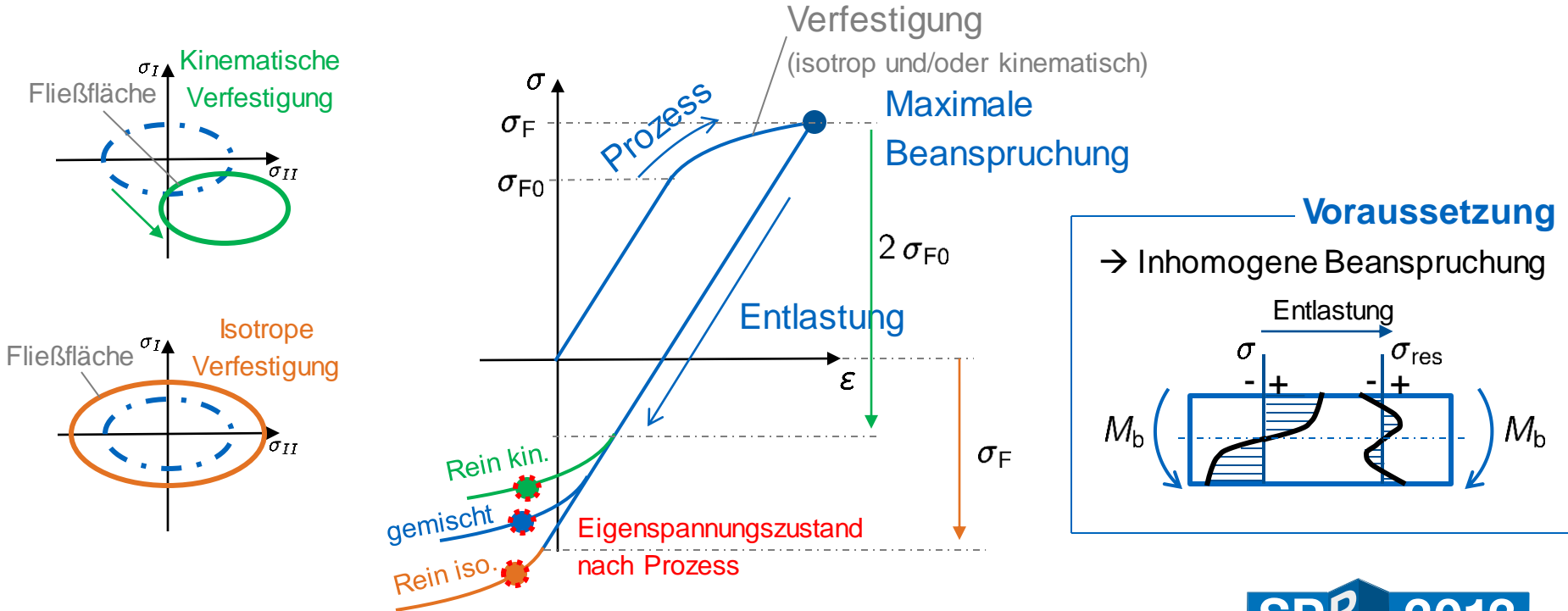
Plastische Deformationen

Fokus: Betriebsfestigkeit

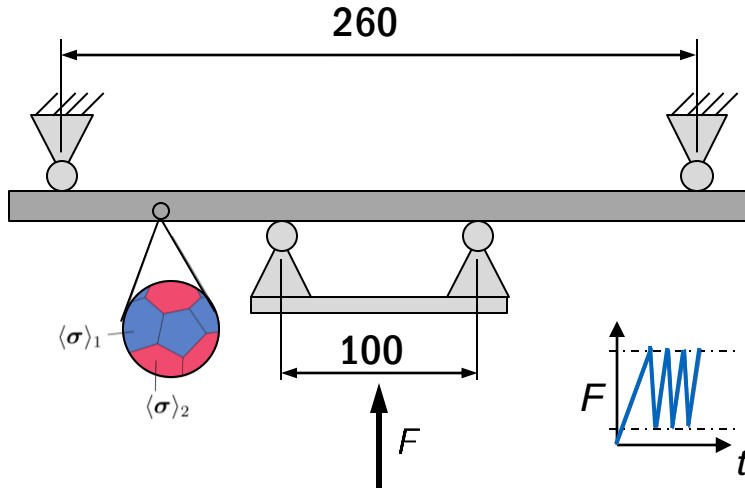
Wöhlerlinie/Beanspruchbarkeit



Entstehung von Eigenstressungen



Biegebenchmark



1. Plastische Vordeformation

2. Zyklische Belastung

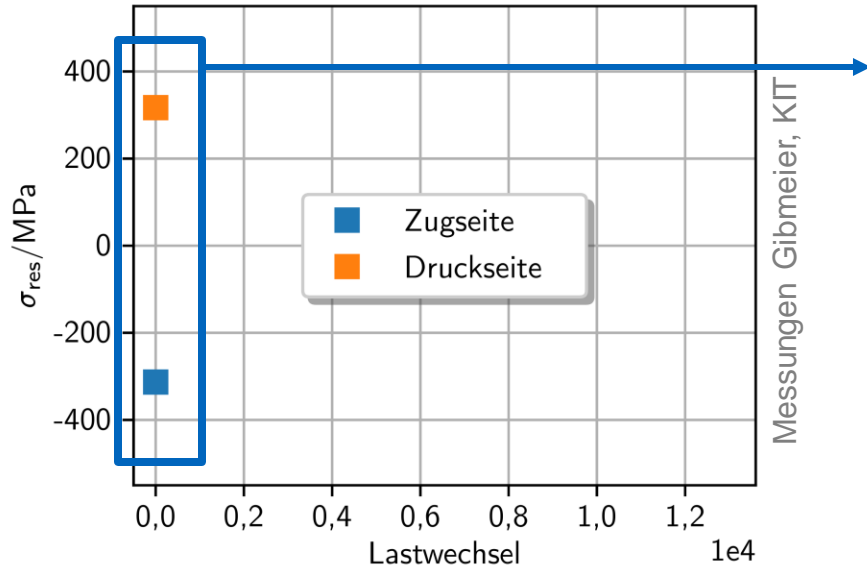
Untersuchungsgegenstand (Experimentell)

- Initialer Eigenspannungszustand
- Zyklische Veränderung Eigenspannungszustand
- Einflusstrennung Eigenspannungen / Verfestigung
- Lebensdauer Rissinitiierung unter Eigenspannungen

Zu benchmarkende Modelle

- Prozesssimulation / Mehrskalensimulationen
- Belastungssimulation im Kurzzeitbereich
- Lebensdauerkonzepte: Anriss/Bruch

Biegebenchmark - Evolution der Eigenspannungen

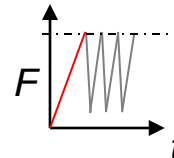
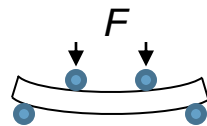


Ergebnis Simulation

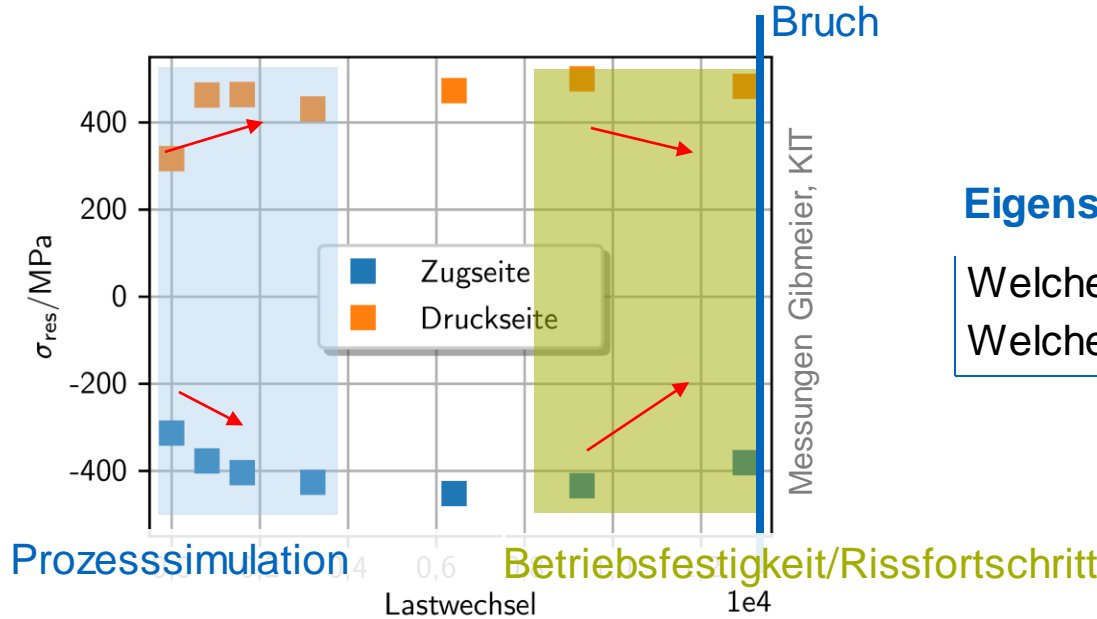
„Makroskopische“ Eigenspannungen vor Betriebsbelastung

Wie verhalten sich Eigenspannungen über Lebensdauer?

Statische Belastung Biegebalken



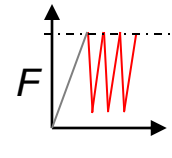
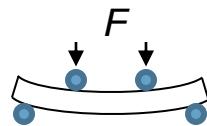
Biegebenchmark - Evolution der Eigenspannungen



Eigenspannungsvorhersage

Welche Phänomene sind relevant?
 Welche Modelle sind geeignet?

Zyklische Belastung Biegebalken



Niederzyklische Simulation von Eigenspannungen

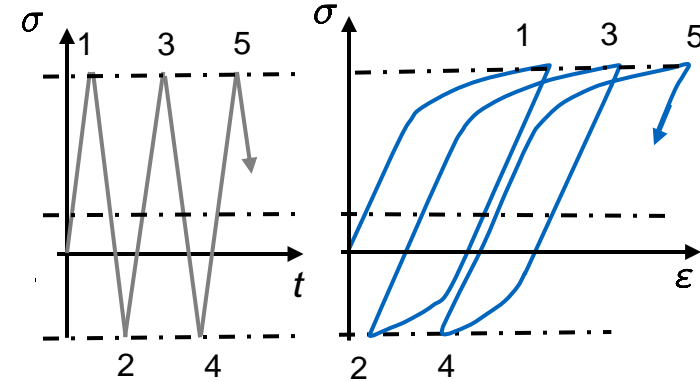
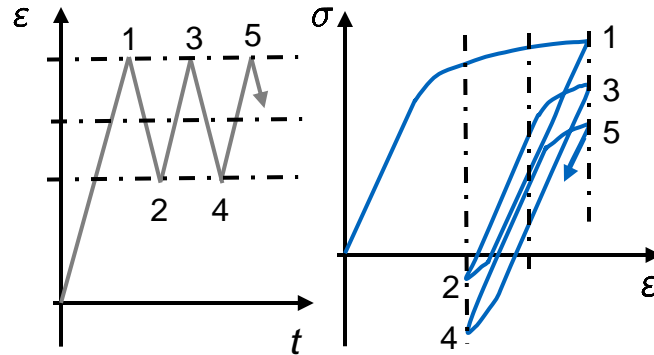
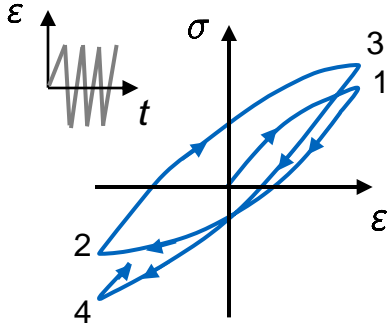
Typisches Verhalten metallischer Werkstoffe

Zyklische Ver- und/oder

Zyklische Mittelspannungsrelaxation

Zyklisches Kriechen

Entfestigung



Nichtlinear Verfestigungsmodelle erforderlich!

Niederzyklische Simulation von Eigenspannungen

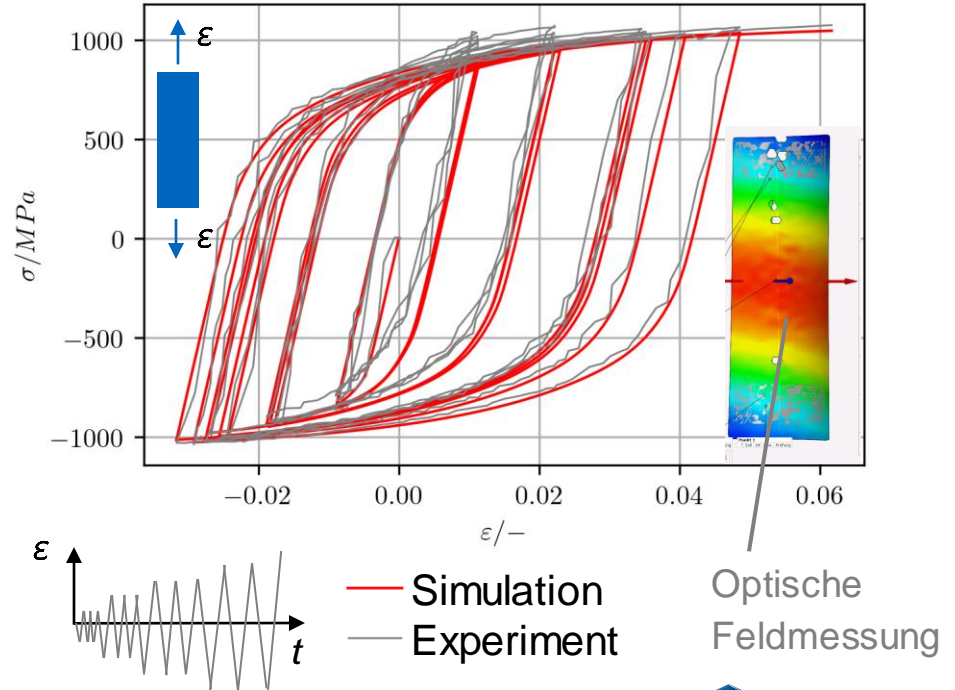
Beispiel: Chaboche-Modell mit mehreren Backstress-Tensoren

$$f = \sqrt{\frac{3}{2} (\sigma'_{pq} - X_{pq}) (\sigma'_{pq} - X_{pq})} - \sigma_{F_0} - R$$

↑ Fließfunktion Kinematische Verfestigung Isotrope Verfestigung

$$\dot{X}_{lm} = \sum_{k=1}^N \dot{X}_{lm}^k = \sum_{k=1}^N \frac{2}{3} C_k \dot{\epsilon}_{lm}^p - \gamma_k X_{lm}^k \dot{p}$$

↑ Materialparameter ↑



Parametrisierung Materialmodell

Niederzyklische Simulation von Eigenspannungen

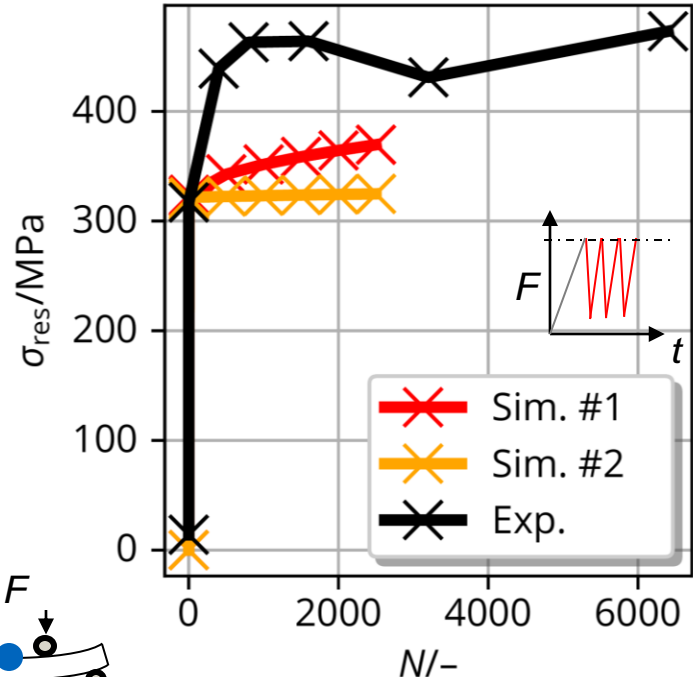
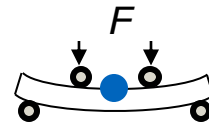
Beispiel: Chaboche-Modell mit mehreren Backstress-Tensoren

$$f = \sqrt{\frac{3}{2} (\sigma'_{pq} - X_{pq}) (\sigma'_{pq} - X_{pq})} - \sigma_{F_0} - R$$

↑ Fließfunktion Kinematische Verfestigung Isotrope Verfestigung

$$\dot{X}_{lm} = \sum_{k=1}^N \dot{X}_{lm}^k = \sum_{k=1}^N \frac{2}{3} C_k \dot{\epsilon}_{lm}^p - \gamma_k X_{lm}^k \dot{p}$$

↑ Materialparameter



Zyklische Belastung Biegebalken

Auswertung Druckseite

Eigenspannungen in Simulationsmodellen

1. Art

Mehrere Körner

$$\sigma^I = \frac{1}{L_{\text{makro}}} \int_{L_{\text{makro}}} \sigma(x) dx$$

Makroskopische Simulationen

- Prozesssimulationen
- Lebensdauerabschätzung auf Bauteilebene

2. Art

Einzelnes Korn

$$\sigma^{II} = \frac{1}{L_{\text{Korn}}} \int_{L_{\text{Korn}}} \sigma(x) - \sigma^I dx$$

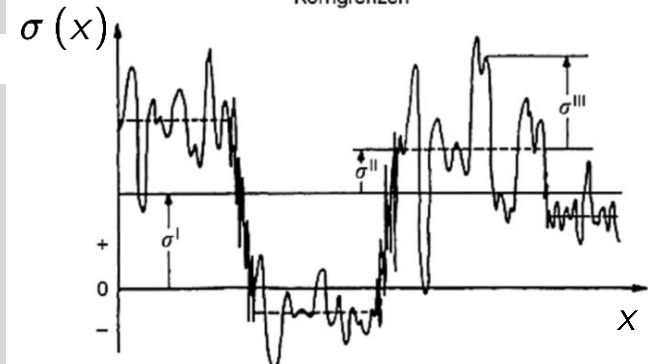
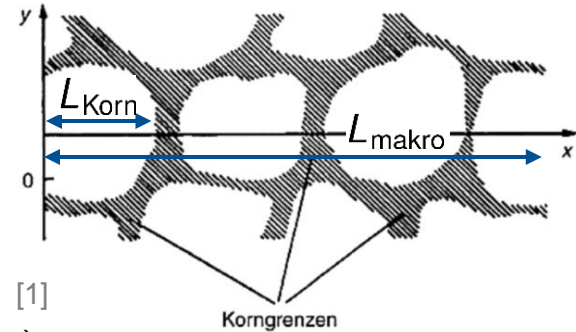
Mehrskalensimulationen

- Mikromechanisches Verständnis
- Versagensmechanismen
- Werkstoff- & Prozessdesign

3. Art

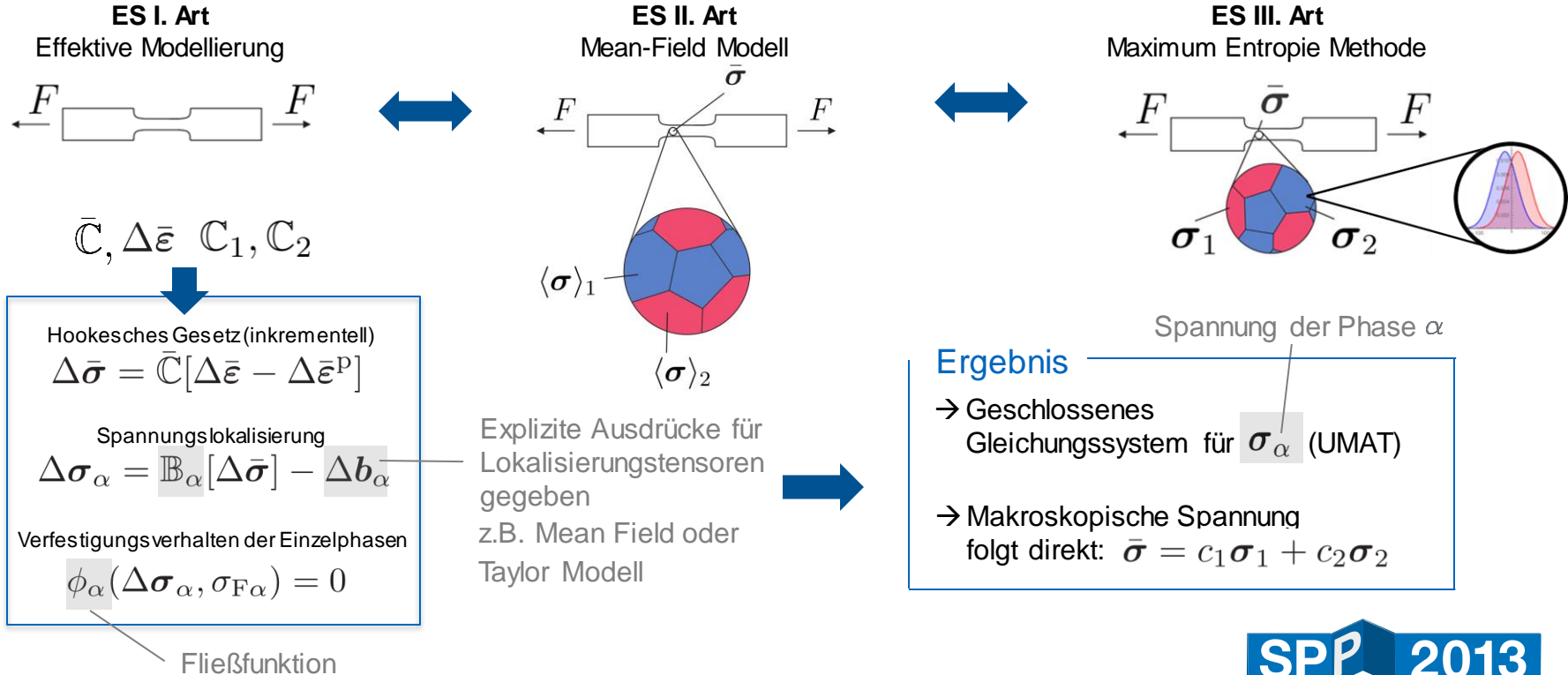
Teile eines Korns

$$\sigma^{III}(x) = \sigma(x) - \sigma^I - \sigma^{II}$$



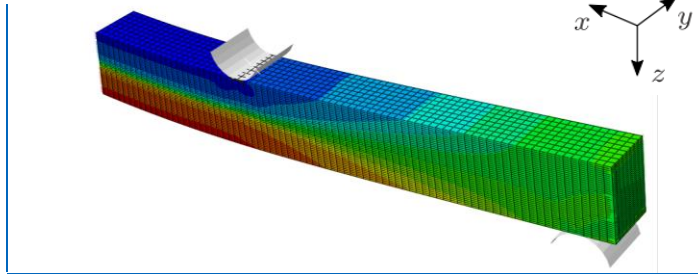
[1] Habschied et al., 2015, J. Heat Treatm. Mat.

Mehrskalensimulation von Eigenspannungen

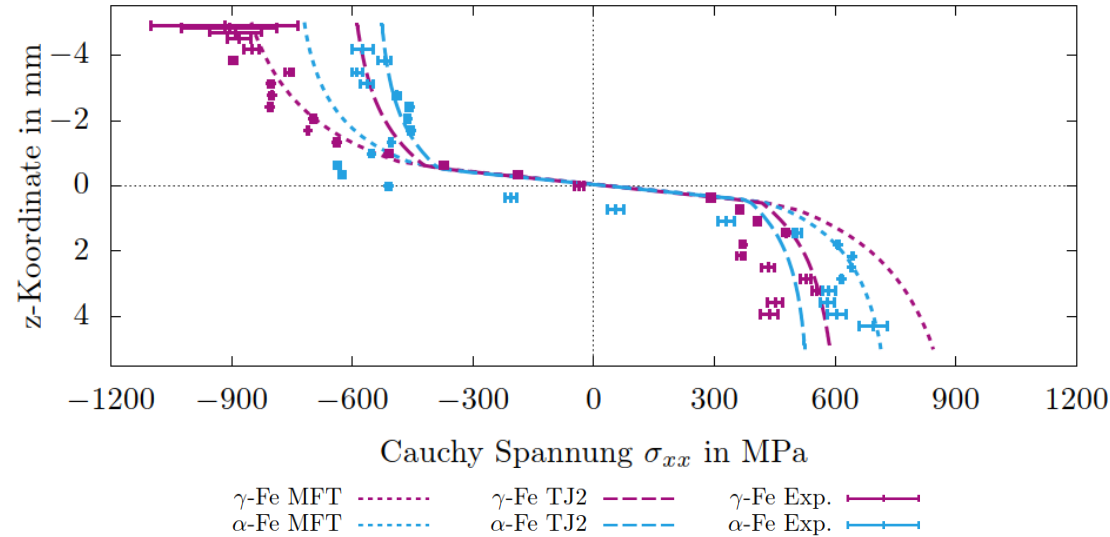


Mehrskalensimulation - Biegebalken

Mean-Field Modell: 3D ABAQUS FEM

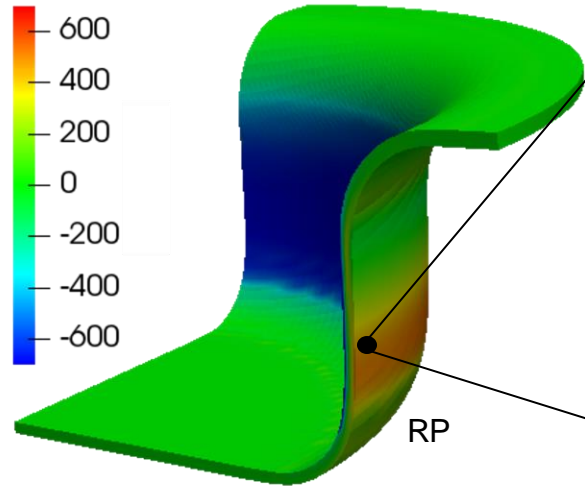


Ableich der phasenspezifischen Spannungen

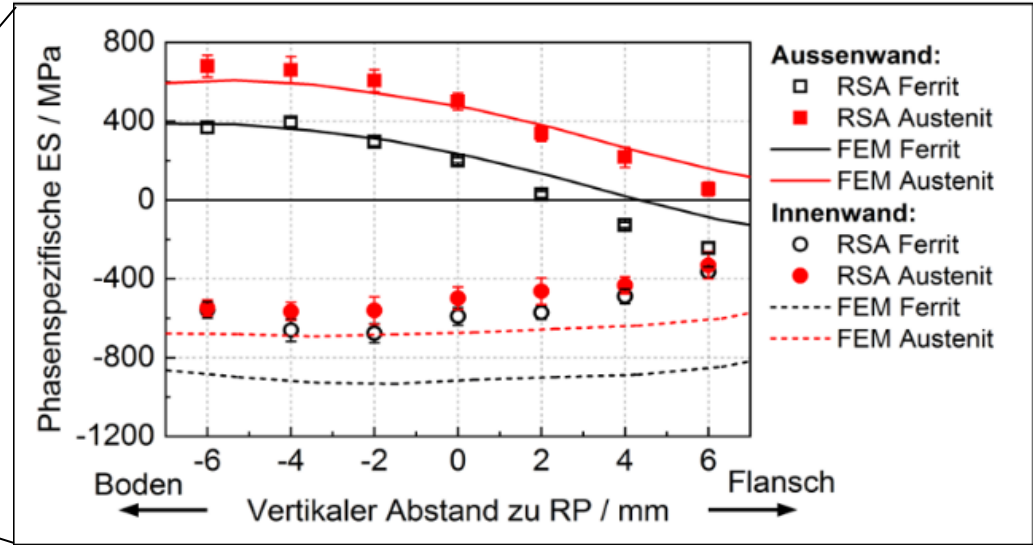


Mehrskalensimulation - Tiefziehen

$\bar{\sigma}^d$ in MPa



Effektiv

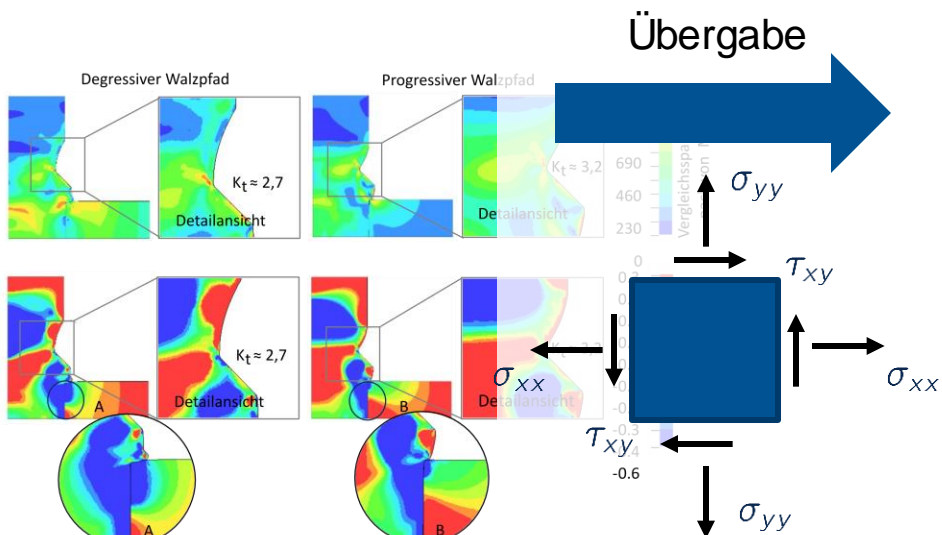


Röntgenographische ES-Analyse

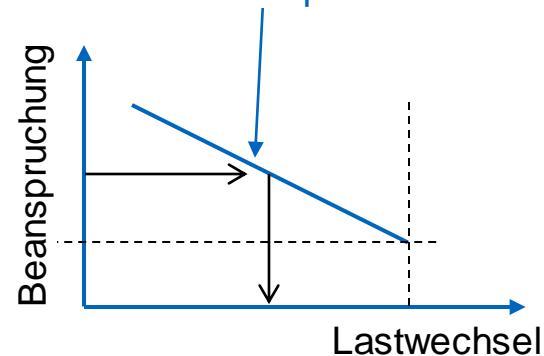
Simon et al. (2019), Simon et al. (2021)

Prozesssimulation/Mehrskalensimulation

Eigenspannungsbewertung



Wöhlerlinie/Beanspruchbarkeit



Betriebsfestigkeit

Spannungstensor

+ Eigenspannungstensor

Lebensdauerkonzepte

(Kerb)-Spannungskonzept

- Linear elastisches Material
- bewährte Richtlinien (z.B. FKM-Richtlinie)



Örtliches Konzept

- Elastisch-plastisches Material
- Bewertung am Materialpunkt

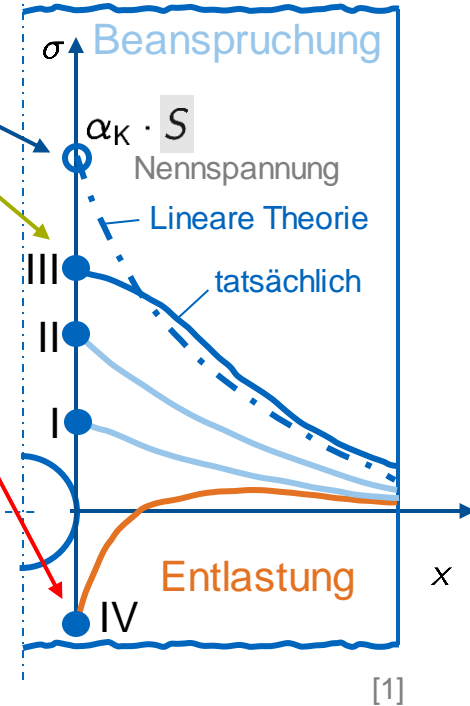
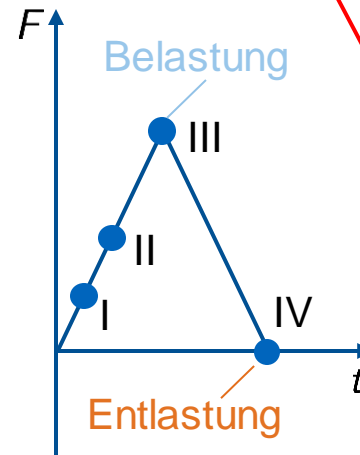
Bruchmechanik

- Ausgangspunkt Anriss
- Lebensdauervorhersage bis Bruch

Kerbspannung

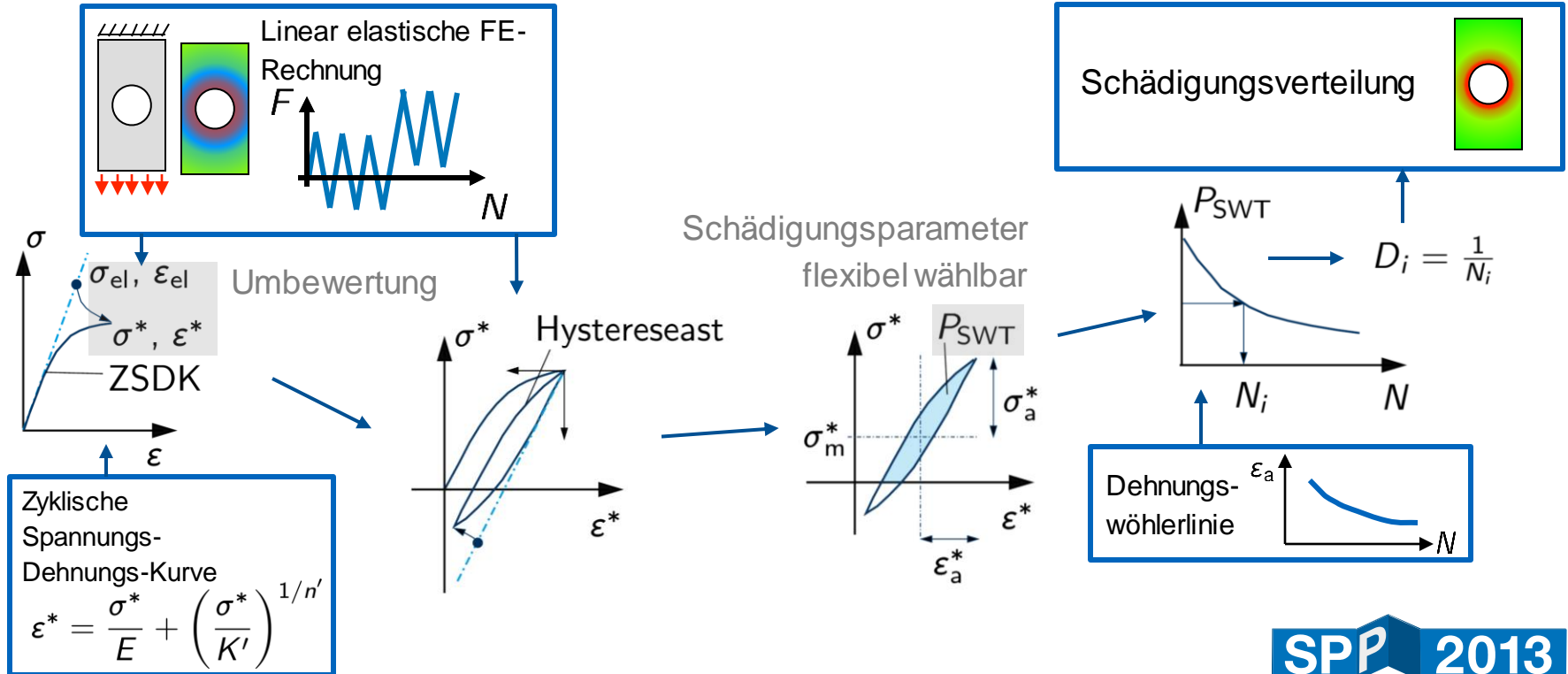
Örtliche Spannung

Eigenspannung

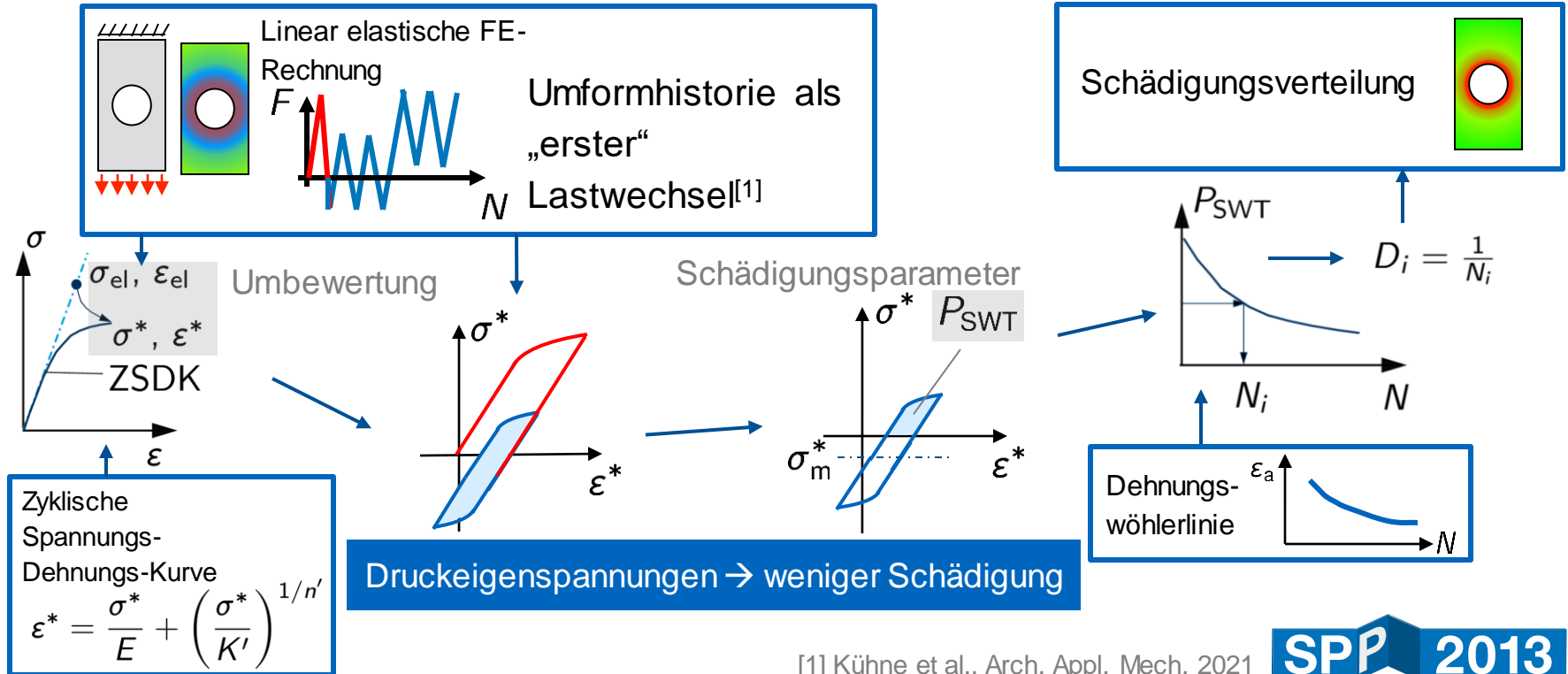


[1] Haibach, Springer, 2006

Örtliches Konzept

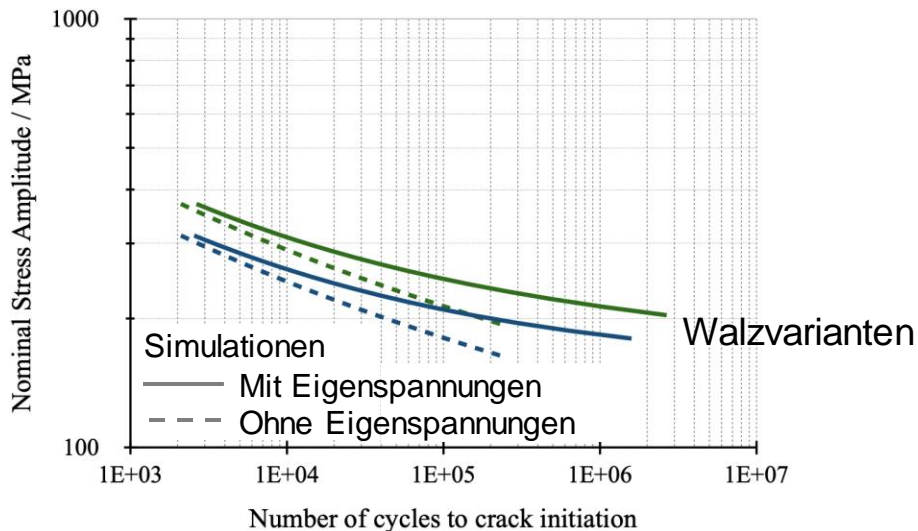
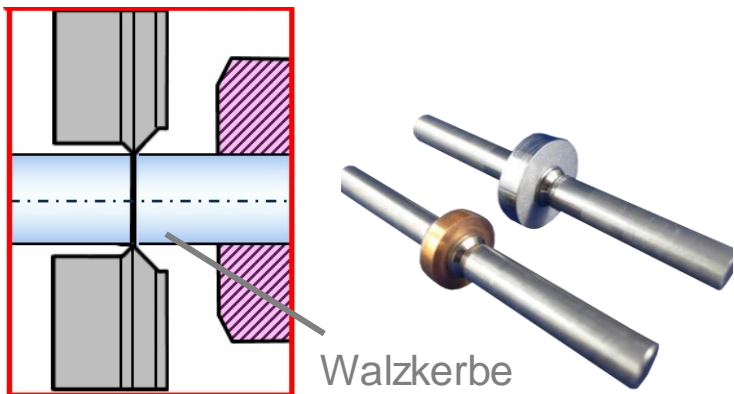


Örtliches Konzept – Eigenspannungen

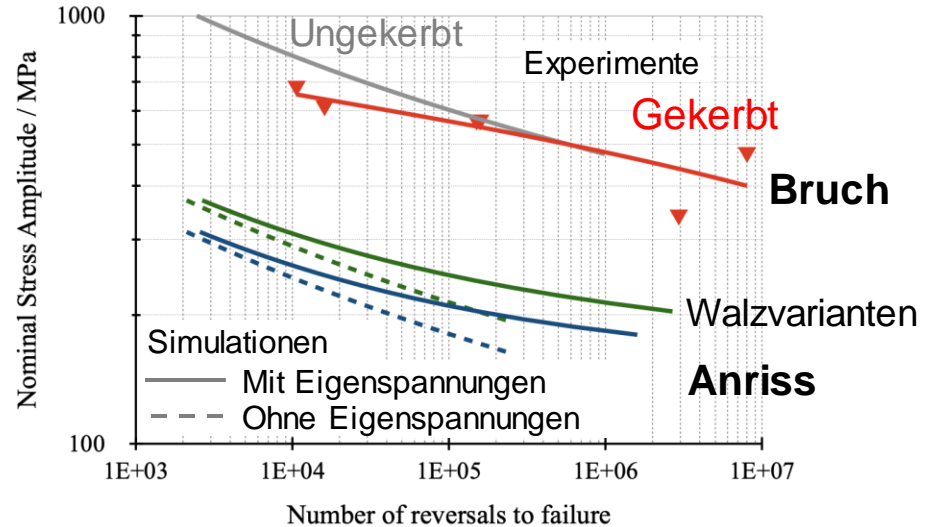
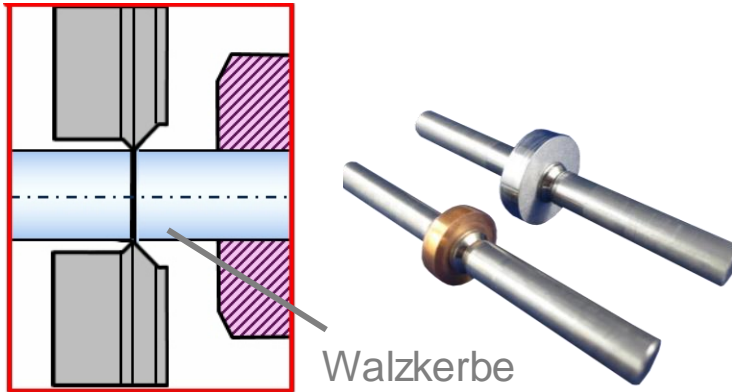


[1] Kühne et al., Arch. Appl. Mech. 2021

Örtliches Konzept – Bauteillebensdauer



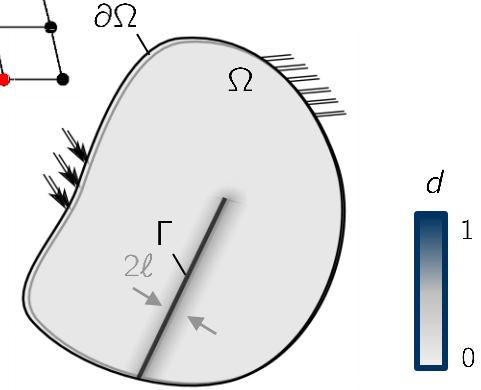
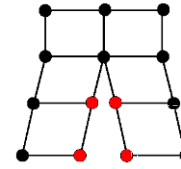
Örtliches Konzept – Bauteillebensdauer



→ Betrachtung Rissfortschritt

Phasenfeldmodellierung Risswachstum

Bruchkriterium nach GRIFFITH^[1] $\mathcal{G} = \mathcal{G}_c$ \mathcal{G}_c ... Bruchzähigkeit



Phasenfeldmethode: rissanzeigende Variable ist neue Feldgröße

→ Neuvernetzung des Risses entfällt $d \in [0, 1]$ $d = 0$ intakt
 $d = 1$ gebrochen

Energiefunktional^[2,3]
$$\Pi_\ell = \int_{\Omega} \underbrace{\frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}^e(\boldsymbol{\varepsilon}) : \boldsymbol{\varepsilon}}_{\text{Elastische Energie}} dV + \int_{\Omega} \underbrace{\frac{1}{4\ell} G_0 \Gamma \left((d^2 + 4\ell^2 |\nabla d|^2) \right)}_{\text{Bruchenergie}} dV$$



Regularisierung

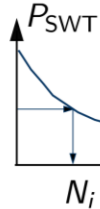
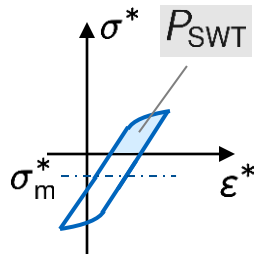
Degradierung

Einfluss Materialermüdung?

[1] Griffith (1921) [2] Francfort & Marigo (1998) [3] Bourdin et al. (2000), Miehe et al. (2010)

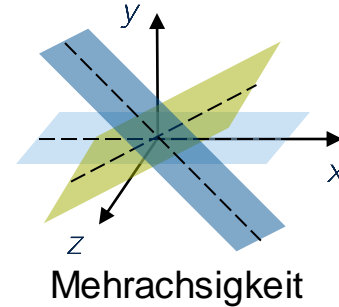
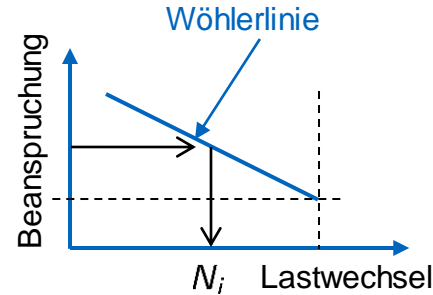
Phasenfeldmodellierung Ermüdungsriss

$$\Pi_\ell = \int_{\Omega} (1 - d)^2 \psi^e(\boldsymbol{\varepsilon}) dV + \int_{\Omega} \alpha(D) G_c \frac{1}{4\ell} (d^2 + 4\ell^2 |\nabla d|^2) dV \quad [1] \quad \alpha \dots \text{Degradationsfunktion}$$



$D \dots$ Ermüdungsschädigung

Bestimmbar über



Örtliches Konzept

- Duktile Werkstoffe
- Low Cycle Fatigue

$$D_i = \frac{1}{N_i}$$

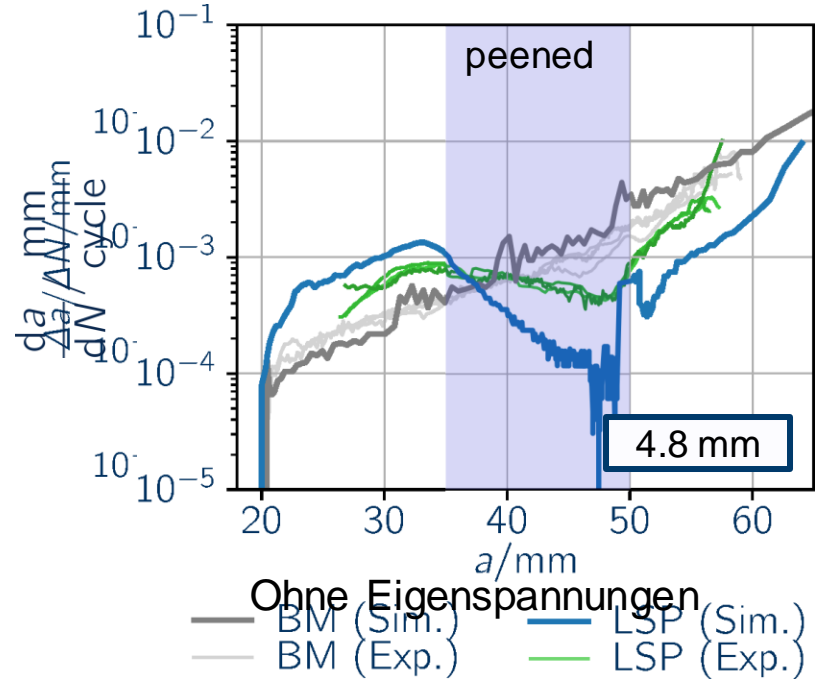
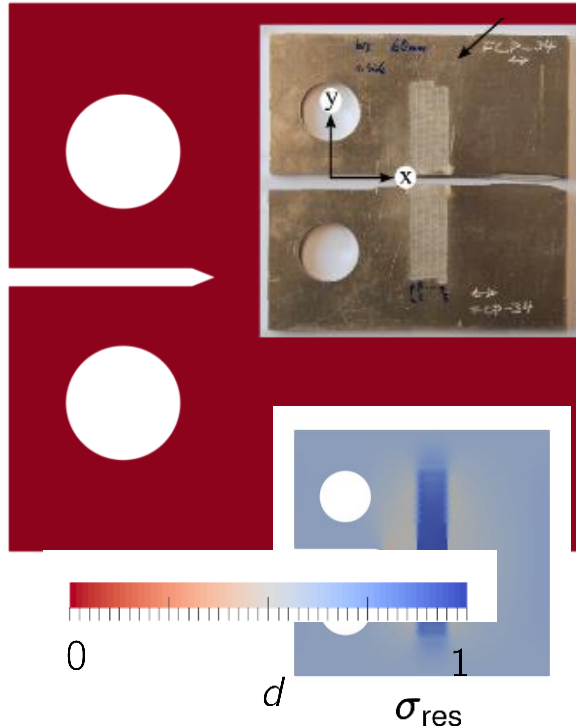
Kerbspannungskonzept

- Zyklisch elastische Deformationen
- High Cycle Fatigue

→ Modulares Vorgehen

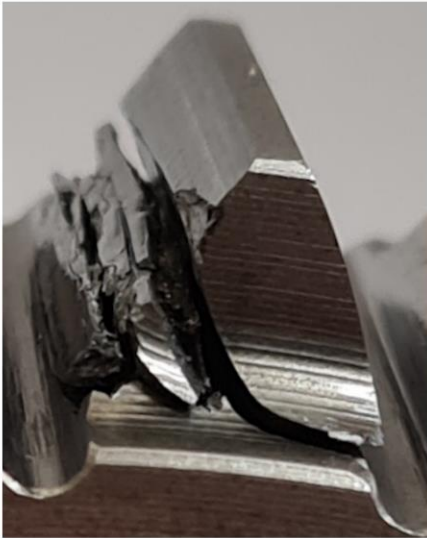
Phasenfeldmodell – Berücksichtigung von Eigenspannungen

Laser Shock Peening



- [1] Seiler et al. Eng. Fract. Mech. 2020
 [2] Seiler et al. Arch. Appl. Mech. 2021

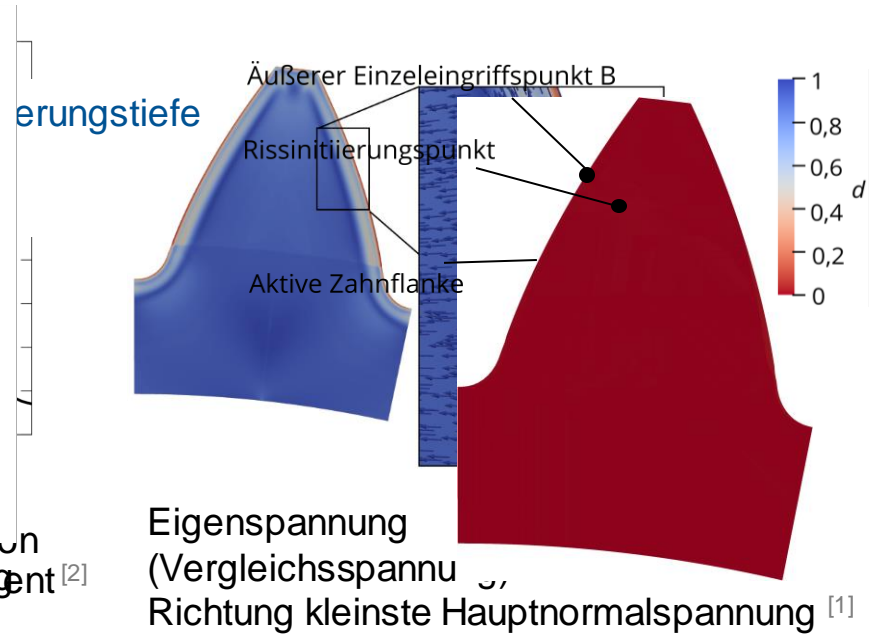
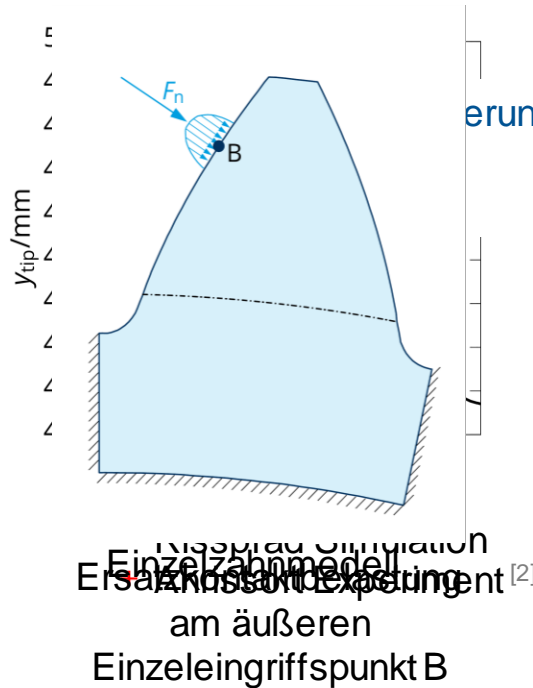
Anwendung Zahnflankenbruch - Kerbspannungskonzept

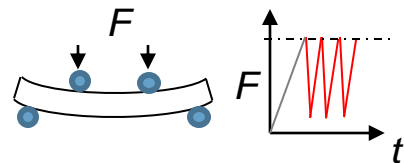


Zahnflankenbruch am einsatzgehärteten Zahnrad ^[1]

[1] FZG 2021, TU München

[2] Schneider et al. Int. J. Fatigue

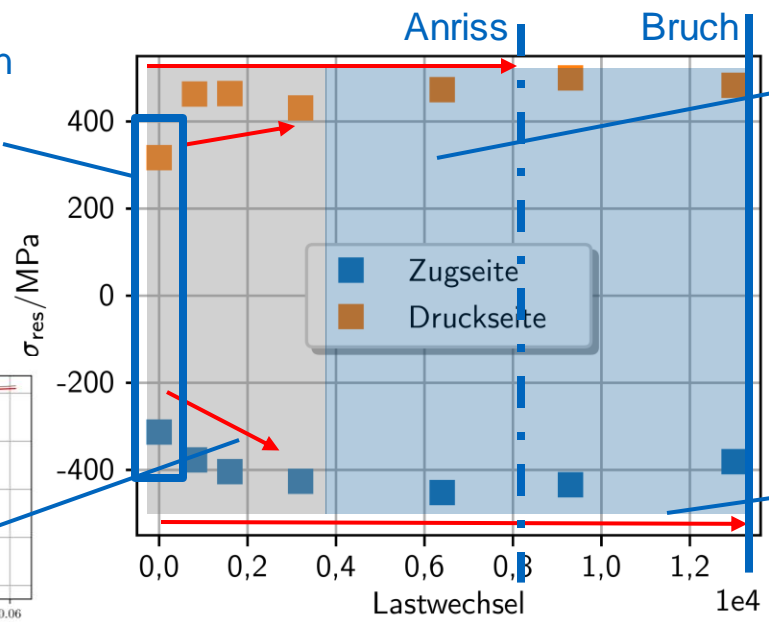
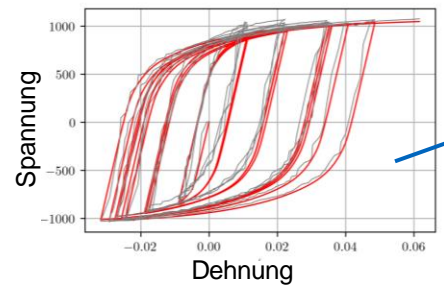
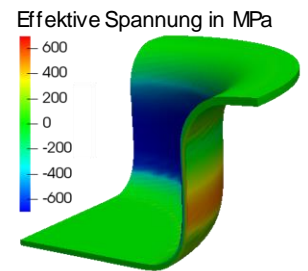




Zusammenfassung

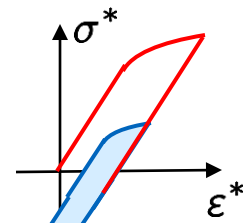


Prozesssimulation Mehrskalensimulation



Anriss Bruch

Örtliches Konzept



Messungen Gibmeier, KIT



Phasenfeldmodell für Ermüdungsrisse

Modell für niederzyklische Belastung

Simulative Vorhersage und Bewertung von Eigenspannungen

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im
Rahmen des Schwerpunktprogrammes 2013

Fachkreis Mechanik und Simulation

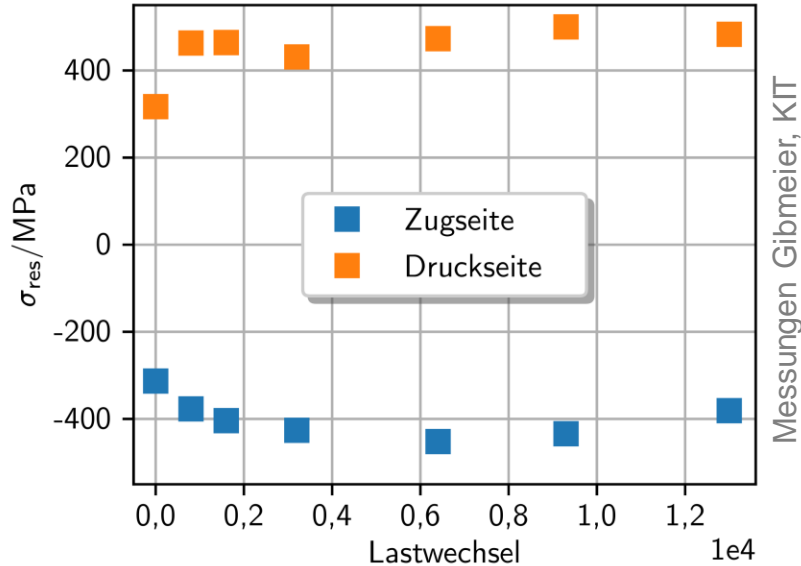
Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Kästner

Technische Universität Dresden

Professur für Numerische und Experimentelle Festkörpermechanik

Backup

Biegebenchmark - Bewertung der Ermüdungsfestigkeit



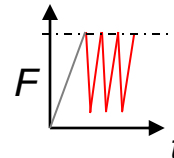
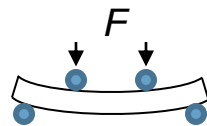
Messungen Gibmeier, KIT

Wie verhalten sich Eigenspannungen über Lebensdauer?

Lebensdauerbetrachtungen

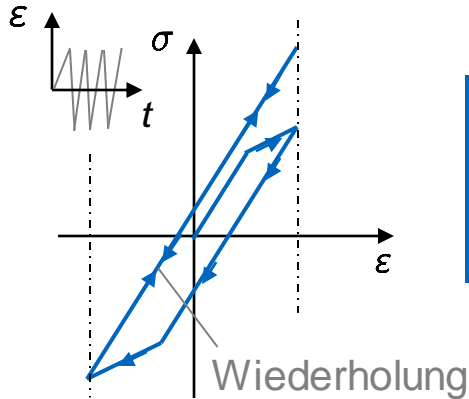
- Berücksichtigung Veränderung σ_{res}
- Einfluss auf evtl. Riss schließen

Zyklische Belastung Biegebalken

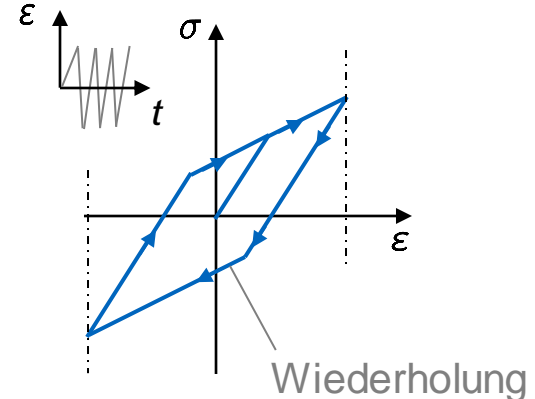


Niederzyklische Simulation von Eigenspannungen

Lineare isotrope Verfestigung



Lineare kinematische Verfestigung



Lineare
Verfestigung
nicht geeignet.

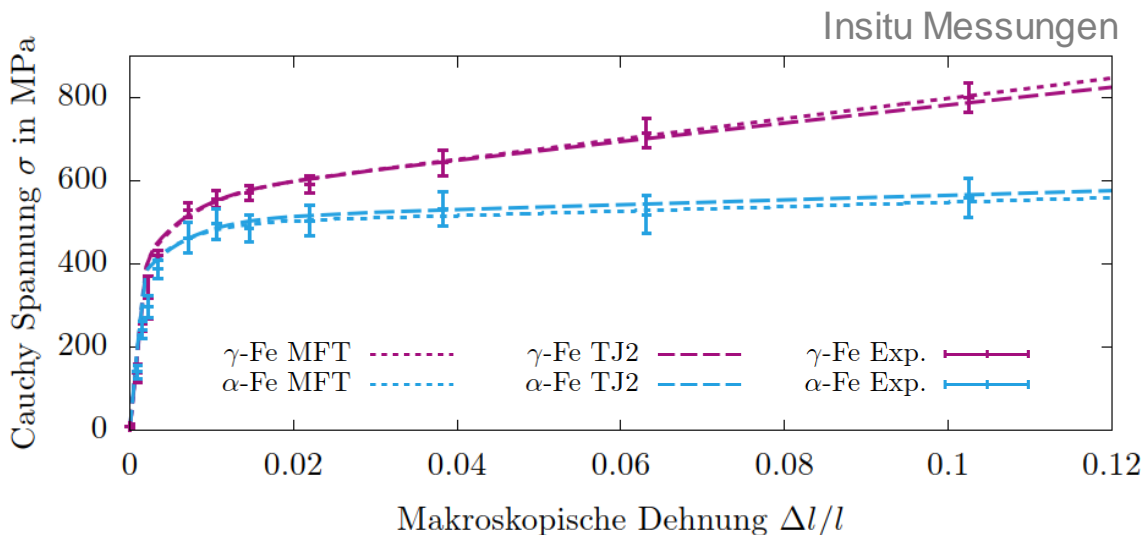
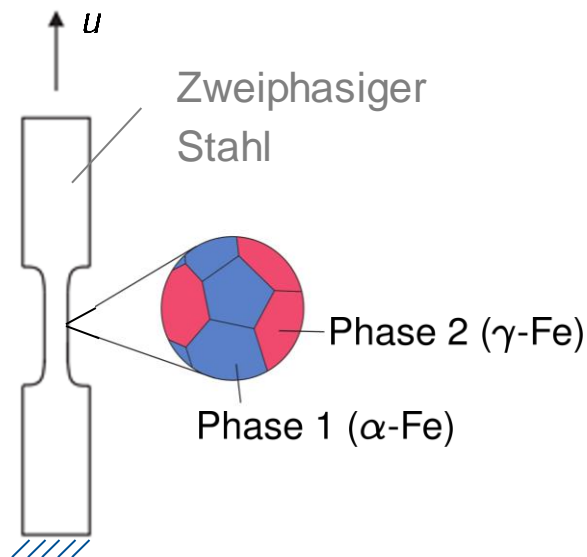
Geeignete Verfestigungsmodelle

(Nichtlineare) isotrope Verfestigung

Modellbeispiele: CHABOCHE, YOSHIDA, OHNO-WANG

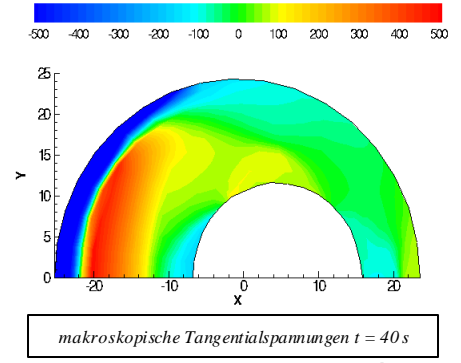
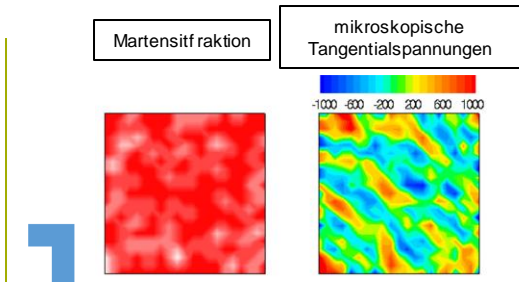
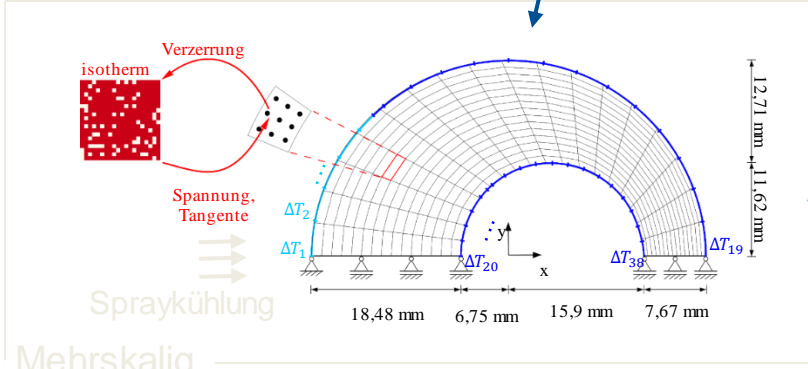
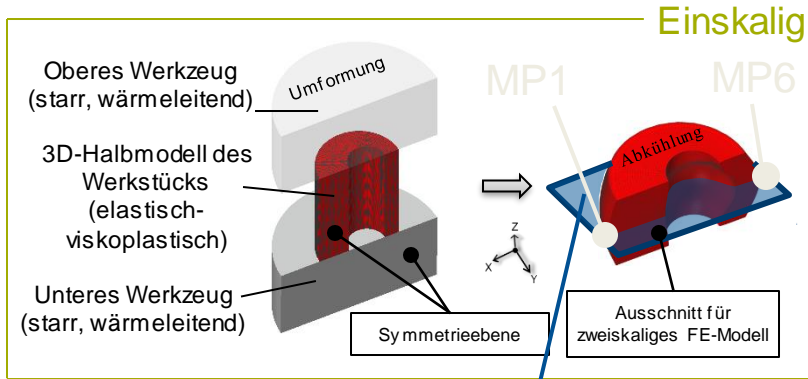
Nichtlineare kinematische Verfestigung

Mehrskalensimulation - Parametrisierung

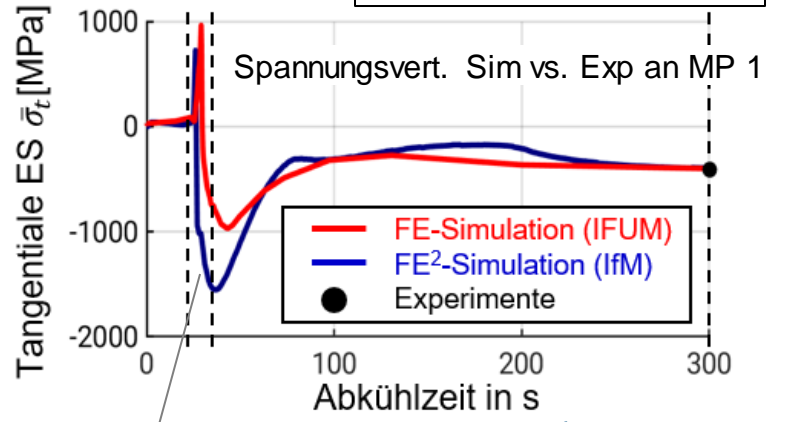


Charakterisierung & Parametrisierung der Einzelphasen mittels Zugversuch

Mehrskalensimulationen - Massivumformung



Randbedingungen:
Temperatur-Zeit-Verlauf



Phasentransformation

Eigenstressungen im (Kerb)-Spannungskonzept

FKM-Richtlinie^[1] $\sigma_{AK} = K_{AK} K_{E,\sigma} \sigma_W \dots$ Ertragbare Dauerfestigkeitsamplitude

Mittelspannungs-
faktor Eigenstressfaktor
→ tabellierte Werte insbesondere für
geschweißte Bauteile



FKM-Richtlinie (randschichtverfestigte Bauteile)^[1]

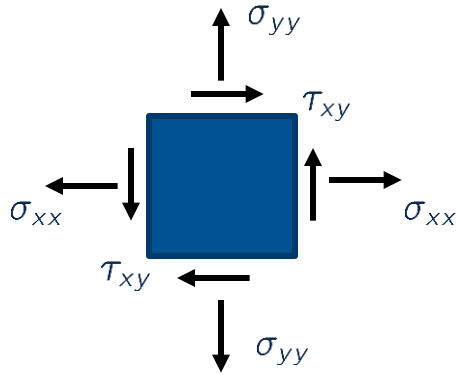
$\sigma_m = \sigma_{L,m} + \sigma_{E,m} \dots$ Mittelspannung

Lastmittelspannung Eigenstressung → als **konstant** überlagerte Mittelspannung

Starke Vereinfachung durch lineare Betrachtungsweise

[1] Rennert et al., FKM-Richtlinie 2012

Beanspruchungsmehrachsigkeit



Spannungstensor

+ Eigenspannungstensor

Komponentenweise Betrachtung

Festigkeitsnachweis für jede auftretende Spannungskomponente

✗ Gesamtanstrengung bleibt unbeachtet

Vergleichsbeanspruchungen

z.B. VON MISES Vergleichsspannung, Maximale Hauptnormalspannung

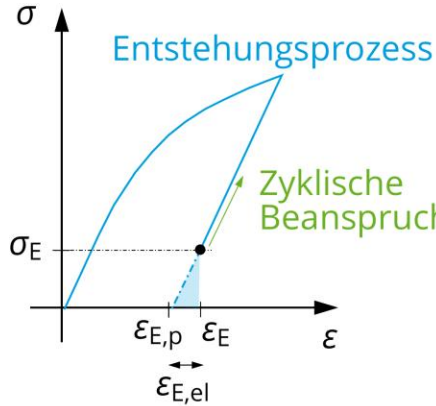
✓ (nahezu) proportionale Beanspruchung
✗ Drehende Hauptachsen

Methode der kritischen Schnittebene

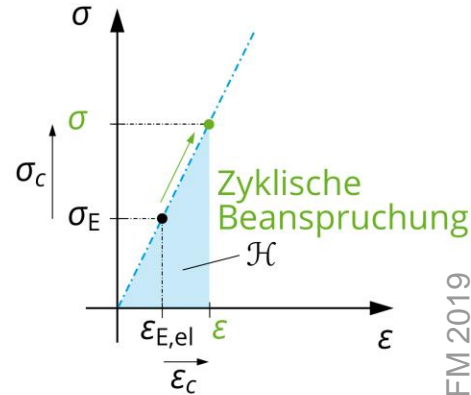
Schädigungsberechnung für mehrere, diskrete Schnittebenen am Betrachtungspunkt

✓ Drehende Hauptachsen
✗ Berechnungsaufwand

Phasenfeldmodell - Berücksichtigung von Eigenspannungen



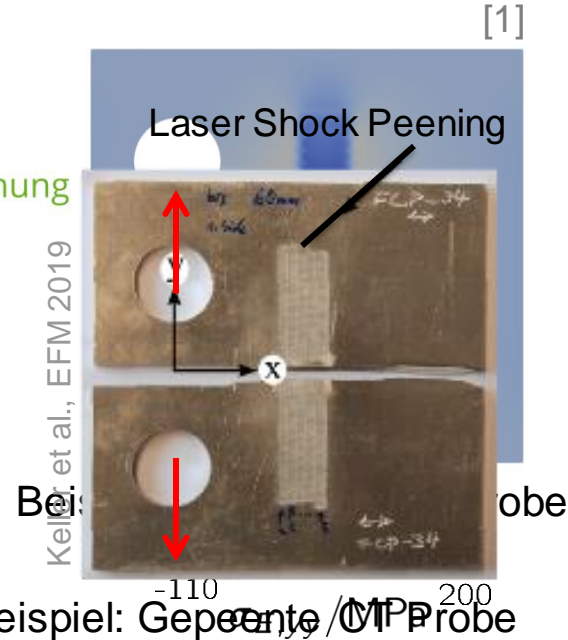
Vereinfachung für
Simulation



Modifizierte Größen

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_{E,el} + \boldsymbol{\varepsilon}_c = \boldsymbol{\varepsilon}_{E,el} + \frac{1}{2} \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right)$$

$$\mathcal{H}(\vec{x}, t) = \max_{\tau \in [0, t]} \psi_{0+}(\boldsymbol{\varepsilon}_{E,el} + \boldsymbol{\varepsilon}_c, \tau)$$



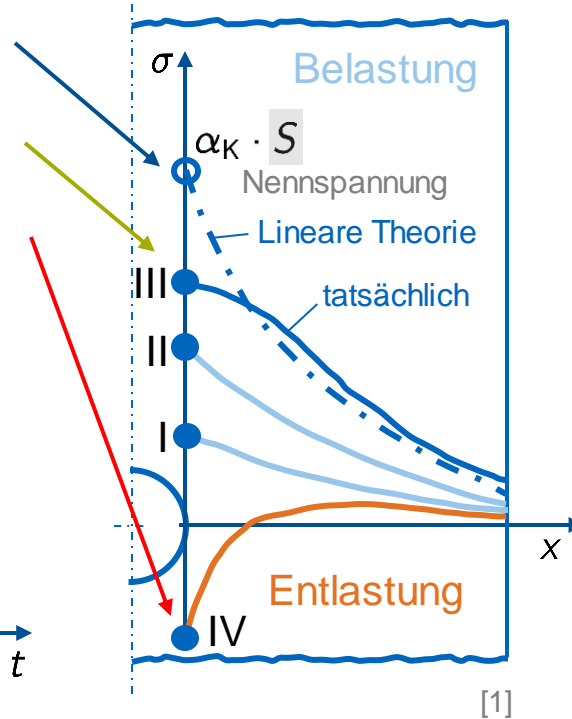
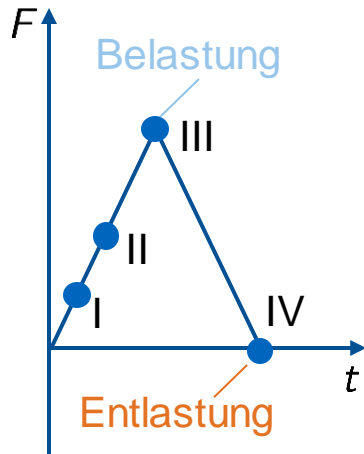
Beispiel: Gepeente MPP Probe

Beanspruchungsdefinition in der Betriebsfestigkeit

Kerbspannung

Örtliche Spannung

Eigenspannung



(Kerb)-Spannungskonzept

- Lineare Betrachtungsweise
- bewährte Richtlinien (z.B. FKM-Richtlinie)

Örtliches Konzept

- Materielle Nichtlinearität
- Bewertung am Materialpunkt

Bruchmechanik

- Ausgangspunkt Anriss
- Lebensdauervorhersage bis Bruch



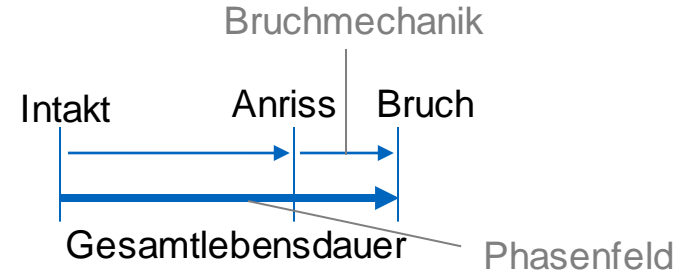
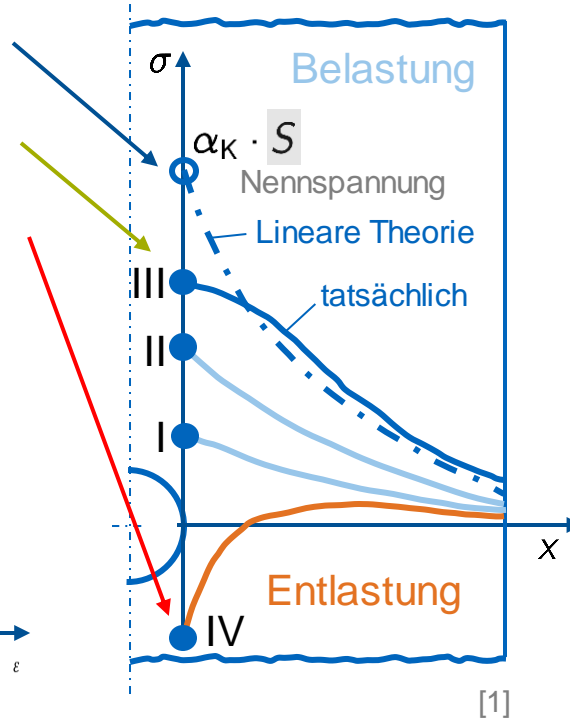
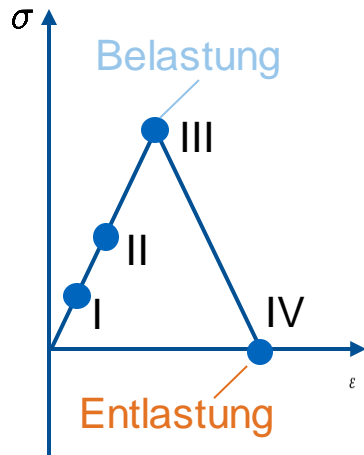
[1] Haibach, Springer, 2006

Beanspruchungsdefinition in der Betriebsfestigkeit

Kerbspannung

Örtliche Spannung

Eigenspannung

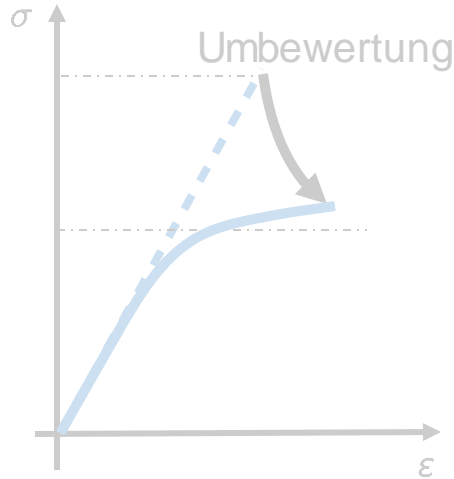


Phasenfeld für Ermüdungsrisse

[1] Haibach, Springer, 2006

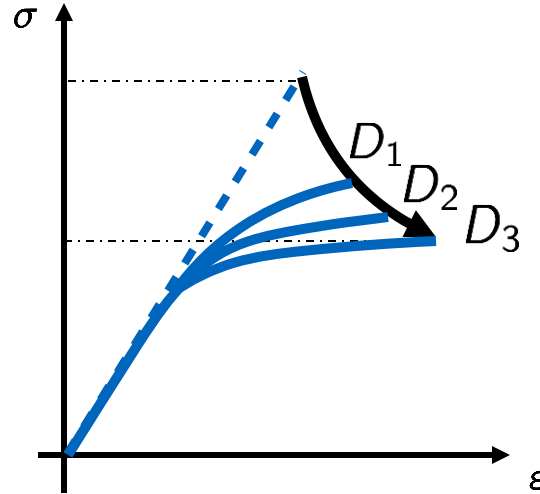
SPP 2013

Örtliches Konzept – Transientes Materialverhalten



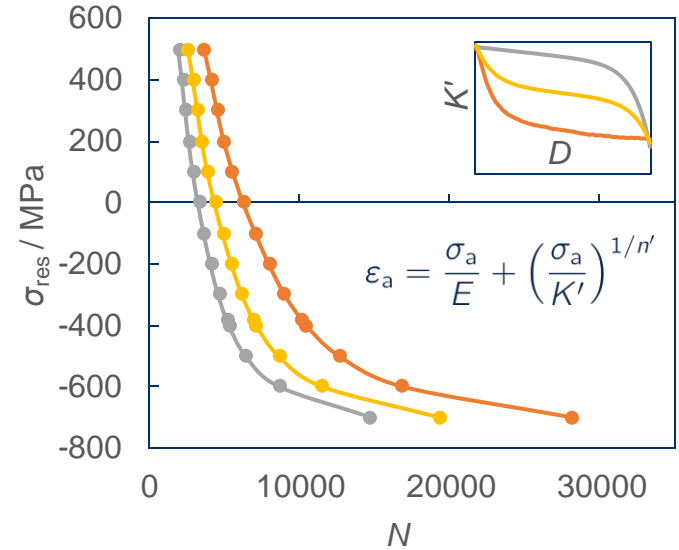
Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve

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



Zyklisch transiente Spannungs-Dehnungs-Kurve^[1]

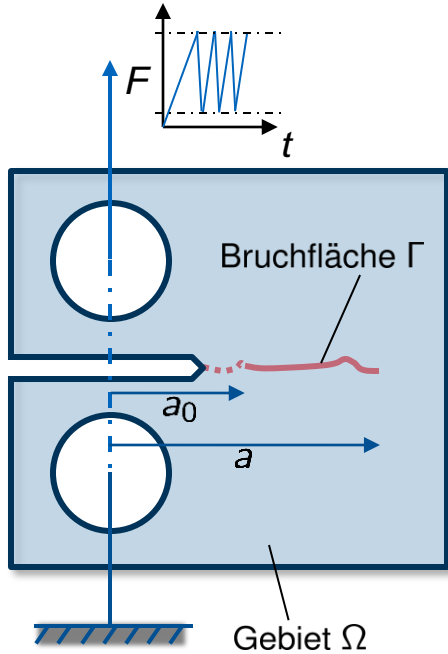
$$\varepsilon^* = \frac{\sigma^*}{E} + \left(\frac{\sigma^*}{K'(D)} \right)^{1/n'(D)}$$



Veränderte Hysteresegestalt über Lebensdauer

[1] Kühne et al., Prod. Eng. 2019

Ermüdungsrissimulation



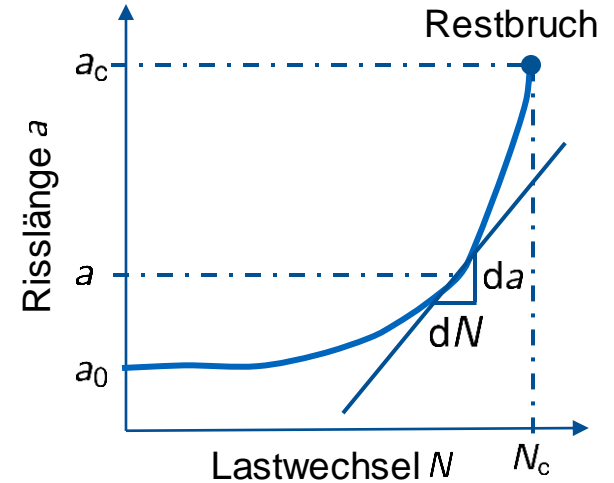
Formulierung als
Minimierungsproblem:

$$\Pi_\ell = \int_{\Omega} \psi^e(\boldsymbol{\varepsilon}) dV + \int_{\Gamma} \mathcal{G}_c dA$$

Elast. Energie Bruchenergie

$\Pi_\ell \rightarrow \min.$

→ Beschreibung Bruchfläche Γ mithilfe
zusätzlicher Phasenfeldvariable d möglich^[1]



Einfluss Materialermüdung?

[1] Bourdin et al., J Mech Phys Solids 2000