
MIKROSTRUKTURBASIERTE BESCHREIBUNG DER ENTSTEHUNG VON RISSEN IN SCHWEIßVERBINDUNGEN

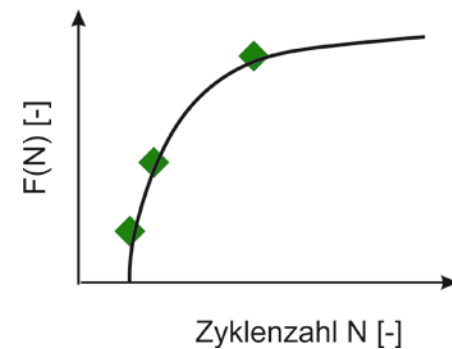
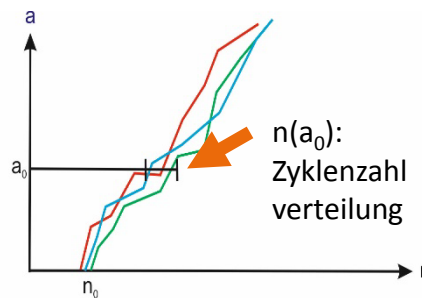
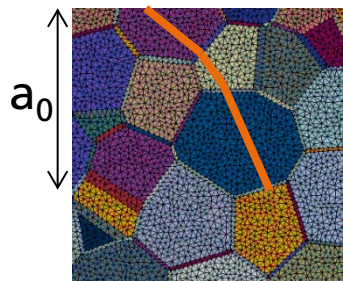
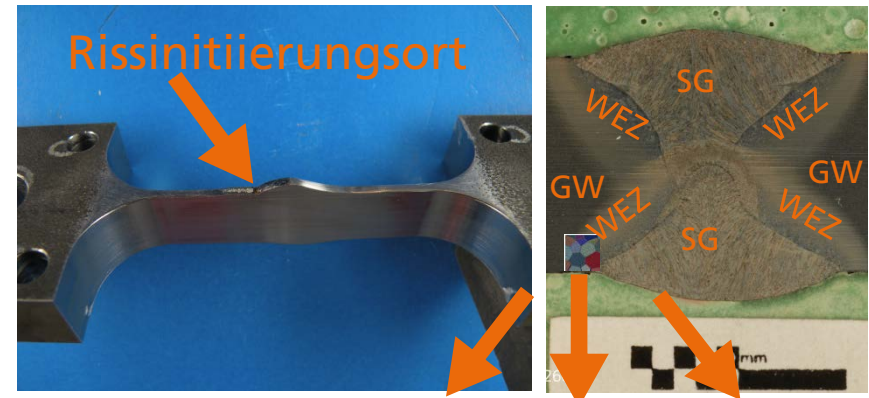
Carla Beckmann

Majid Farajian, Jörg Hohe, Dieter Siegele

- Einleitung
- Entwicklung des numerischen Rissausbreitungsmodells
- Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen
 - Numerische Berechnungen
 - Experimentelle Validierung
- Zusammenfassung
- Ausblick

Einleitung

- Betrachtung von qualitative hochwertigen/defektfreien Schweißnähten
- Risse initiieren im Bereich der Nahtüberhöhung in der WEZ
- Entwicklung eines schädigungsmechanisches Modells zur Beschreibung der Rissinitiierungsphase
- Probabilistischer Ansatz:

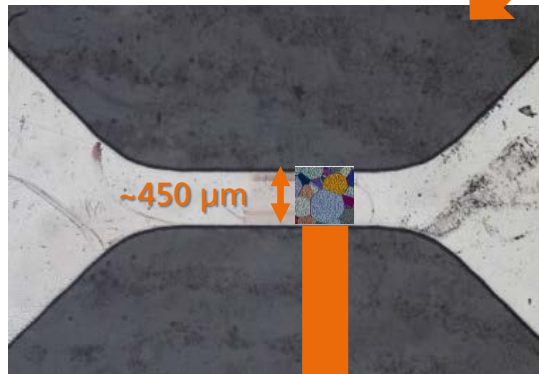
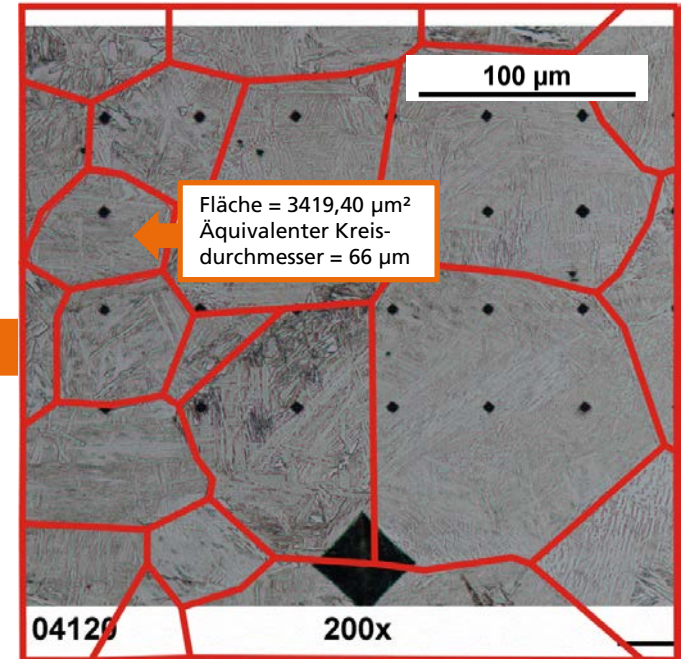


Eingangsinformation für bruchmechanische Berechnungskonzepte

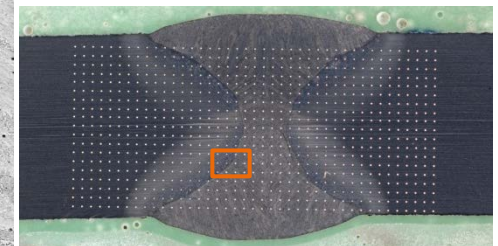
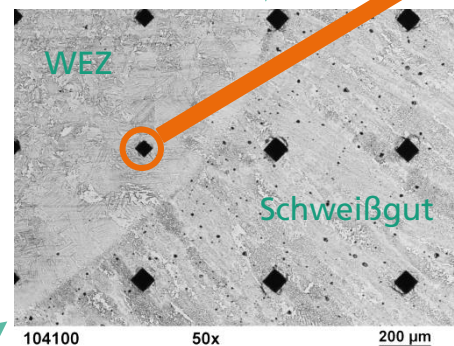
Entwicklung des numerischen Rissausbreitungsmodells

Mikrostrukturausschnitt aus der Grobkorn-WEZ

Stumpfstoß S355



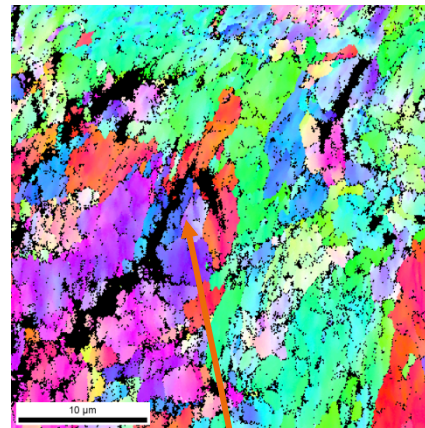
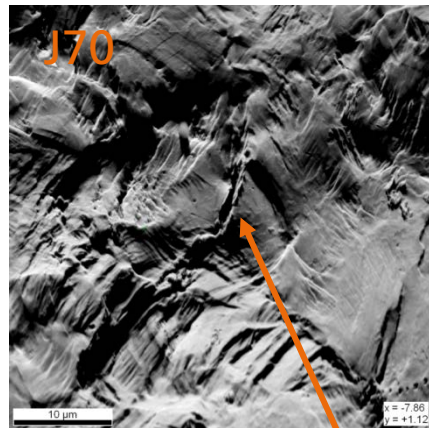
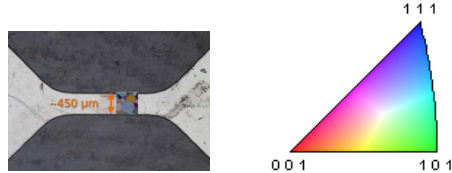
- Korngrößen im Modell sind an die ehemaligen Austenitkörner angepasst



Entwicklung des numerischen Rissausbreitungsmodells

Rissausbreitungsebenen

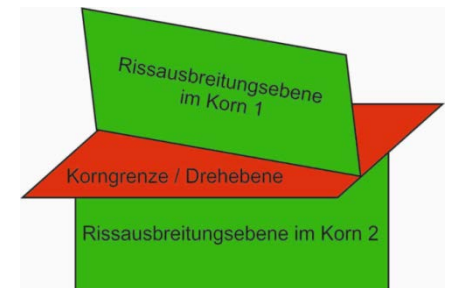
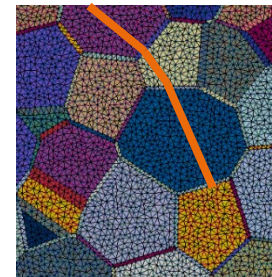
EBSD Oberfläche



- Nebenriss verläuft durch ein Korn (somit auch durch ein ehemaliges Austenitkorn)

Transkristalline Rissausbreitung

- Risswachstum entlang von Gleitebenen in einem Korn
- im Bereich der Korngrenze “dreht” sich der Riss um im Nachbarkorn in der anders orientierten Rissausbreitungsebene weiterwachsen zu können

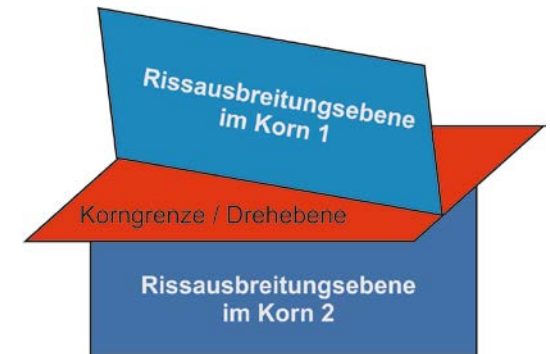
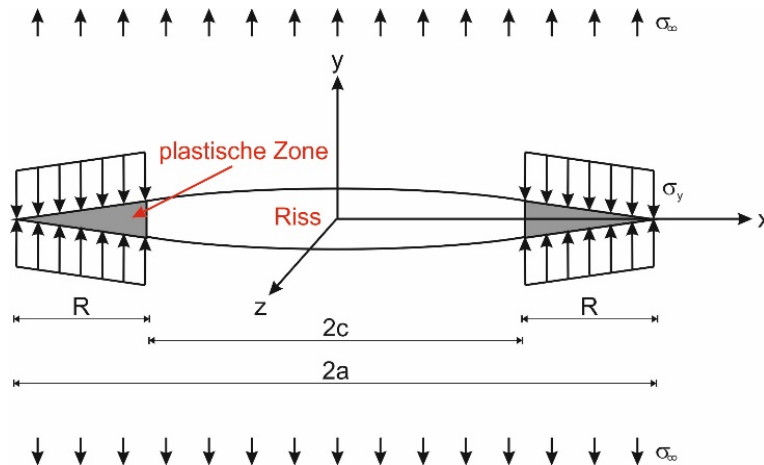
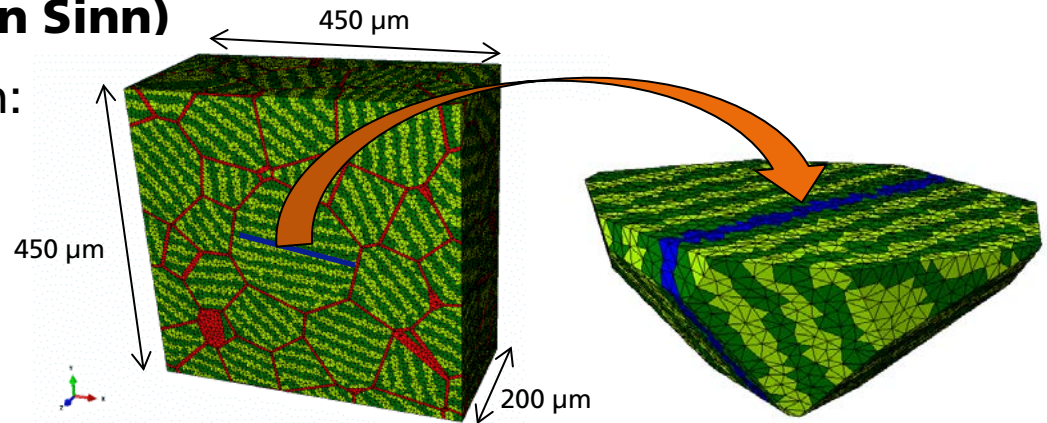


➔ je Korn ist die potentiell günstigste Rissausbreitungsebene modelliert

Entwicklung des numerischen Rissausbreitungsmodells Modell im Dugdale'schen Sinn

■ Schädigung wird in ausgewählte Ebene projiziert (Modell im Dugdale'schen Sinn)

- Rissausbreitungsebenen:
elastisch-plastisch
- Drehebene:
elastisch-plastisch
- Körner: elastisch



Entwicklung des numerischen Rissausbreitungsmodells

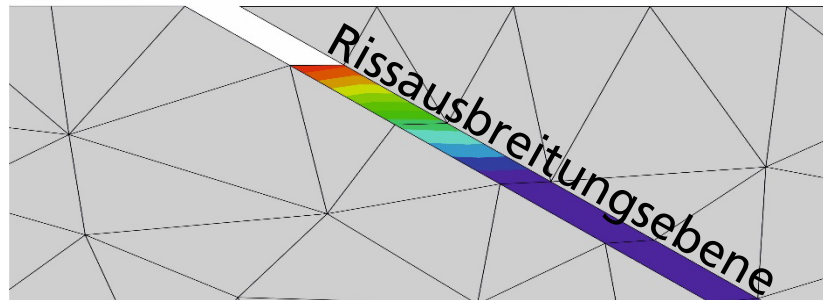
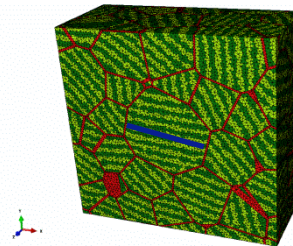
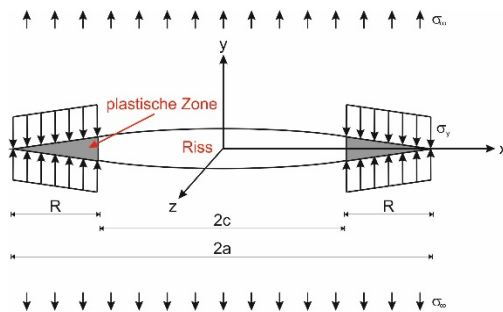
Schädigungsmodellierung

■ Schädigungsmodell für die finiten Elemente in den Rissausbreitungs- bzw. Drehebene:

■ Schädigungsgleichung: $\sigma = (1 - D) \bar{\sigma}$

■ Schädigungsbeginn: $N_0 = c_1 \Delta w^{c_2}$

■ Schädigungsrate: $\frac{dD}{dN} = \frac{c_3 \Delta w^{c_4}}{L}$



σ : Spannungstensor

D : Schädigungsparameter

$\bar{\sigma}$: effektiver ungeschädigter Spannungstensor

N_0 : Zyklus des Schädigungsbeginns

c_1, c_2, c_3, c_4 : Konstanten

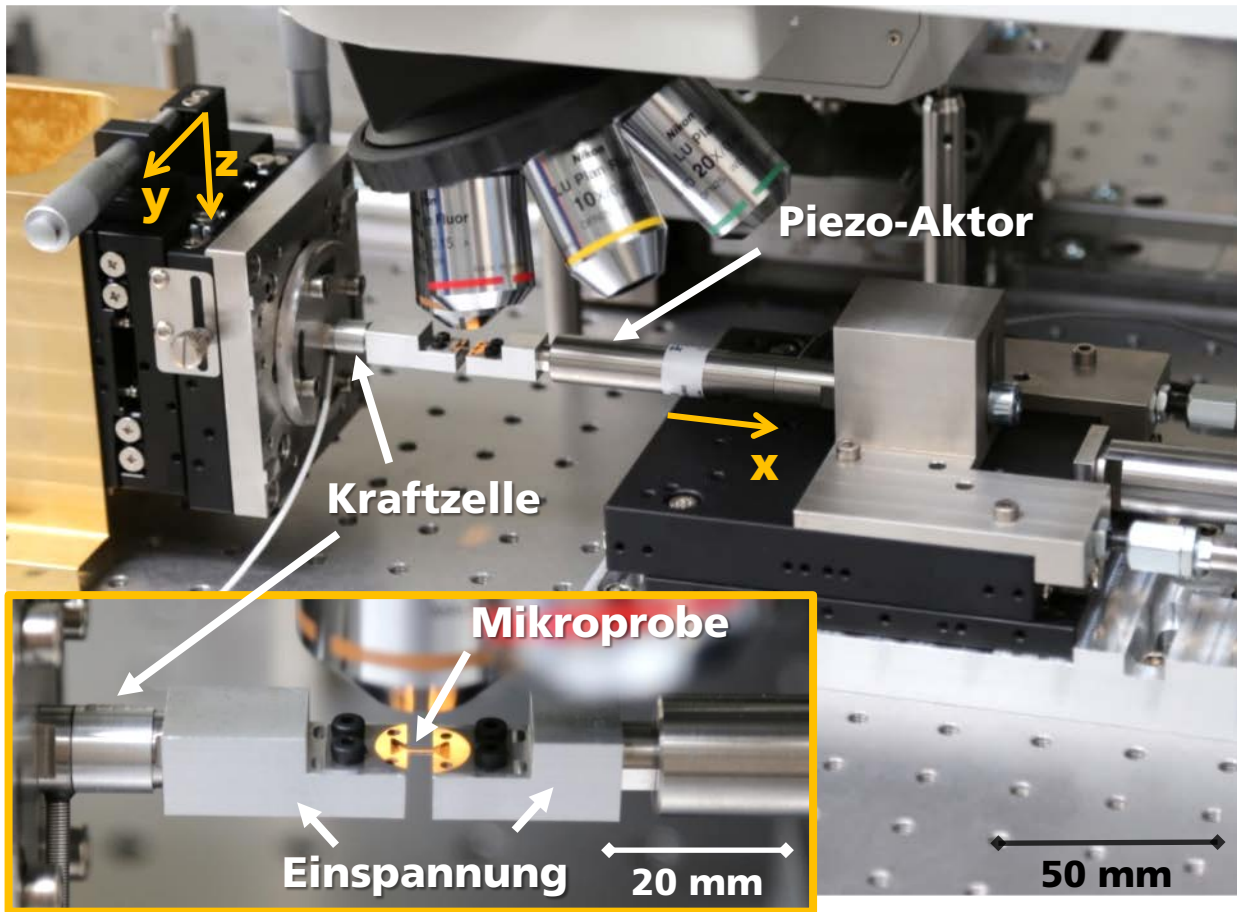
Δw : dissipierte plastische Energie eines Zyklus

L : charakteristische Länge

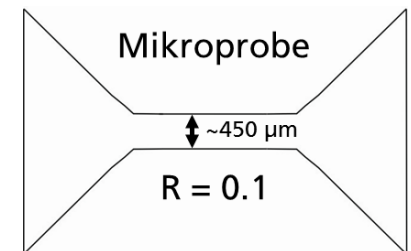
$\frac{dD}{dN}$: Schädigung je Zyklus

Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen

Versuchsaufbau: Mikro-Ermüdungsversuche

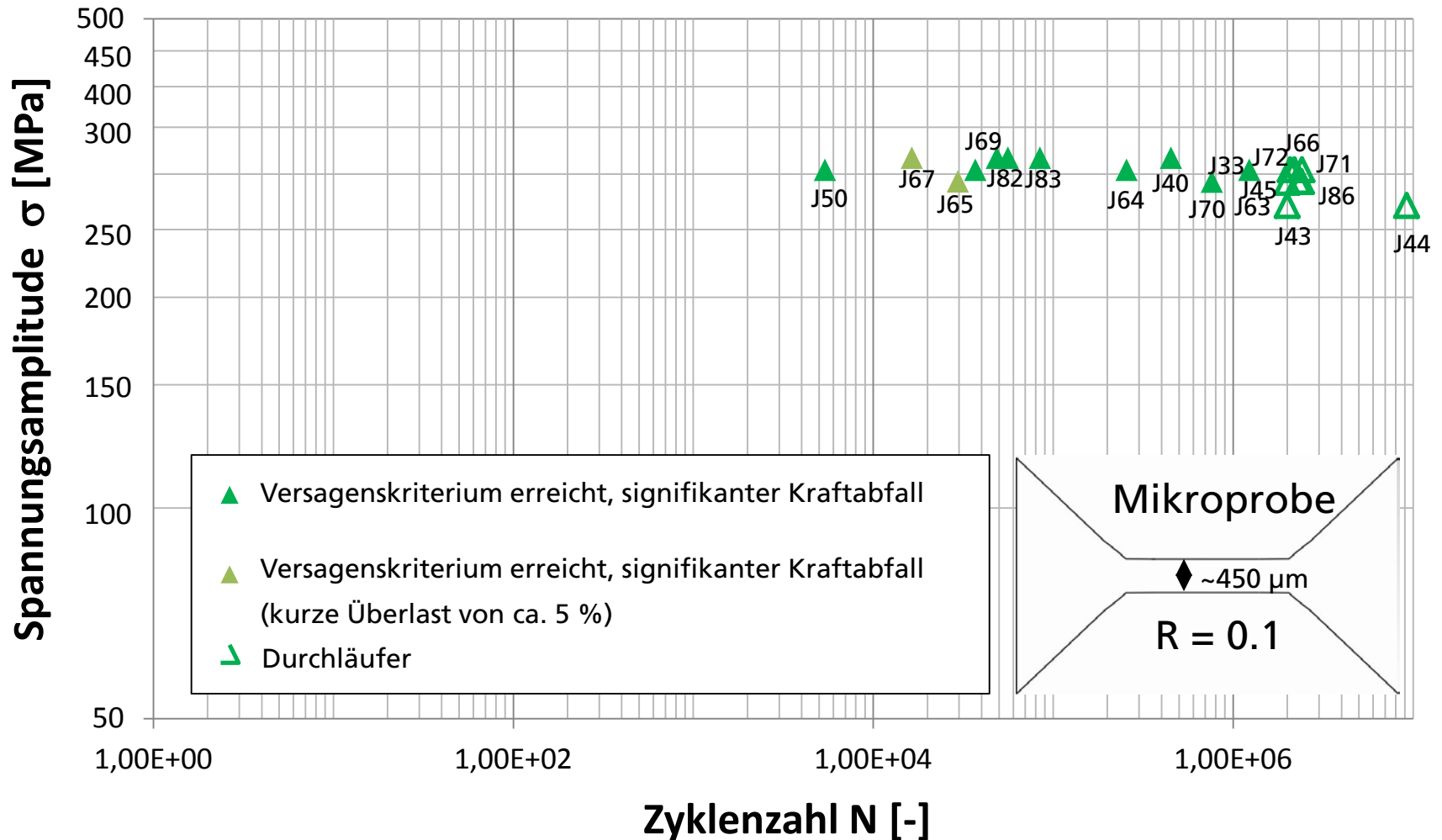


Mikroproben-
entnahme



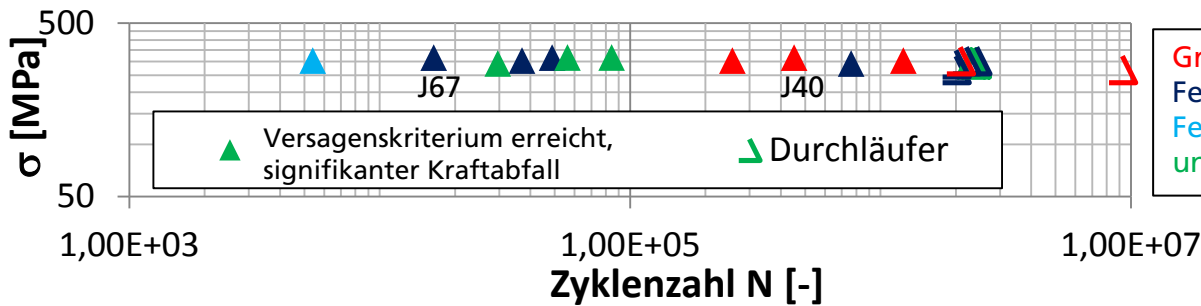
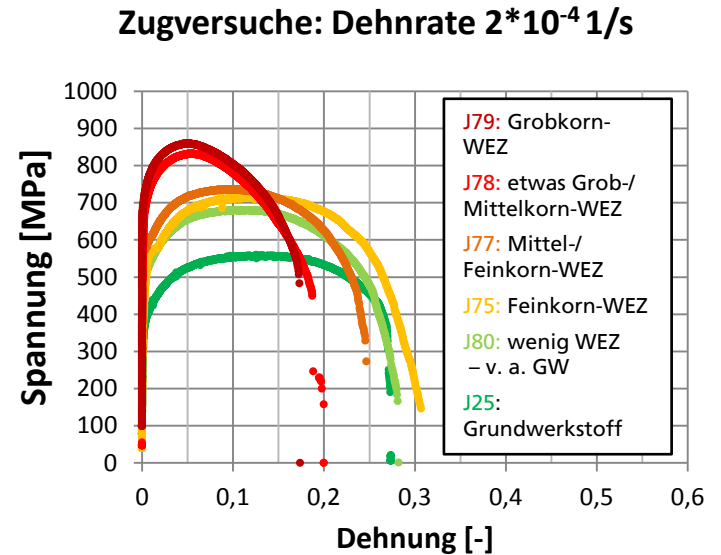
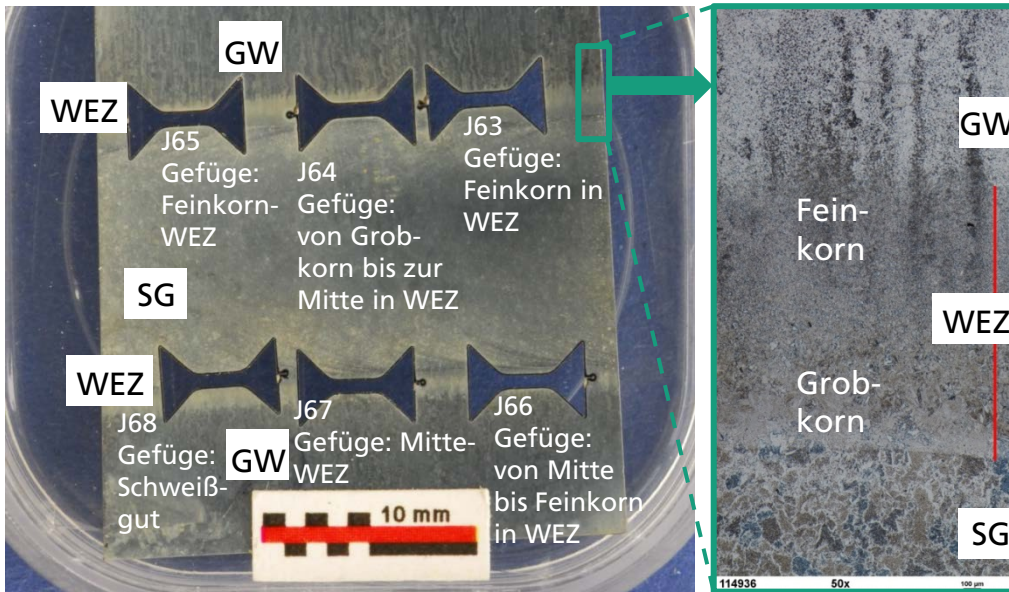
Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen

Ermüdungsversuche an Mikroproben



Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen

Ursachen für große Streuung bei den Mikroprobenversuchen



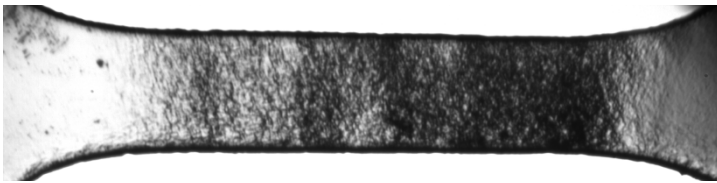
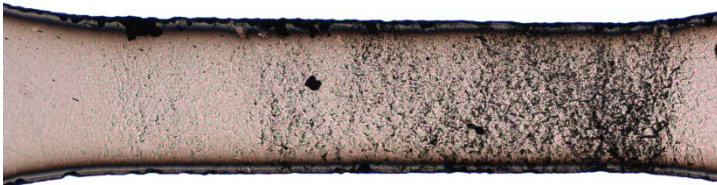
Grobkorn bzw. überwiegend Grobkorn
 Feinkorn bzw. überwiegend Feinkorn
 Feinkorn & Grundwerkstoff
 unbekannt bzw. keine Zuordnung möglich

➔ Tendenzuell früheres Versagen für Mikroproben aus Feinkorn-WEZ als aus Grobkorn-WEZ

Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen

Geschädigte Mikroproben

J67 (Mitte-Feinkorn-WEZ): 16426 Zyklen
Lastamplitude: 316 MPa



➔ Mehrfachanrisse,
starke Verformung,
Verhalten ähnlich
Zugversuch

➔ Versagen durch einen Riss nur bei Proben aus der Grobkorn-WEZ

J40 (Grobkorn): 451609 Zyklen
Lastamplitude: 316 MPa

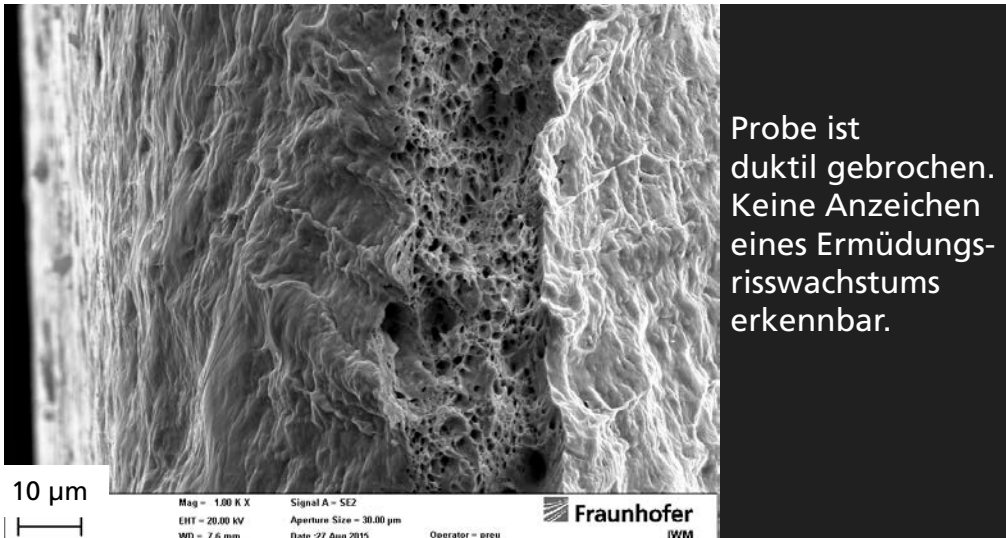


➔ Hauptriss, wächst mittig
von der Probenrückseite
nach außen und in die
Tiefe

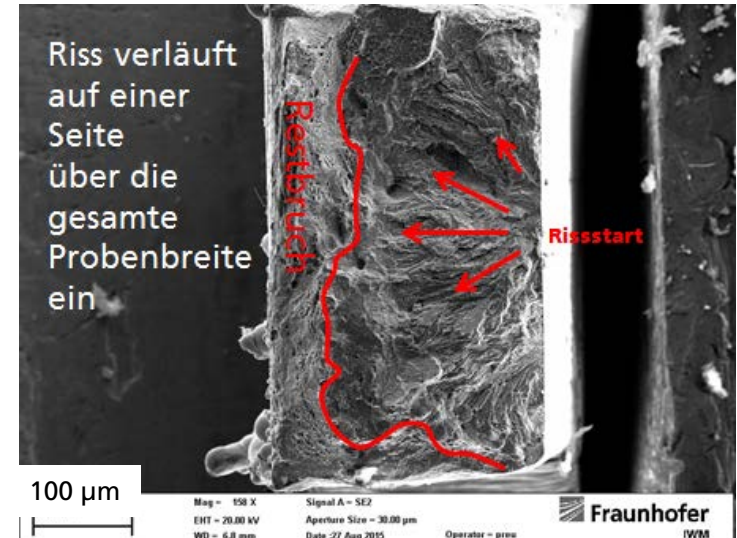
Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen

Geschädigte Mikroproben (nach Versuch aufgebrochen)

J67 (Mitte-Feinkorn-WEZ): 16426 Zyklen
Lastamplitude: 316 MPa



J40 (Grobkorn): 451609 Zyklen
Lastamplitude: 316 MPa



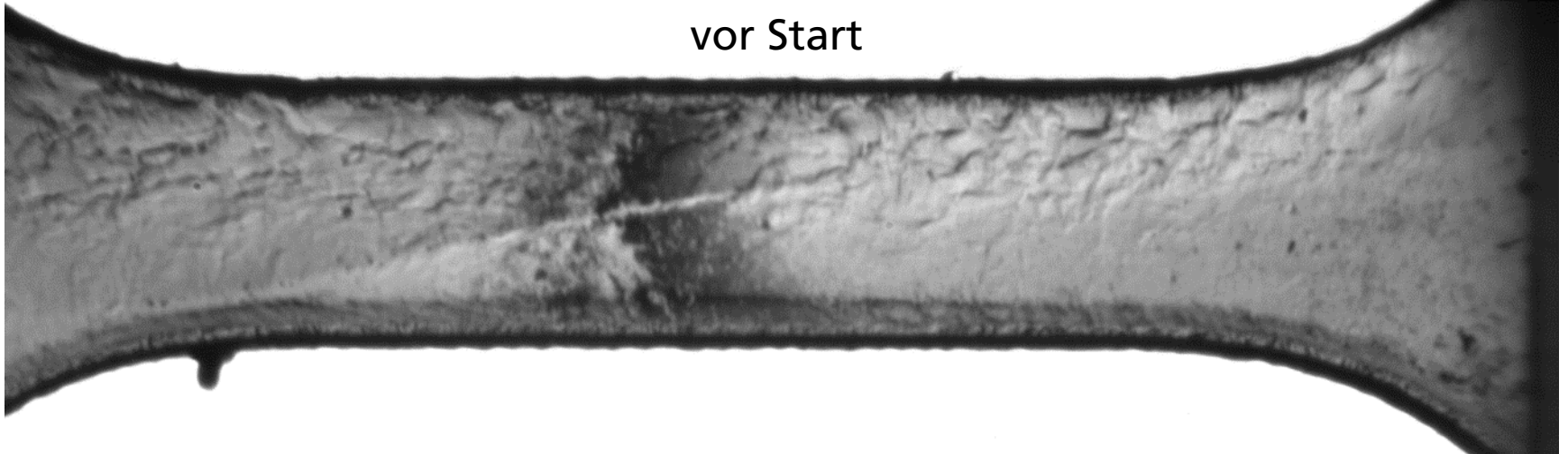
➔ Mehrfachanrisse, starke Verformung, Verhalten ähnlich Zugversuch

➔ Versagen durch einen Riss nur bei Proben aus der Grobkorn-WEZ

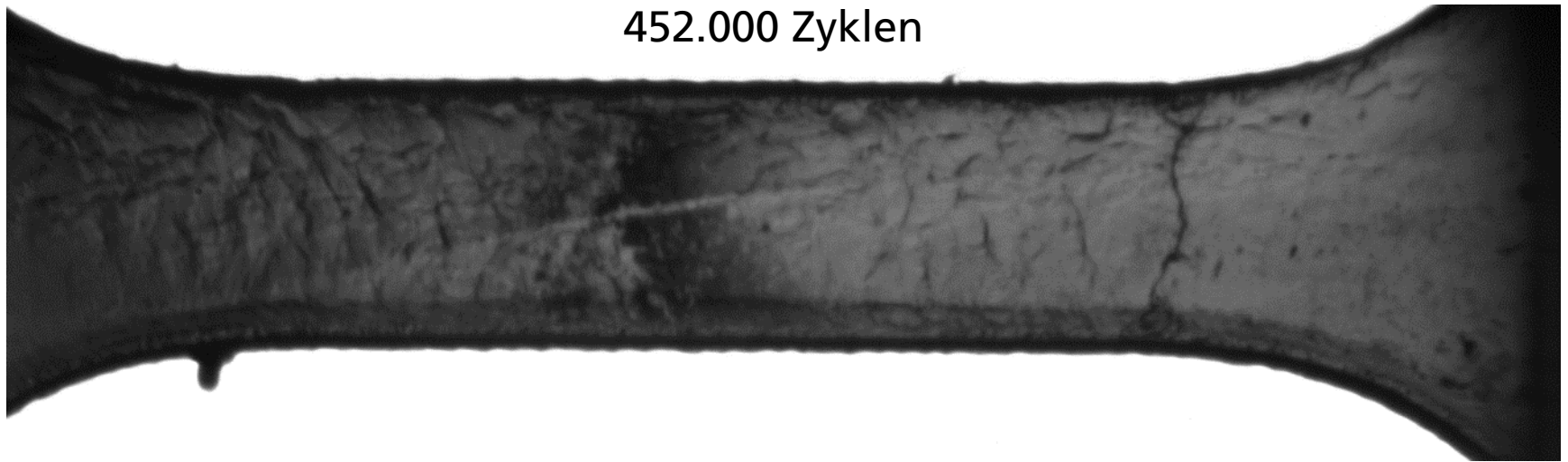
Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen

Risswachstum in der Mikroprobe J40

vor Start



452.000 Zyklen

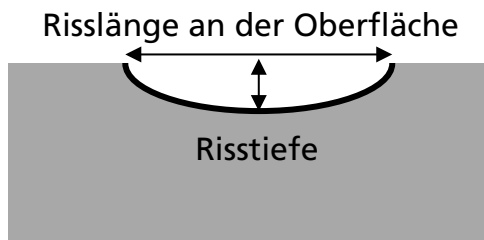
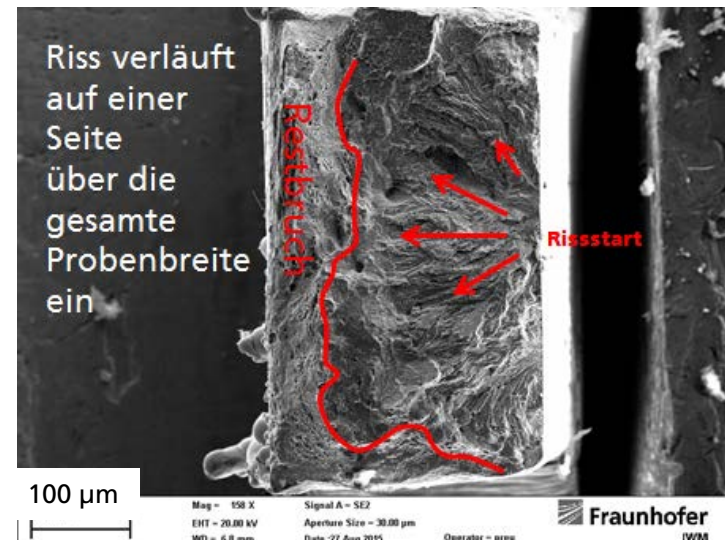
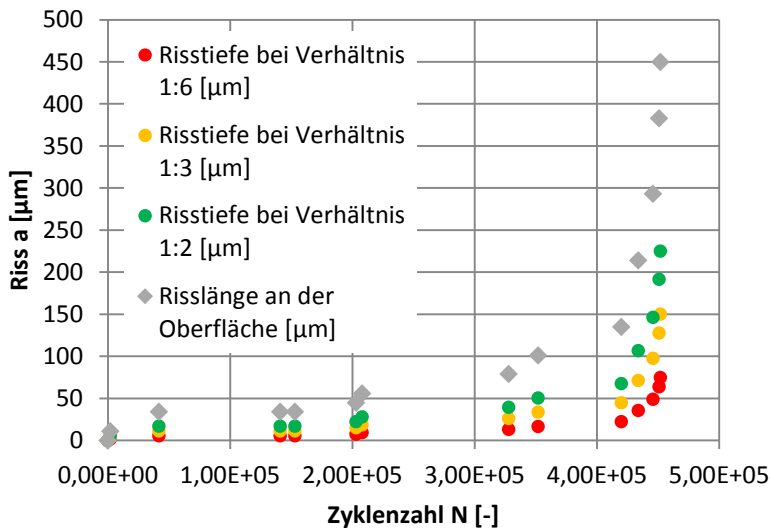


Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen

Auswertung des Risswachstums in der Mikroprobe J40

■ Risswachstum in Probe aus der Grobkorn-WEZ

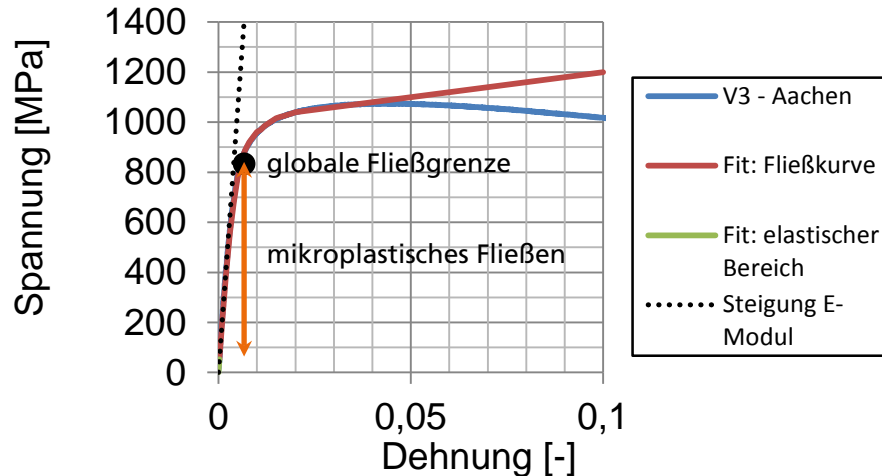
Risslänge und abgeleitete Risstiefen



Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen

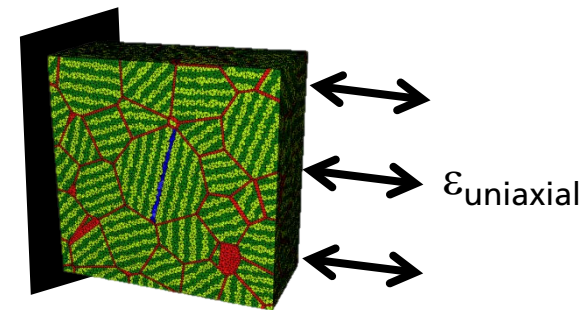
Numerische Berechnung für die Rissentstehungsphase

- Materialdaten für die Grobkorn-WEZ (S355 – Decklage 2 / IEHK Aachen):



- 10 Modelle

- 450 μm x 450 μm x 200 μm
- Kornstruktur zufalls-gesteuert generiert



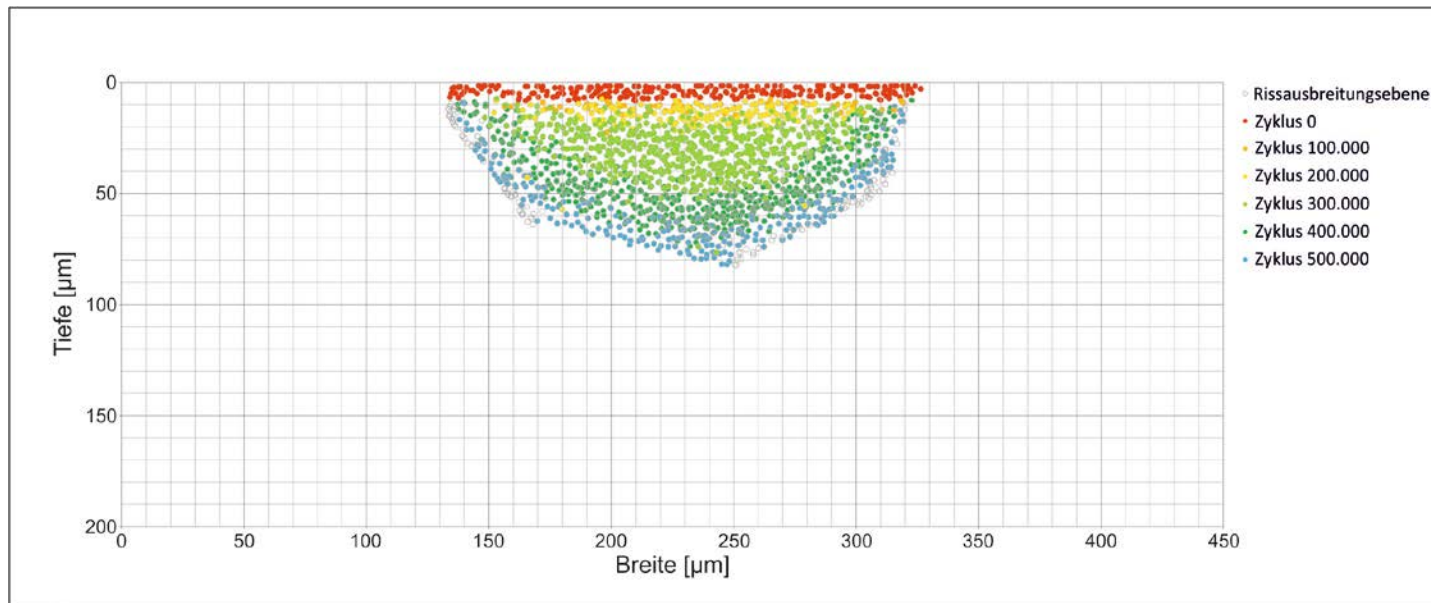
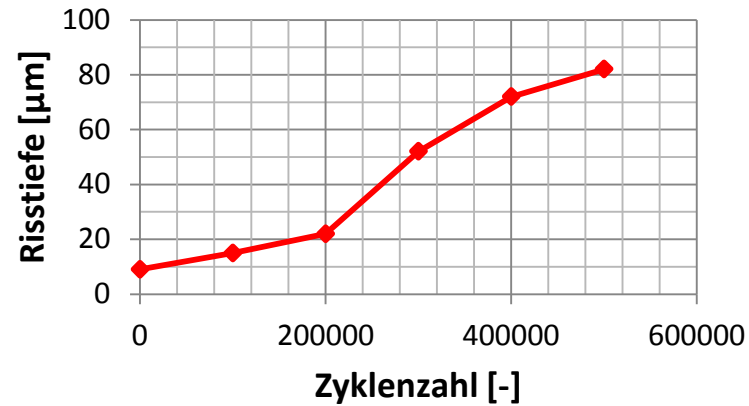
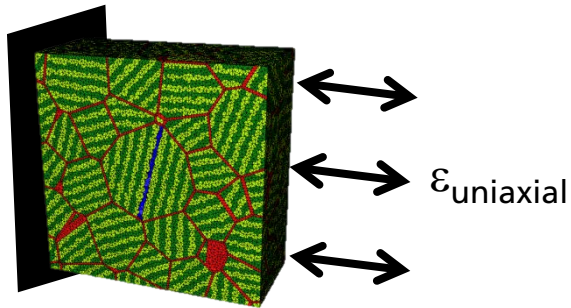
- Ermüdung erfolgt unterhalb der globalen Fließgrenze
- ➔ Schädigung durch mikroplastisches Fließens

- R-Verhältnis: 0,1
- dehnungsgesteuerte Belastung
- Lastamplituden: 300 MPa, 200 MPa und 100 MPa
- 1 Rechenzyklus entspricht 100000 realen Zyklen

Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen

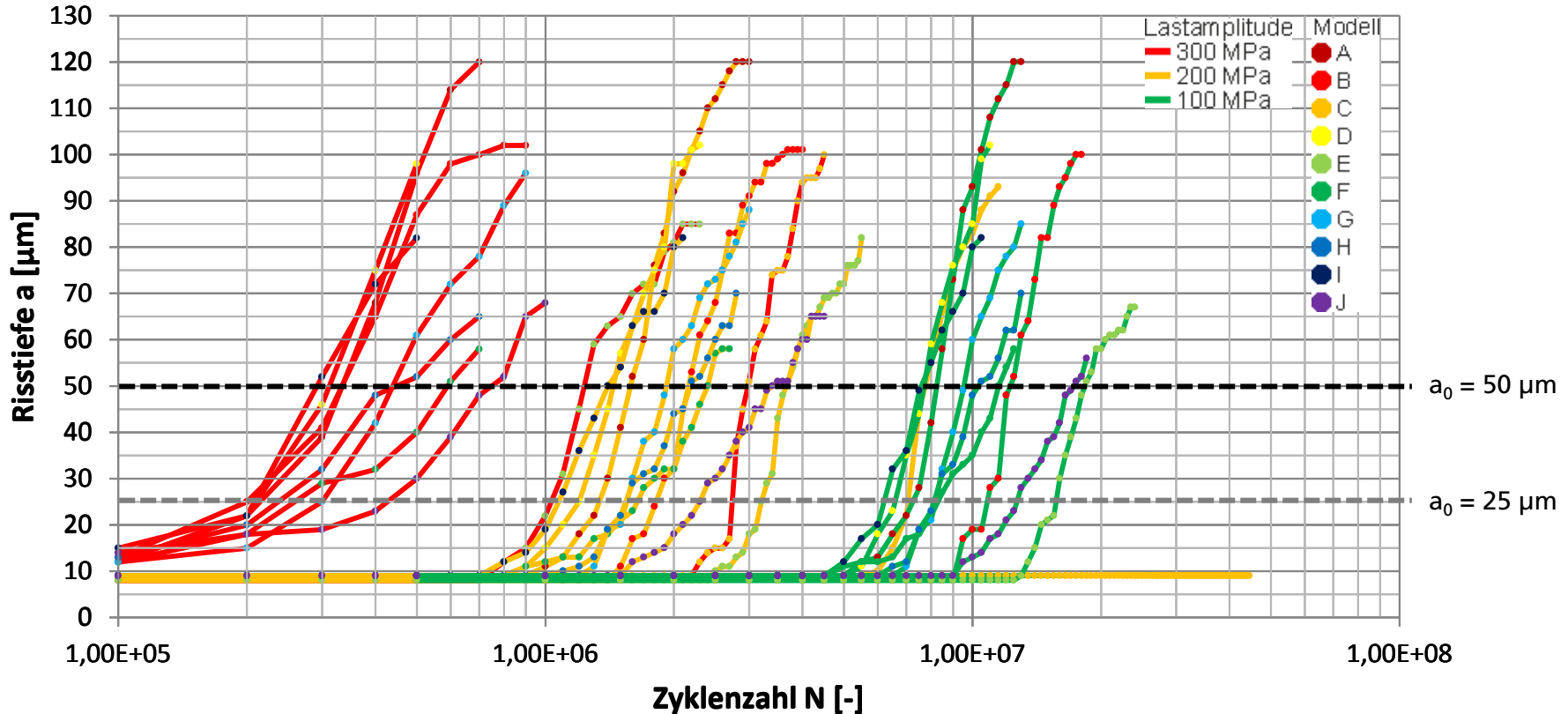
Risswachstum

■ Modell I: $\Delta\sigma = 300$ MPa



Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen

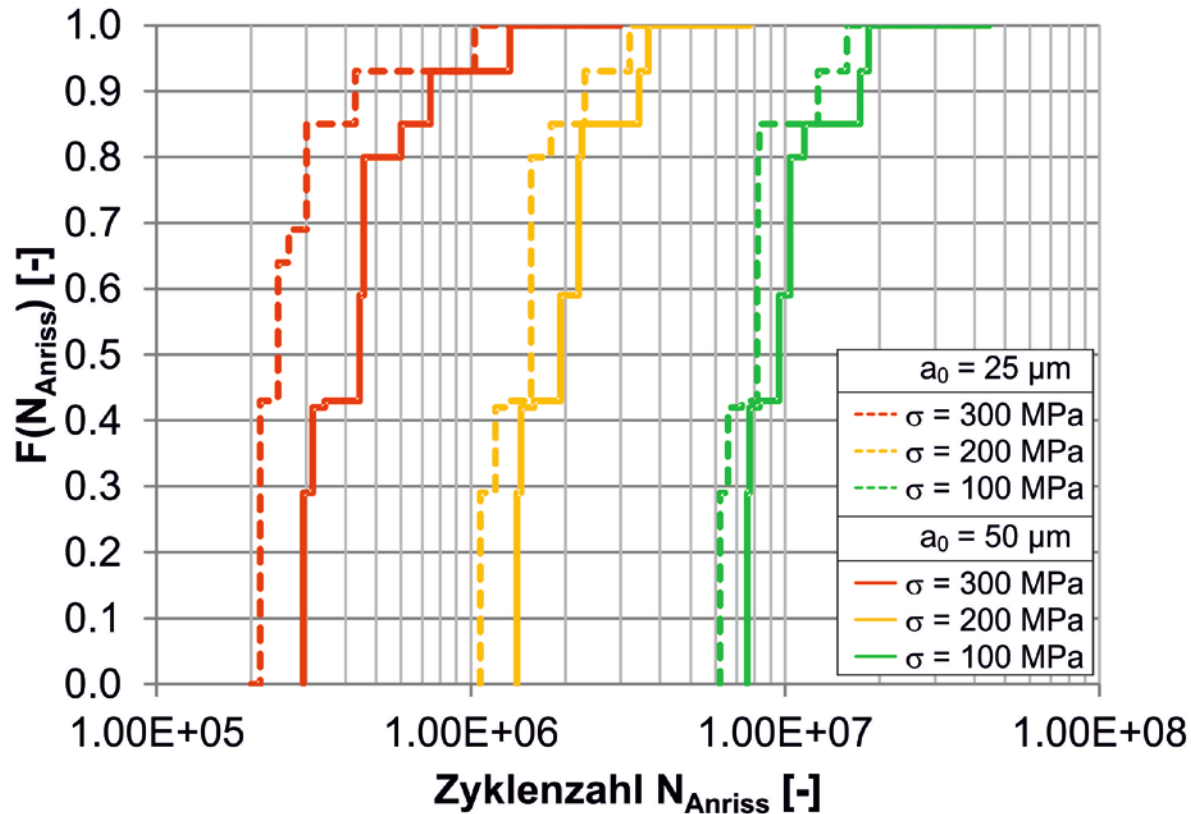
Ergebnisse der Risswachstumsrechnungen



➔ sigifikante Streuung auf den verschiedenen Lasthorizonten resultiert aus zufälligen Kornstrukturen mit unterschiedlich orientierten Rissausbreitungsebenen

Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen

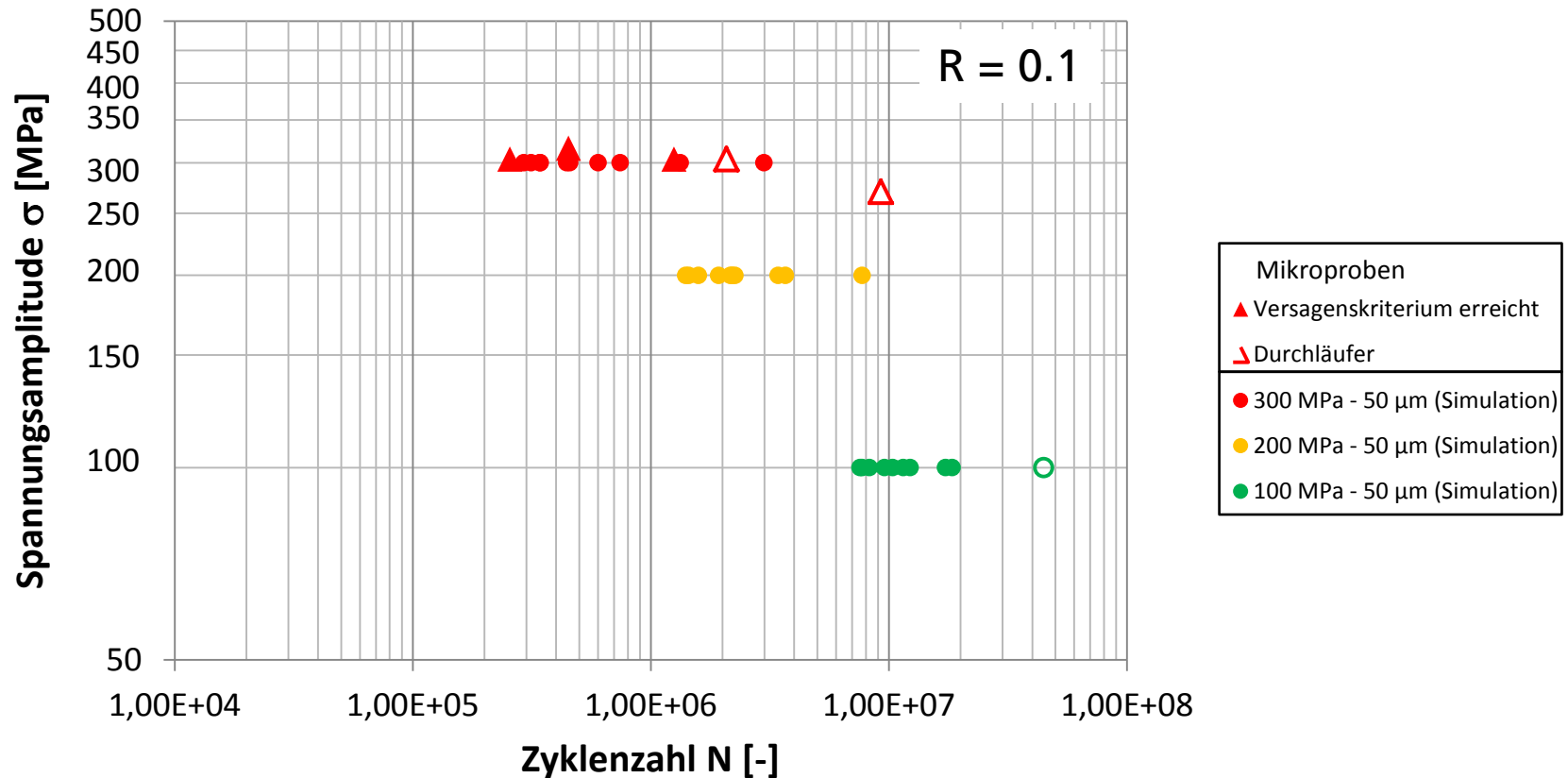
Anrisszyklenzahlverteilungen



➔ Streuung in den Zyklenzahlen bis zu einer Anrisslänge kann abhängig vom Lasthorizont durch die Simulationsrechnungen ermittelt werden

Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen

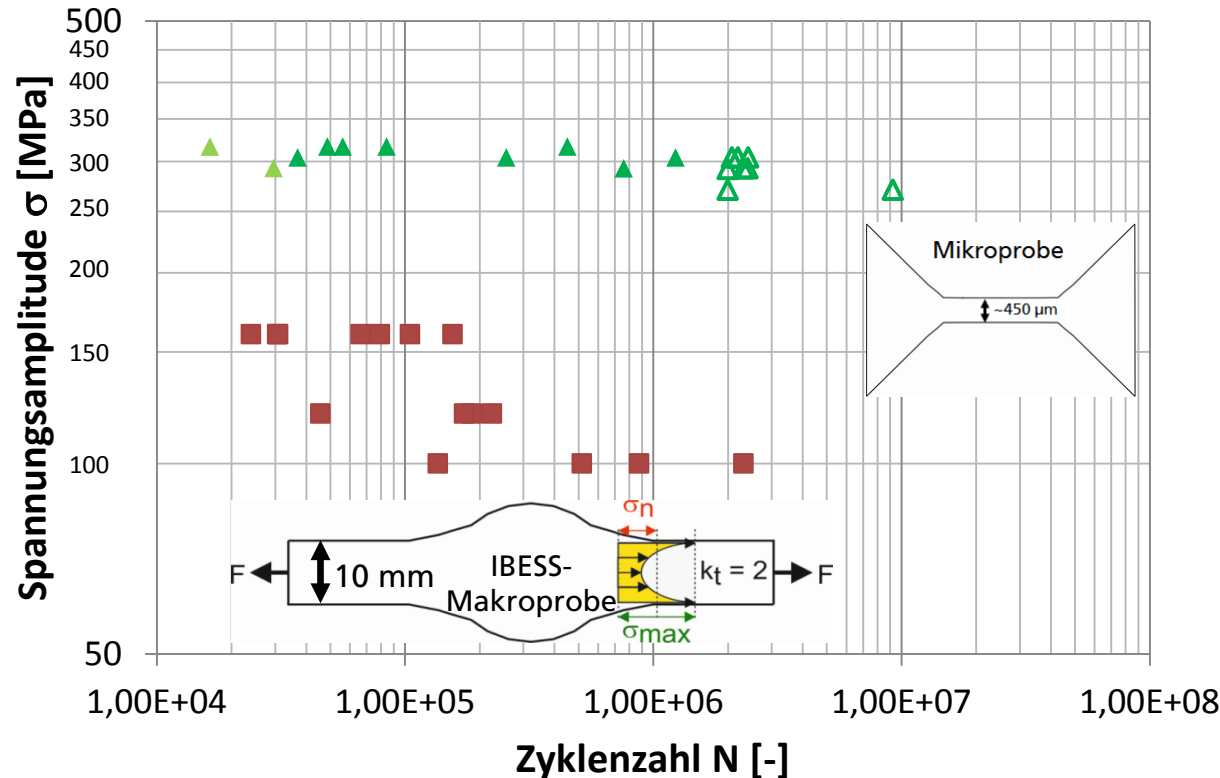
Vergleich: Simulation – Mikroproben aus Grobkorn-WEZ



➔ Gute Übereinstimmung der berechneten 50- μm -Anrisszyklenzahlen mit den experimentellen Daten der Mikroproben aus der Grobkorn-WEZ

Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen

Vergleich: IWM-Mikroproben – IBESS-Makroproben (Anriss < 1 mm)



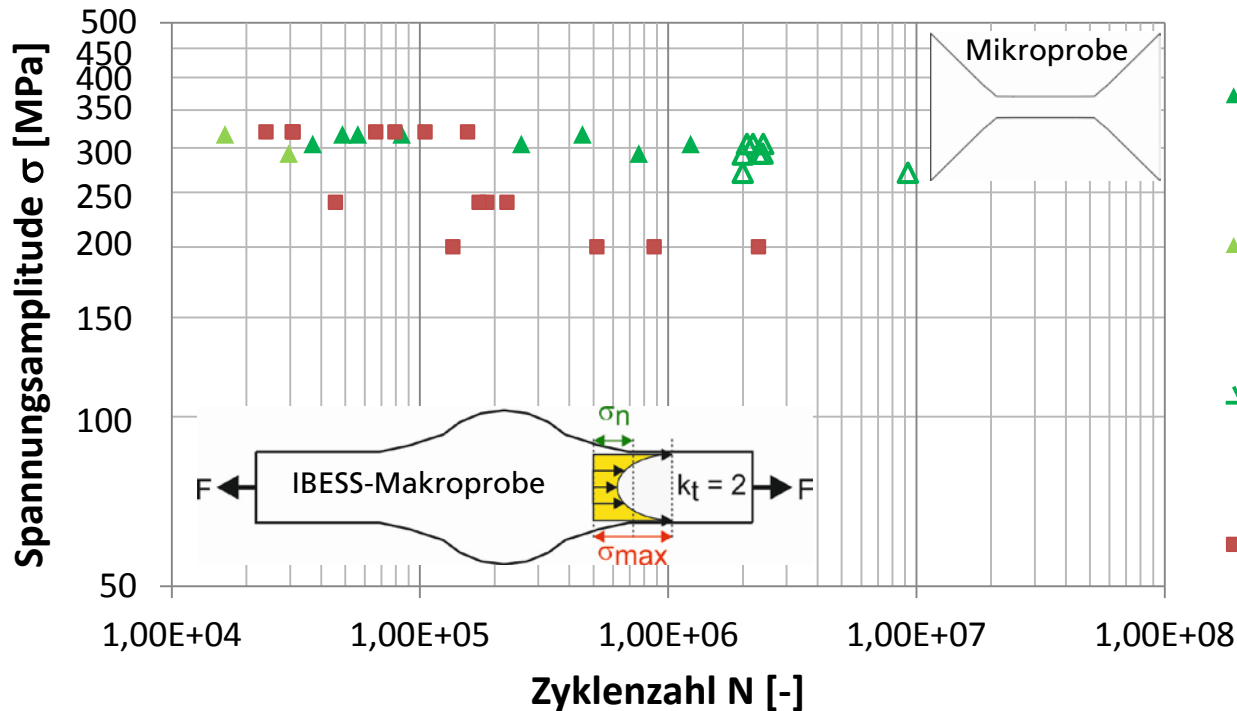
- ▲ Mikroproben:
 - ▲ Versagenskriterium erreicht, signifikanter Kraftabfall R = 0.1
 - ▲ Versagenskriterium erreicht, signifikanter Kraftabfall (kurze Überlast von ca. 5 %) R = 0.1
 - ▾ Durchläufer R = 0.1
- IBESS-Makroproben:
 - (Anriss < 1mm) R = 0

➡ Mikroversuche weisen deutlich größere Streuung auf

➡ Nennspannungen der Makroversuche müssen für einen Vergleich korrigiert werden

Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen

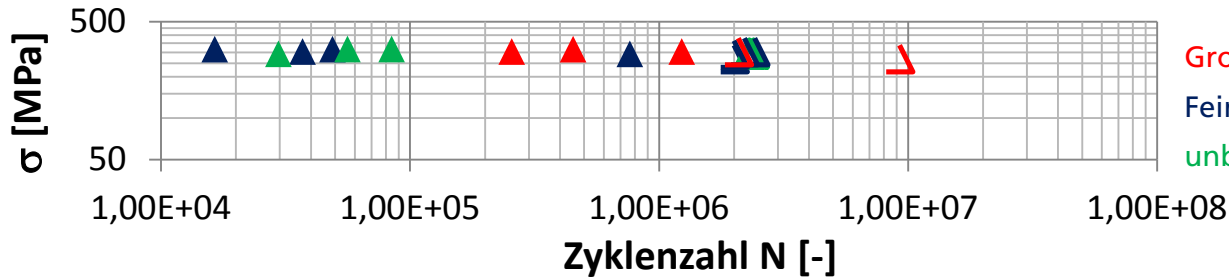
Vergleich: IWM-Mikroproben – IBESS-Makroproben (korrigiert)



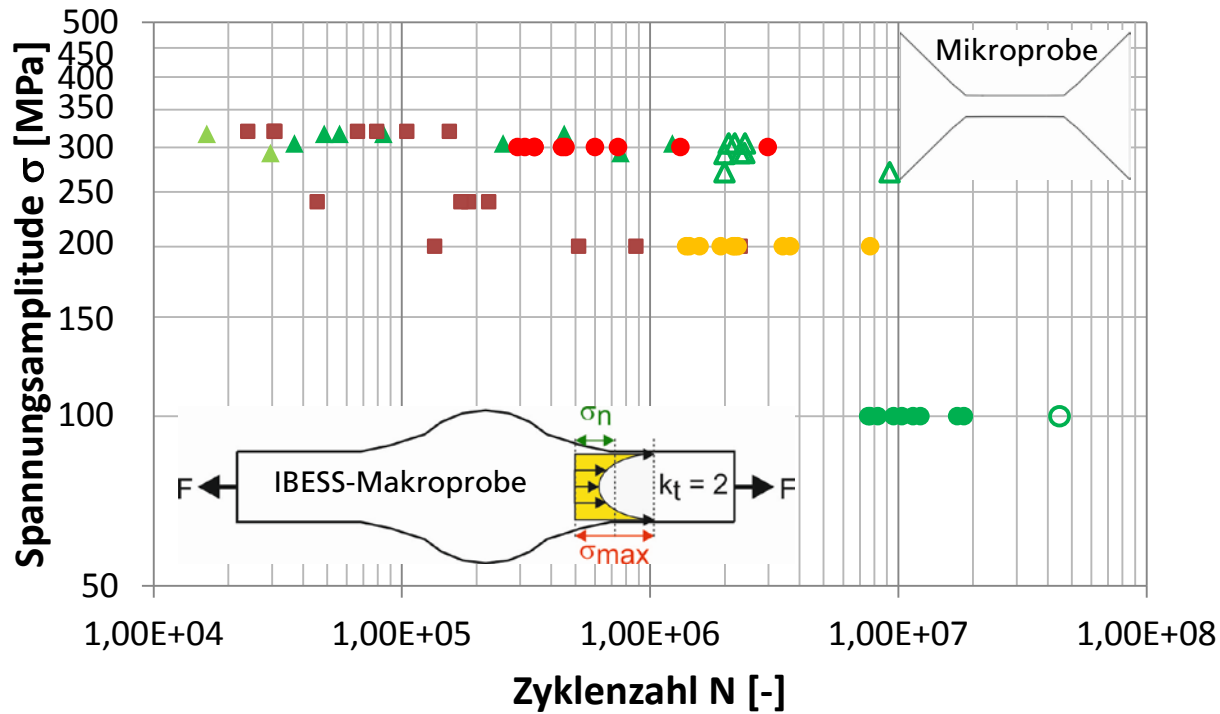
- ▲ Mikroproben:
Versagenskriterium erreicht,
signifikanter Kraftabfall: $R = 0.1$
- ▲ Mikroproben:
Versagenskriterium erreicht,
signifikanter Kraftabfall
(kurze Überlast von ca. 5 %): $R = 0.1$
- ▽ Mikroproben:
Durchläufer: $R = 0.1$
- IBESS-Makroproben (Anriss < 1mm): $R = 0$
Kerbwirkung korrigiert mit $k_t = 2$

Ermittlung der Anrisszyklenzahlverteilungen

Vergleich: Ermüdungsversuche - Simulationsrechnungen



Grobkorn bzw. überwiegend Grobkorn
 Feinkorn bzw. überwiegend Feinkorn
 unbekannt bzw. keine Zuordnung möglich



- ▲ Mikroproben:
 Versagenskriterium erreicht,
 signifikanter Kraftabfall: R = 0.1
- ▲ Versagenskriterium erreicht,
 signifikanter Kraftabfall
 (kurze Überlast von ca. 5 %): R = 0.1
- ▾ Durchläufer: R = 0.1
- IBESS-Makroproben (Anriss < 1mm): R = 0
 Kerbwirkung korrigiert mit $k_t = 2$
- Simulation:
 Anriss 50 μm / $\Delta\sigma = 300$ MPa / R = 0.1
- Simulation:
 Anriss 50 μm / $\Delta\sigma = 200$ MPa / R = 0.1
- Simulation:
 Anriss 50 μm / $\Delta\sigma = 100$ MPa / R = 0.1

Zusammenfassung

Schädigungsmechanische Modellierung der Rissentstehungsphase

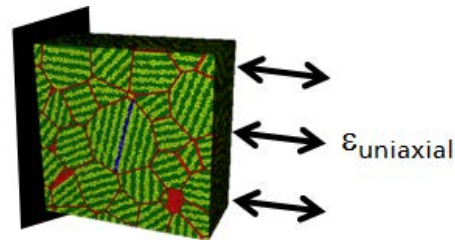
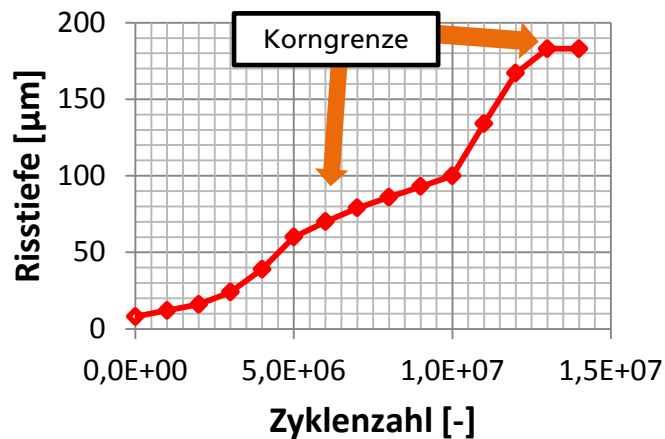
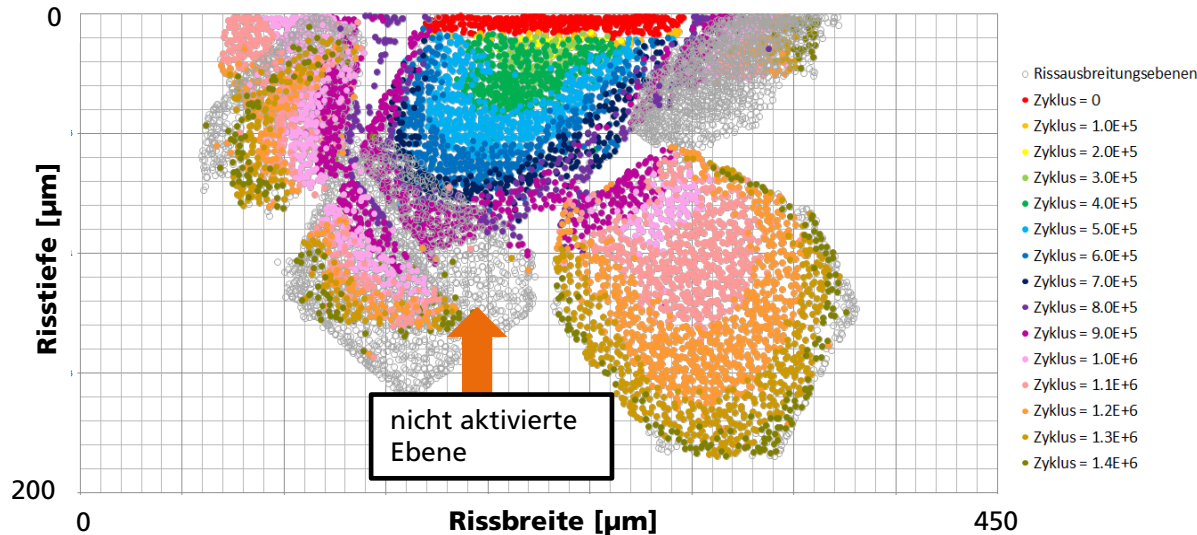
- zufallsgesteuert wurden 3D-Kornstrukturmodelle erzeugt
- Anfangsrisswachstum ausgehend von der Oberfläche wurde berechnet
- Mikrostruktur (zufällige Kornstruktur und Orientierung der Rissausbreitungsebenen) führt zur Streuung in den Zyklenzahlen
- Einfluss verschiedener Lasthorizonte kann abgebildet werden
- Modellanpassung erfolgte anhand von Ermüdungsversuchen an Mikroproben
- Ergebnisse der Mikro- und Makroermüdungsversuche sind nur bedingt miteinander vergleichbar



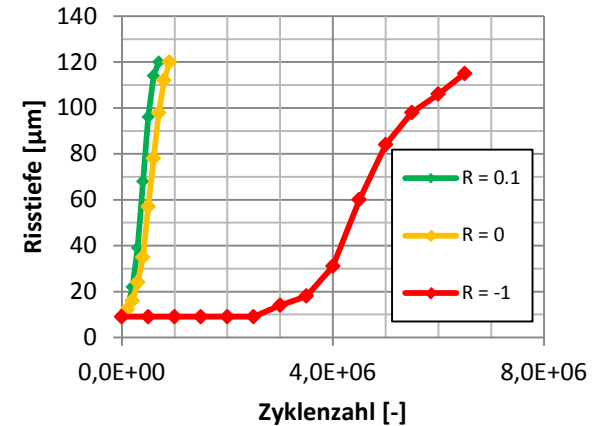
Zyklenzahlverteilungen für Anrisslängen als Eingangsgrößen für bruchmechanische Berechnungskonzepte können bestimmt werden

Ausblick

Risswachstum über Korngrenze



Risswachstum bei verschiedenen R-Verhältnissen



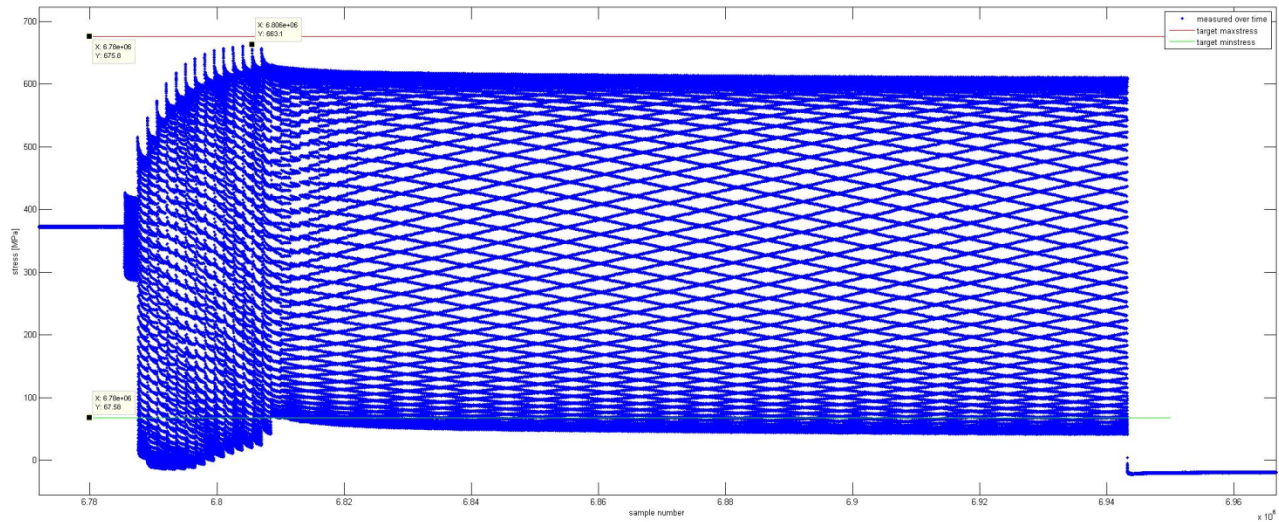
- Berechnung des Risswachstum über Korngrenze hinweg ist möglich
- Berechnungen mit verschiedenen R-Verhältnissen sind möglich

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

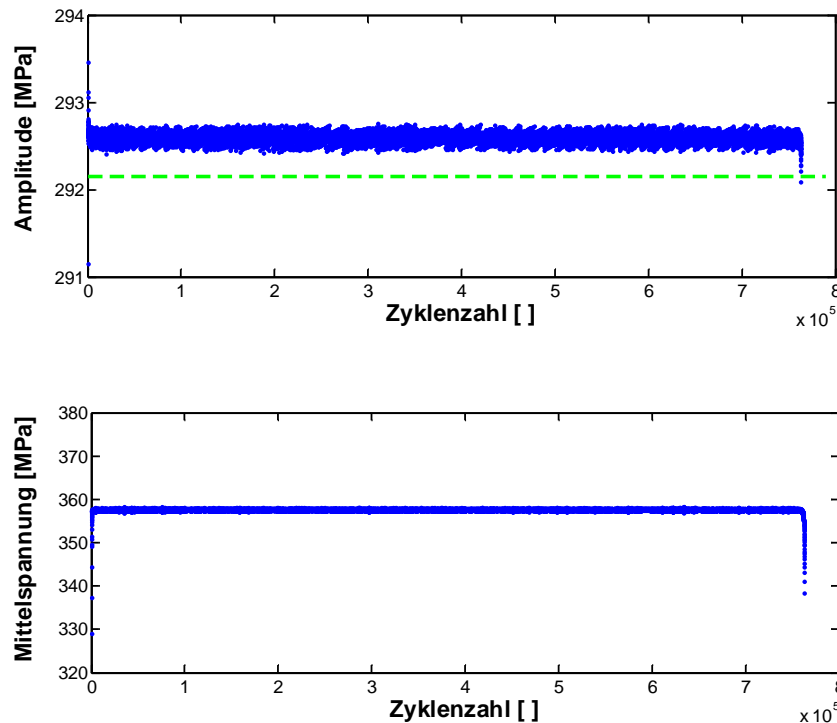
Dr. Carla Beckmann

carla.beckmann@iwm.fraunhofer.de

J46



J70



Hochaufgelöster Verlauf von Amplitude und Mittelspannung über die Zykluszahl am Beispiel der Probe J-70. Die grün gestrichelte Linie stellt das Abbruchkriterium dar – sobald die Amplitude mehr als 0,15% von ihrem Sollwert abweicht stoppt der Versuch. Der Abfall von Amplitude und Mittelspannung am Lebensdauerende entsteht durch einen schädigungsbedingten Steifigkeitsabfall der Probe, welcher durch die gewählten Regelparameter nicht mehr kompensiert werden kann.