

---

# Werkstoff- und Bauteilverhalten von Leichtbaustählen unter komplexen Belastungen bei hohen Dehnraten

---

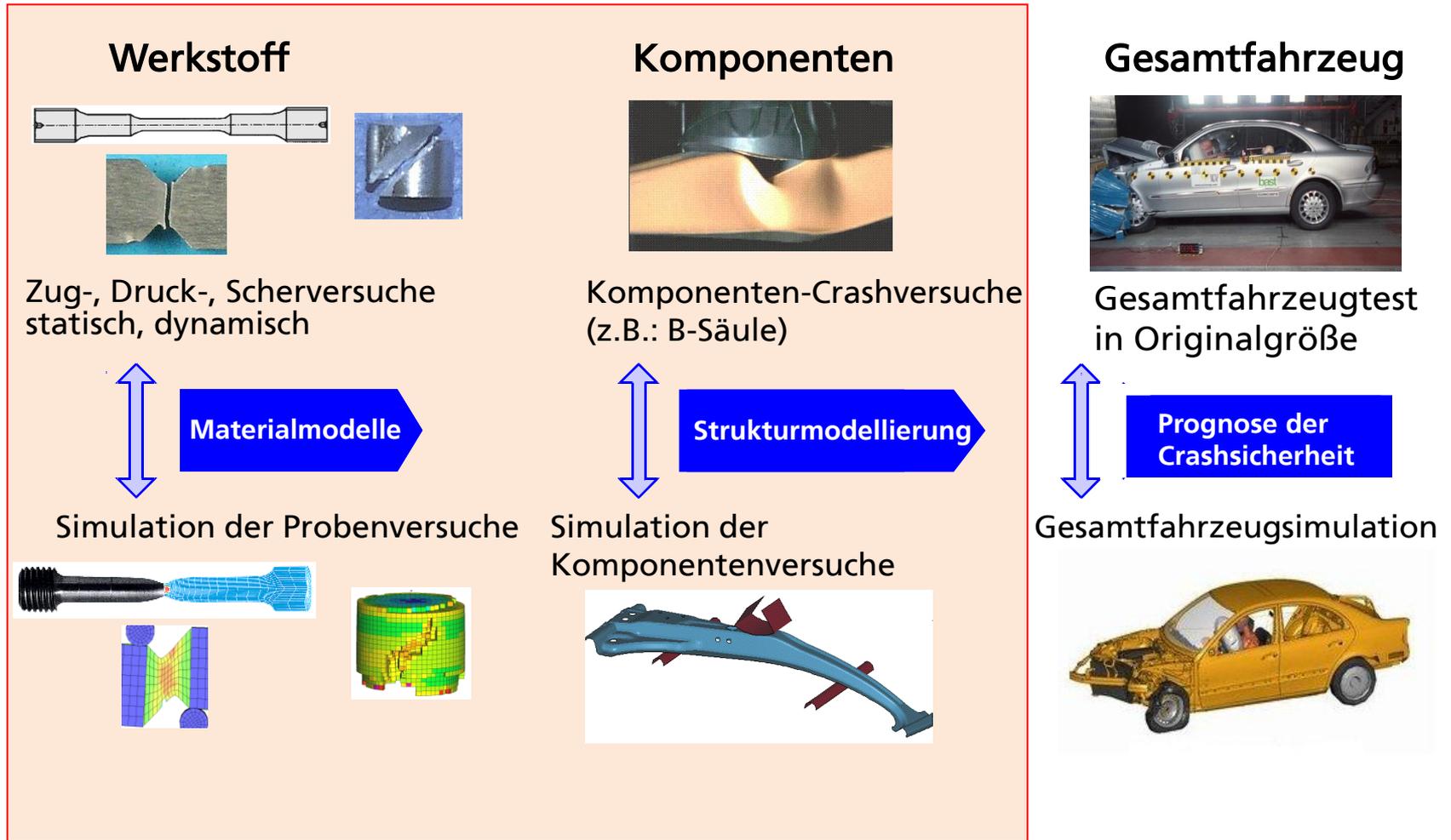
Michael Luke  
Silke Klitschke  
Andreas Trondl  
Frank Huberth

27. TestXpo 2018  
Zwick / Roell  
15.-18.10.2018, Ulm

# Inhalt

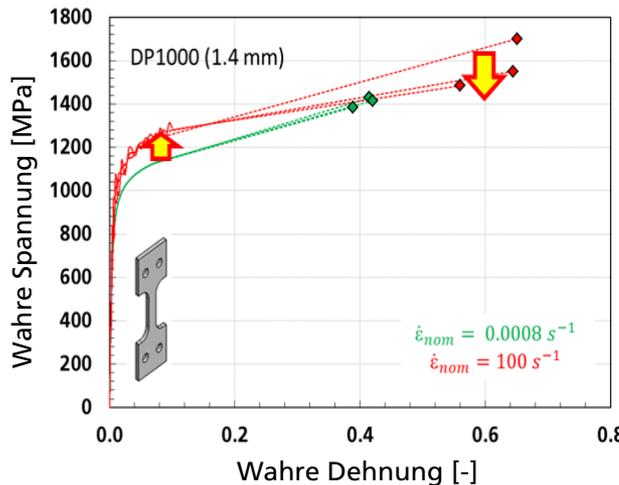
- Hintergrund und Ziel, Einleitung
- Versuchs- und Messtechnik für die Werkstoffcharakterisierung von hochfesten Karosserieblechwerkstoffen
  - bei hohen Dehnraten und
  - mehrachsigen Spannungszuständen
- Experimentell ermittelte Werkstoffdaten für die Simulation
- Modellierung
  - Verformungsverhalten in Abhängigkeit der Dehnrates
  - Versagensverhalten in Abhängigkeit vom Spannungszustand und der Dehnrates
- Modellvalidierung mit dynamischen Profilstauchversuchen
- Zusammenfassung

# Stufenweise Entwicklung der Crash-Sicherheit

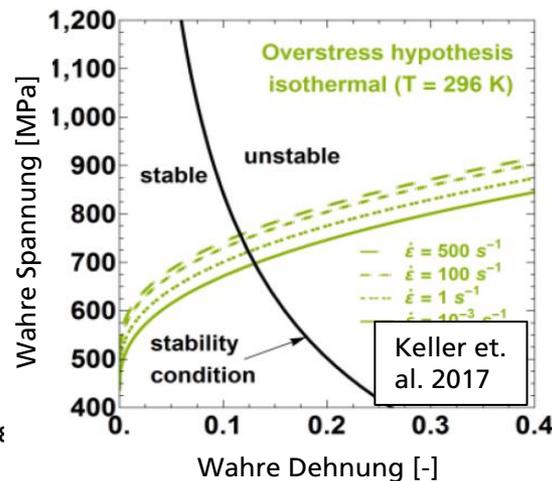


# Einfluss der Dehnrates auf Verformung und Versagen hochfester Karosserieblechwerkstoffe

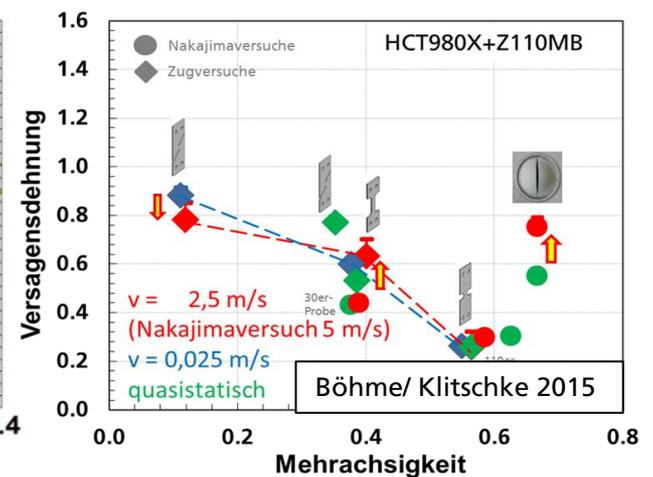
Einfluss der Dehnrates auf das Verformungsverhalten:



Einfluss der Dehnrates auf den Instabilitätsbeginn:



Einfluss der Dehnrates auf das Versagensverhalten:



mit zunehmender Dehnrates:

- Dehnratesverfestigung
- adiabatische Entfestigung

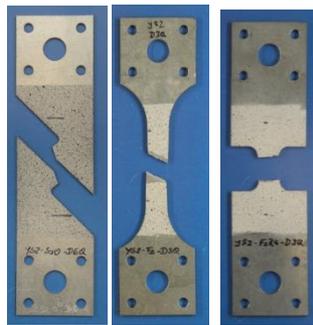
Instabilitätsbeginn bei kleineren Dehnungen

größere oder kleinere Versagensdehnung abhängig vom Spannungszustand

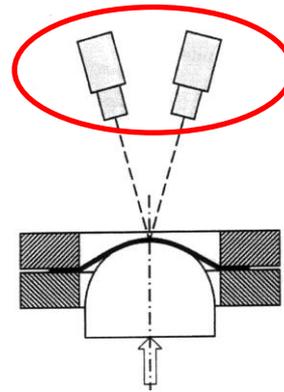
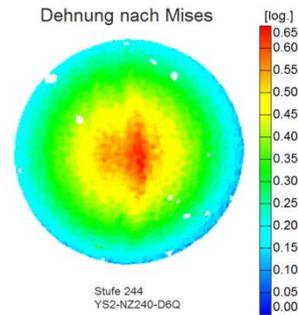
➔ Berücksichtigung von Dehnrates und Spannungszustand in der Versagensmodellierung

# Prüf- und Messtechnik für Probenversuche bei hohen Dehnraten und mehrachsigen Spannungszuständen

- Servohydraulische Schnellzerreißmaschine (500 kN / 10 m/s)
- Umformeinrichtung für Nakajimaversuche nach DIN EN ISO 12004
- 2 Hochgeschwindigkeits-Videokameras für 3D-DIC (digital image correlation)



$v = 6,25 \text{ m/s}$      $\dot{\epsilon} = 250 \text{ s}^{-1}$   
 $v = 2,5 \text{ m/s}$      $\dot{\epsilon} = 100 \text{ s}^{-1}$   
 $v = 0,025 \text{ m/s}$      $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$   
 $v = 0,02 \text{ mm/s}$      $\dot{\epsilon} = 0,0008 \text{ s}^{-1}$



$v = 0,0015 \text{ m/s}$



$v = 5 \text{ m/s}$

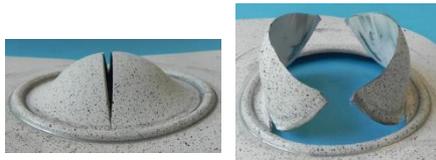
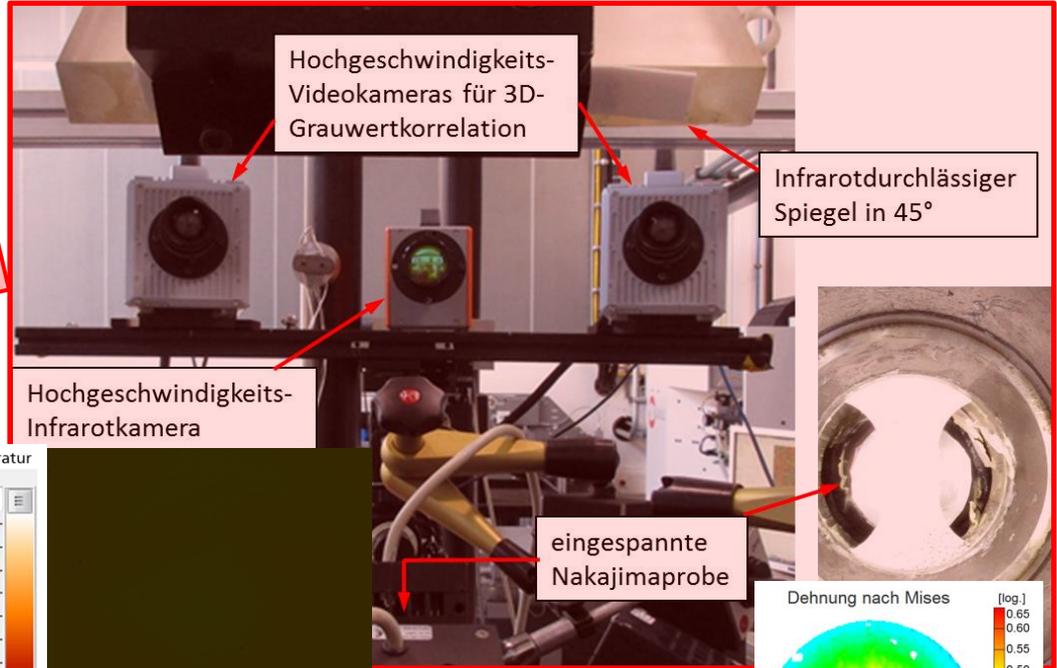


Nakajima-Durchstoßstempel

# Hochgeschwindigkeits-Infrarotmessungen für Nakajima- versuche an hochfesten Blechwerkstoffen bis 5 m/s

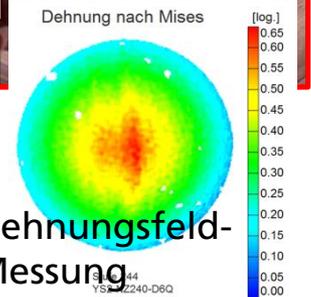
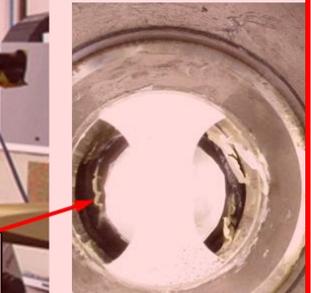
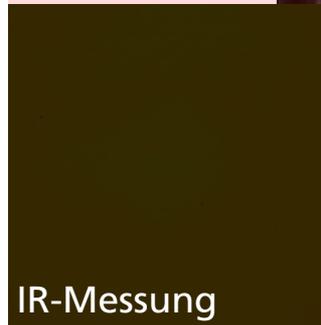
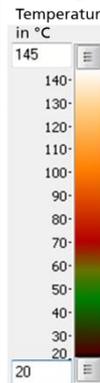
Schnellzerreissmaschine (500 kN/10 m/s)  
mit Umformeinrichtung:

Hochgeschwindigkeits-3D-Videoaufnahmen und  
Infrarotmessung über 45° Umlenkspiegel:



$v = 0,0015 \text{ m/s}$

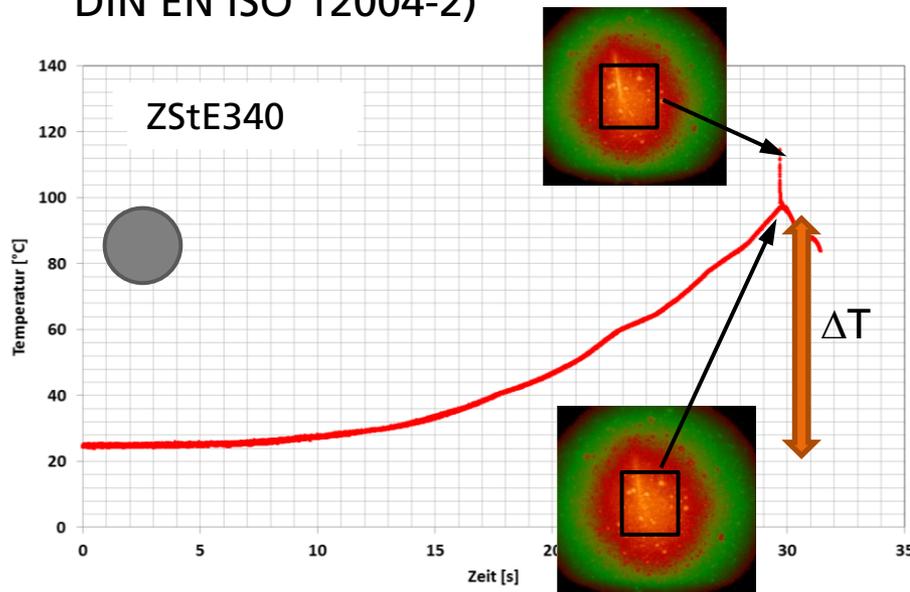
$v = 5 \text{ m/s}$



# Adiabatische Temperaturerhöhung bei Nakajimaversuchen ZStE340, $v = 1,5 \text{ mm/s}$ und $5 \text{ m/s}$

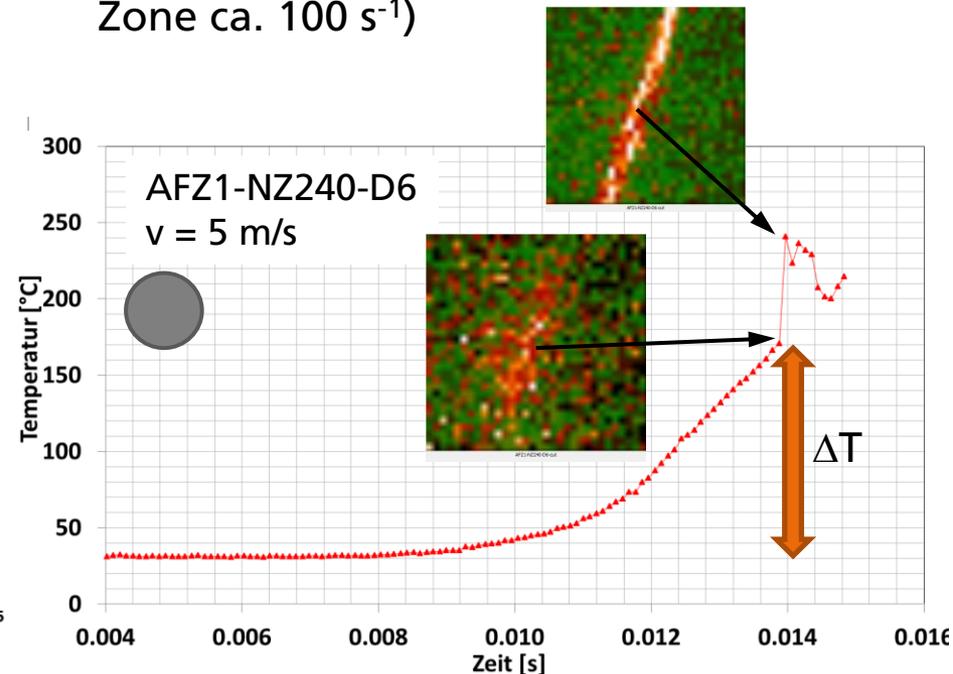
$v = 1,5 \text{ mm/s}$

(Prüfgeschwindigkeit zur Bestimmung  
der Grenzformänderungskurve nach  
DIN EN ISO 12004-2)



$v = 5 \text{ m/s}$

(lokale Dehnrates in der hochverformten  
Zone ca.  $100 \text{ s}^{-1}$ )



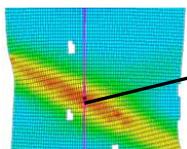
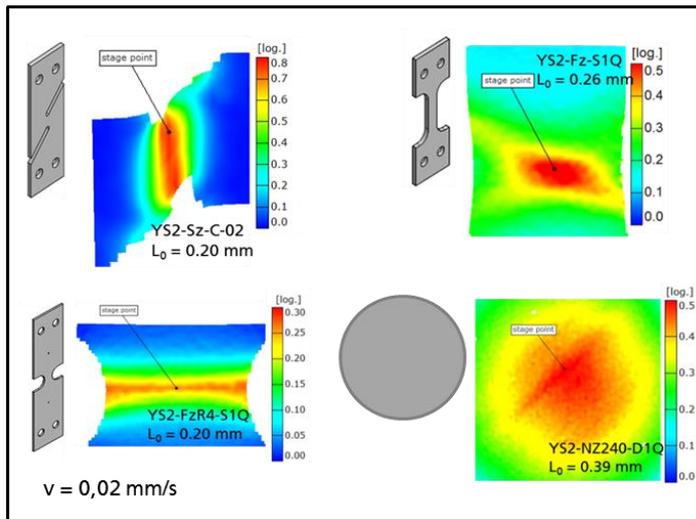
gemessene maximale Temperaturerhöhung in der hochverformten Zone kurz vor Bruch: **70 K**

gemessene maximale Temperaturerhöhung in der hochverformten Zone kurz vor Bruch: **140 K**

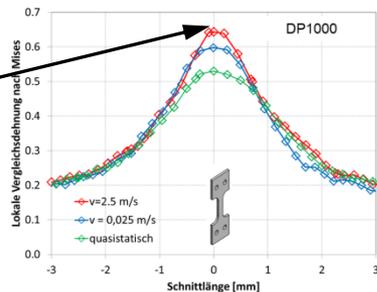
# Einfluss der Dehnrates auf das Werkstoffverhalten unter mehrachsiger Belastung

## Versagensdehnungen aus Grauwertkorrelation (DIC)

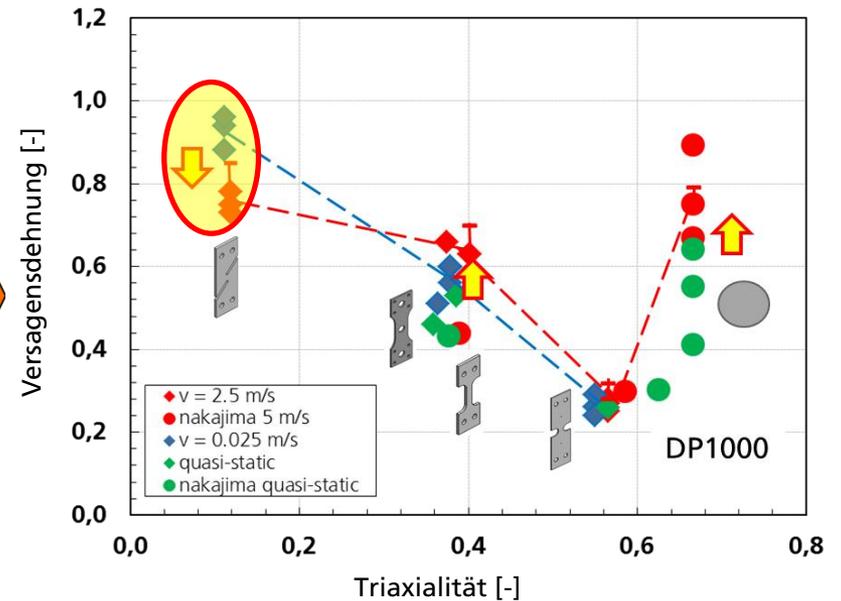
DP1000: Dehnungsfelder aus DIC kurz vor Bruch



Auswertung eines Punktes mit maximaler Dehnung vor Bruch



Experimentell ermittelte Versagensdehnungen:



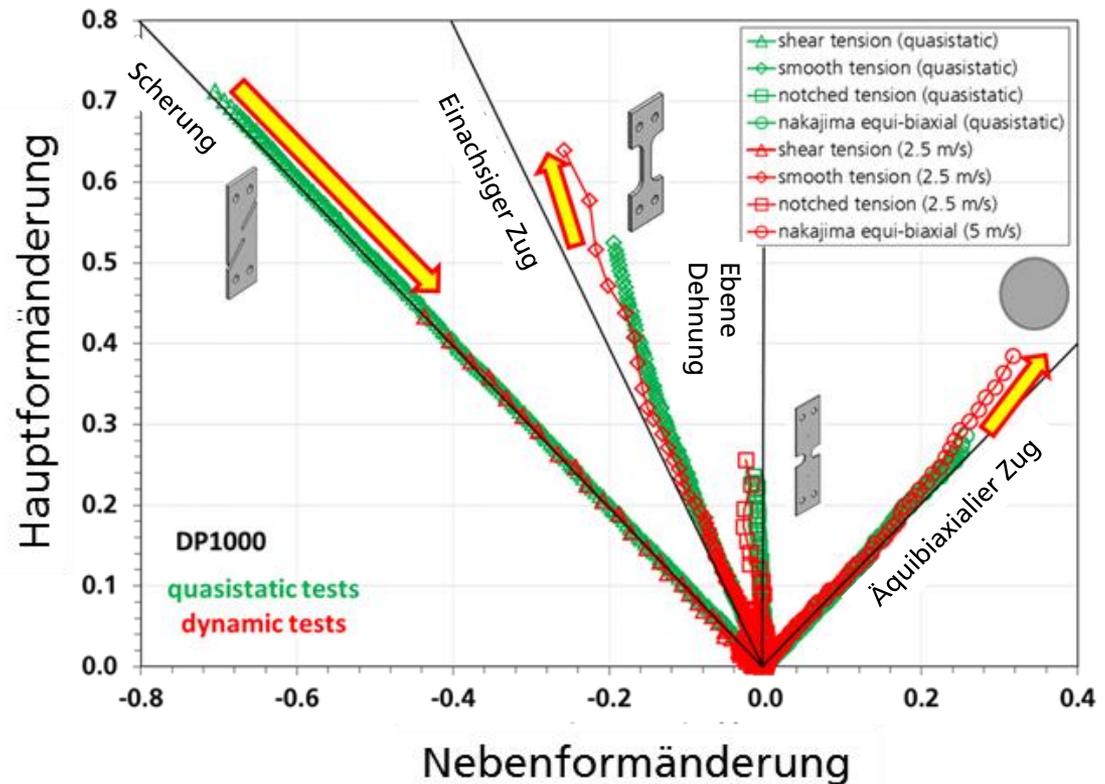
↑ Dehnrateneinfluss auf die Versagensdehnung

Anmerkung: Triaxialität (Spannungsmehrachsigkeit) aus FE-Simulation

# Einfluss der Dehnrates auf das Werkstoffverhalten unter mehrachsiger Belastung

## Dehnungspfade bis Versagen

Auswertung der zeitlichen Entwicklung der Haupt- und Nebenformänderung bis zum Bruch für einen Punkt mit maximaler Dehnung vor Bruch:

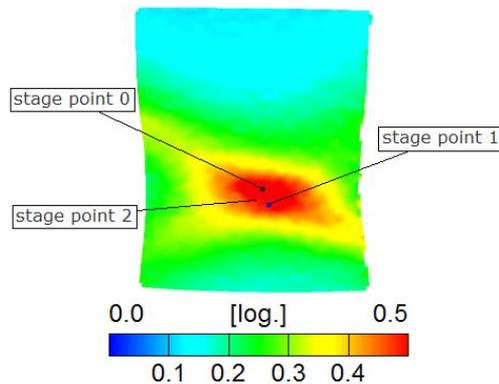


Dehnrateneinfluss auf die Versagensdehnung

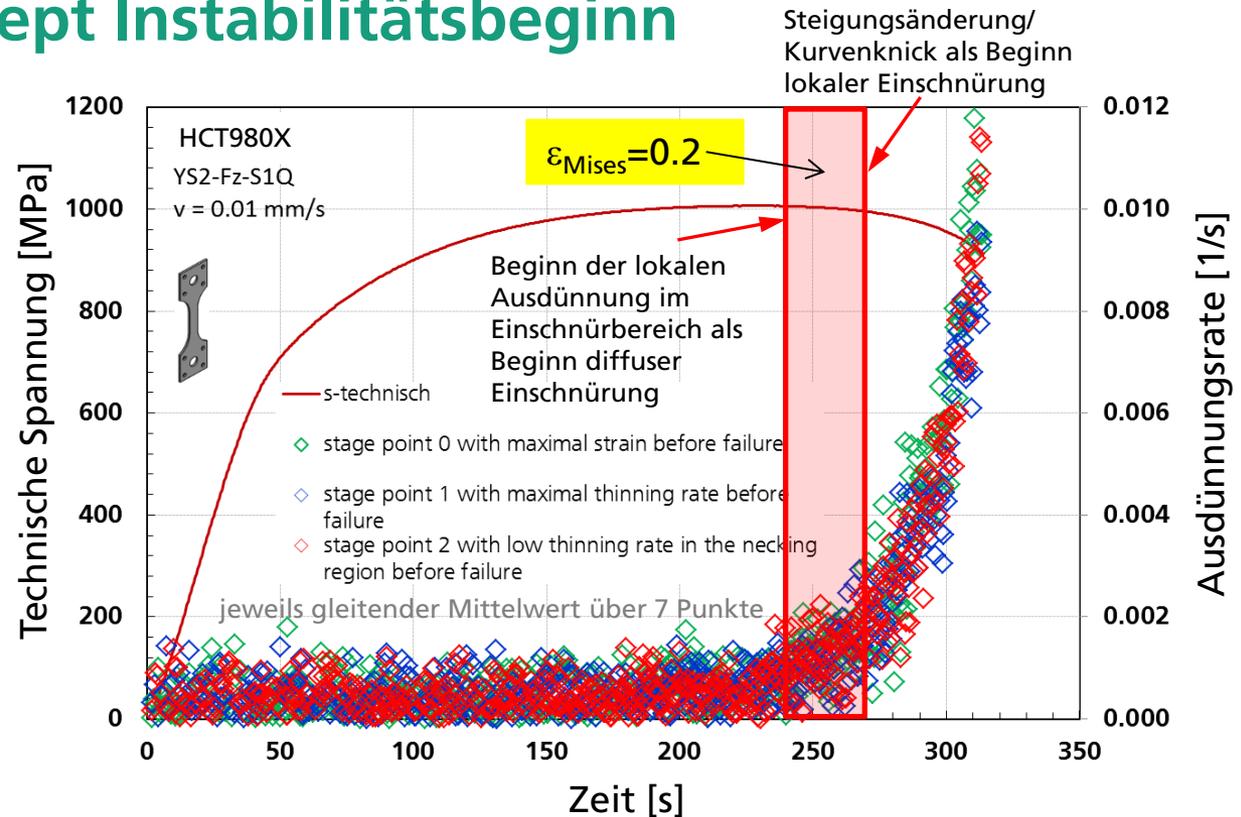
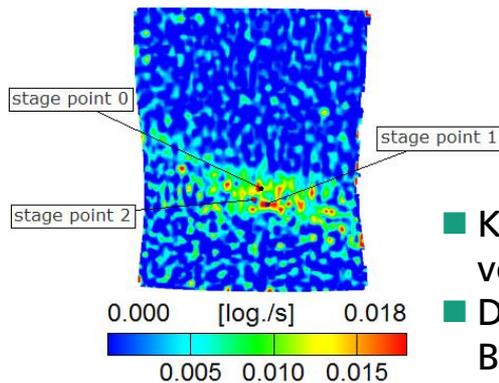
# Einfluss der Dehnrates auf das Werkstoffverhalten unter mehrachsiger Belastung

## Auswertungskonzept Instabilitätsbeginn

v. Mises Vergleichsdehnung  
(letztes Bild vor Bruch):



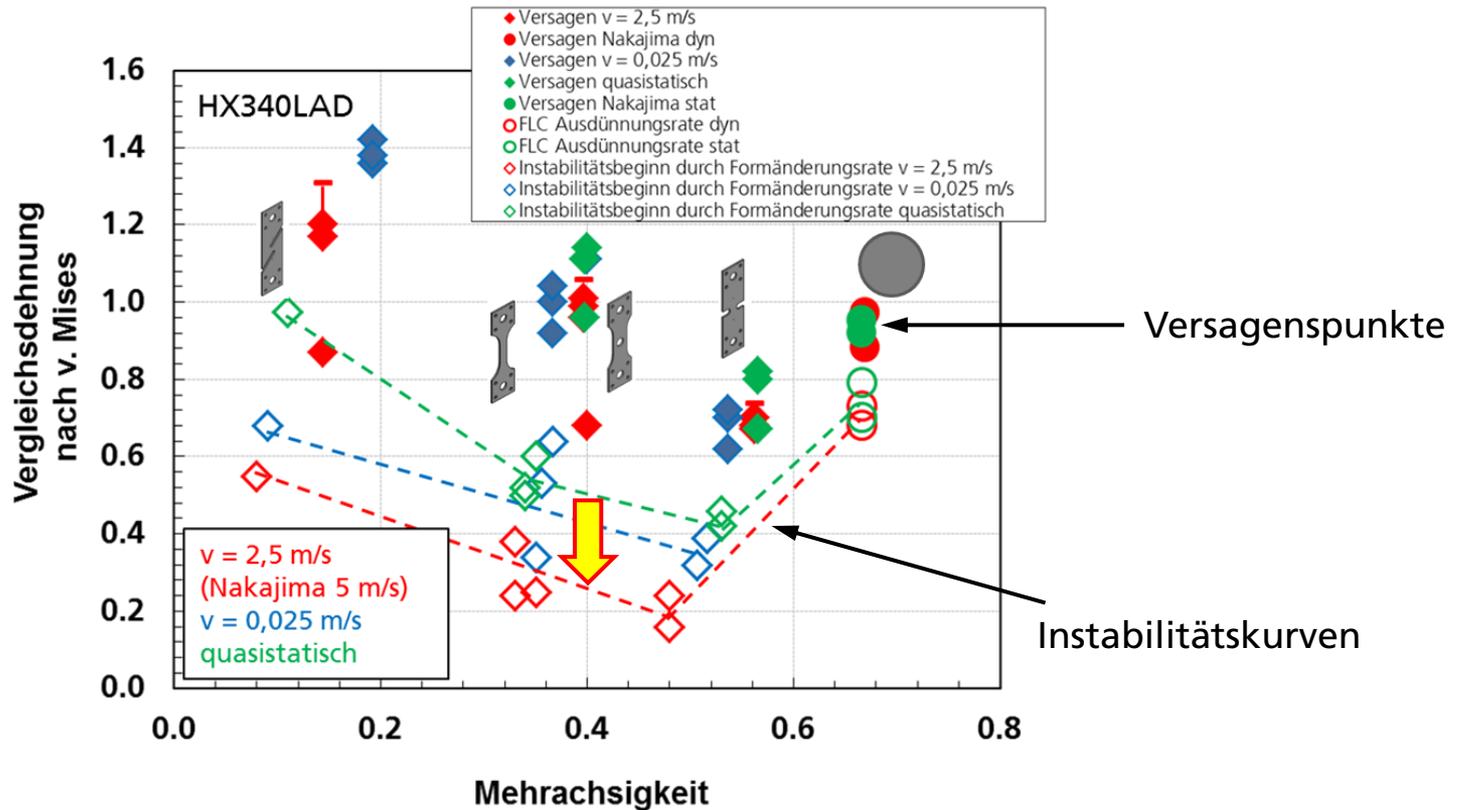
Ausdünnungsrate  
(letztes Bild vor Bruch):



- Kurvenverlauf für verschiedene Stufenpunkte im Einschnürbereich vergleichbar
- Dehnung zum Zeitpunkt der Steigungsänderung/Kurvenknick wird als Beginn lokaler Einschnürung und damit Instabilitätsbeginn ausgewertet

# Einfluss der Dehnrate auf das Werkstoffverhalten unter mehrachsiger Belastung

## Einfluss der Dehnrate auf den Instabilitätsbeginn



unter dynamischer Belastung tendenziell kleinere Werte für Dehnungen bei Instabilitätsbeginn als unter statischer Belastung

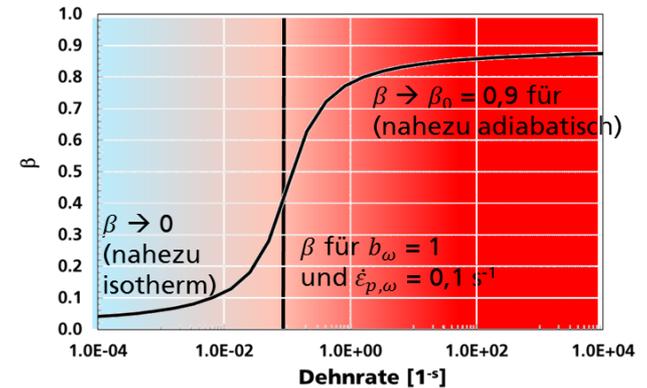
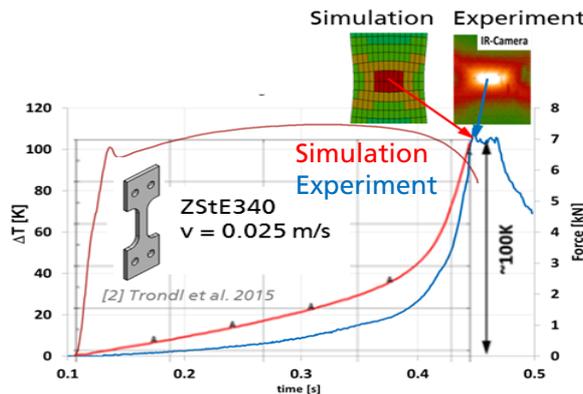
# FE-Simulation: Berücksichtigung Einflüsse von Dehnrates und Spannungszustand auf das Werkstoffverhalten

## Adiab. Erwärmung (MAT\_TABULATED\_JOHNSON\_COOK)

- Vermeidung thermomechanisch gekoppelter Simulation durch Pseudothermomechanisches Materialmodell
- Isotropes thermo-viskoplastisches Materialmodell mit Berücksichtigung der adiabatischen Erwärmung in Abhängigkeit der Dehnrates (LS-Dyna, MAT\_224)

- Johnson-Cook-Ansatz:  $\sigma = s(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p) \cdot g(T)$   
 mit  $s(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p)$ : isotherme Fließkurven  
 $g(T)$ : Entfestigungsfunktion

- Temperaturberechnung:  $\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} = \beta(\dot{\varepsilon}_{pl}) \frac{\sigma \dot{\varepsilon}}{\rho c_p}$



$b_\omega$  - Breite des Übergangsbereichs  
 $\dot{\varepsilon}_{p,\omega}$  - "Übergangsdehnrates"

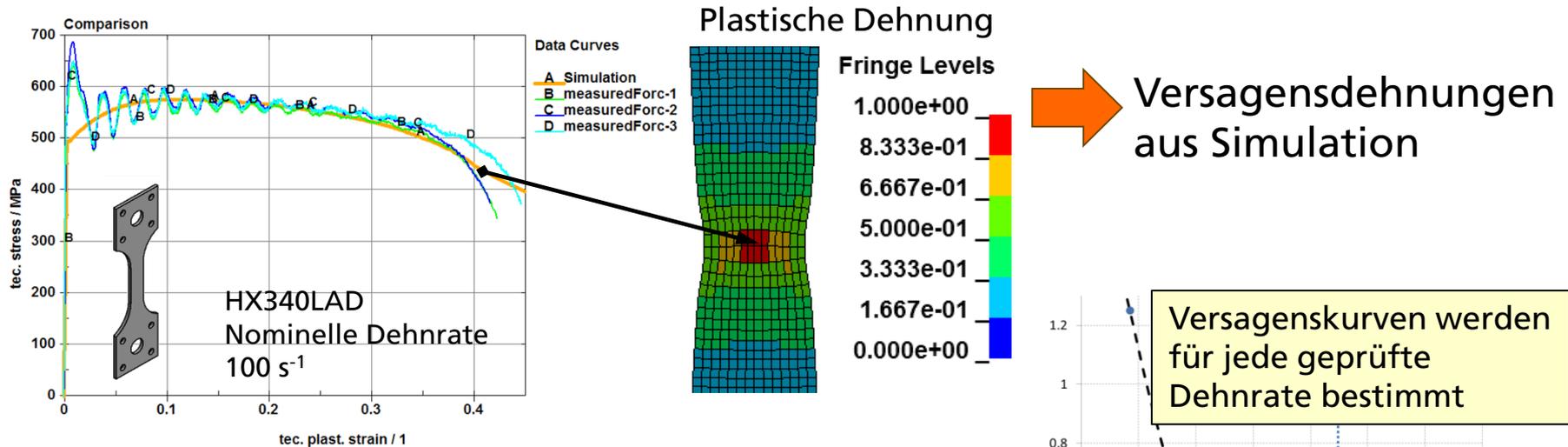


- nicht-isothermer Dehnratesbereich: gute Vorhersage des Werkstoffverhaltens für einachsige Zugbelastung
- Einfluss des Spannungszustandes auf die adiabatische Entfestigung wird in Zukunft berücksichtigt

# FE-Simulation: Berücksichtigung Einflüsse von Dehnrates und Spannungszustand auf das Werkstoffverhalten

## Versagen, Schädigung (MAT\_ADD\_EROSION, GISSMO)

### 1. Simulation der Probenversuche



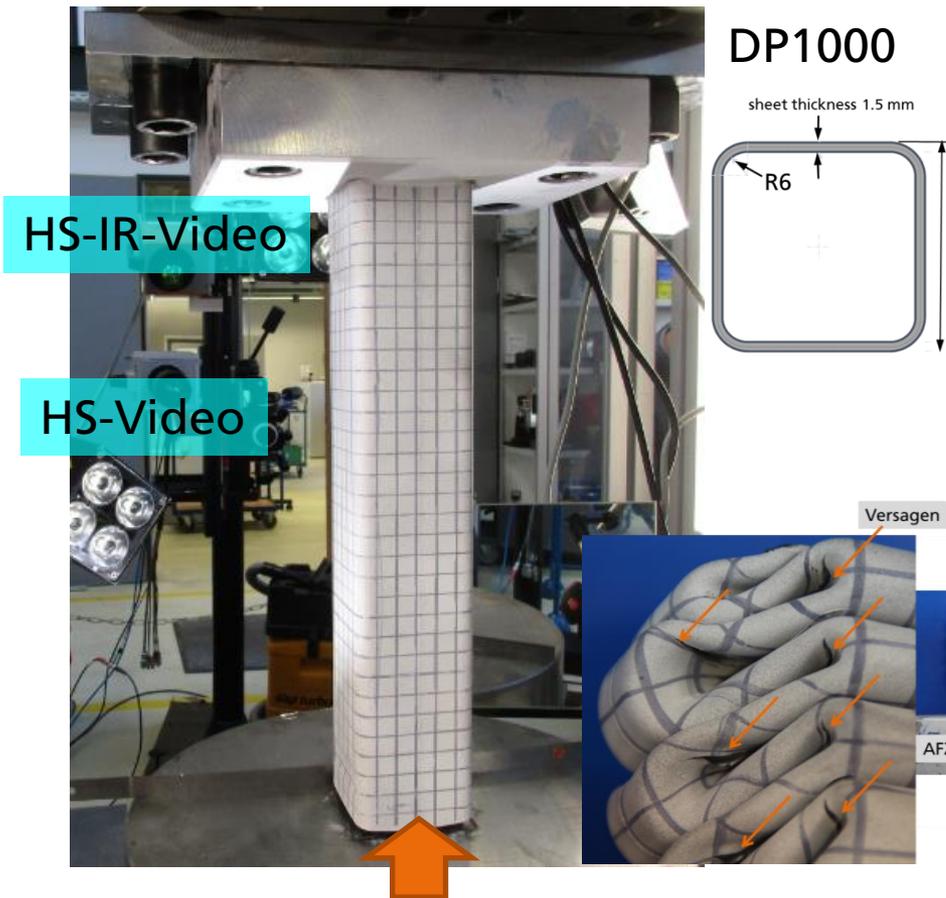
### 2. Kurve der Versagensdehnungen

Zwei Spline-Interpolationen mit Stützpunkten für zwei Schädigungsbereiche der Versagenkurve (Scherbruch und Wabenbruch)

Anmerkung: Gissmo = Generalized Incremental Stress State dependent damage model (Haufe et. al. 2011)

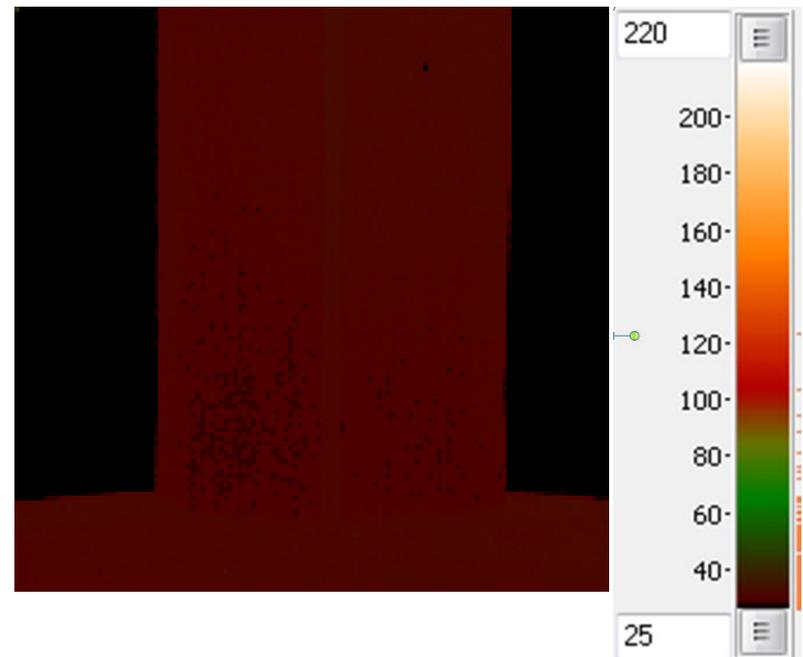
# Modellvalidierung

## Dynamische Bauteilstauchversuche ( $v = 5 \text{ m/s}$ )



Hochgeschwindigkeits-  
Infrarotmessung

Temperatur  
in °C

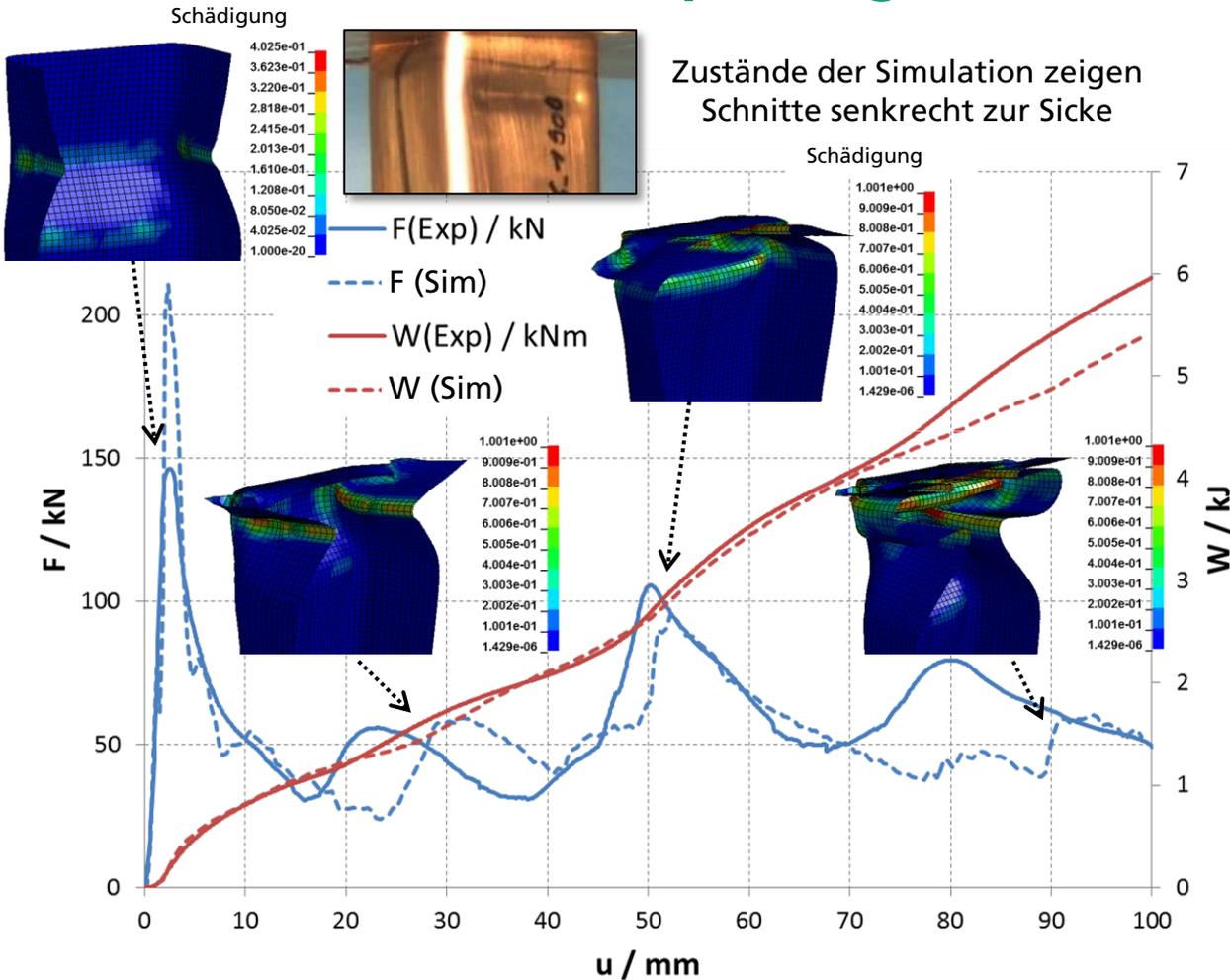


Messung der  
Temperaturentwicklung

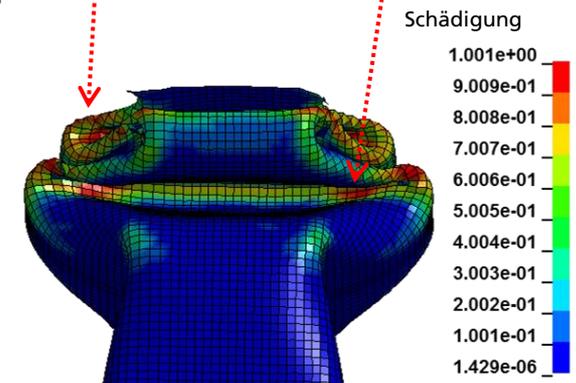
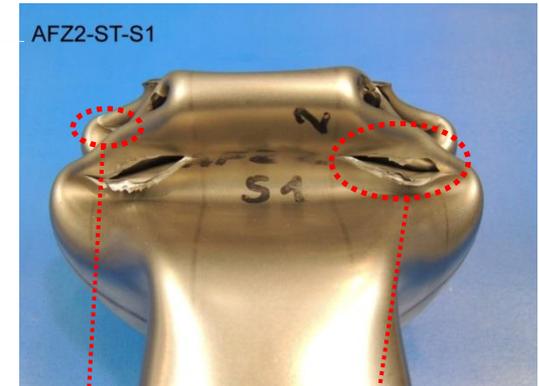
Messung des Kraft-Verformungsverhaltens

# Komponententest und Simulation

## HCT980X, Kraft-Stempelweg, lokale Schädigung, statisch



Schädigung

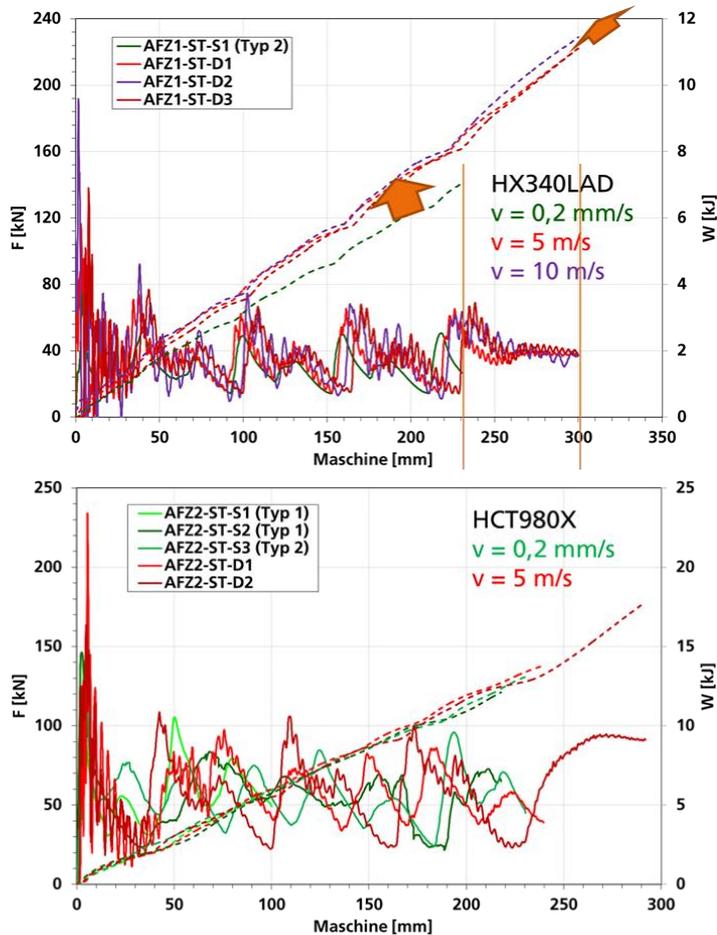


Gute Übereinstimmung der  
Risseorte zum Experiment

# Modellvalidierung

## Energieabsorption des dynamisch belasteten Stauchprofils

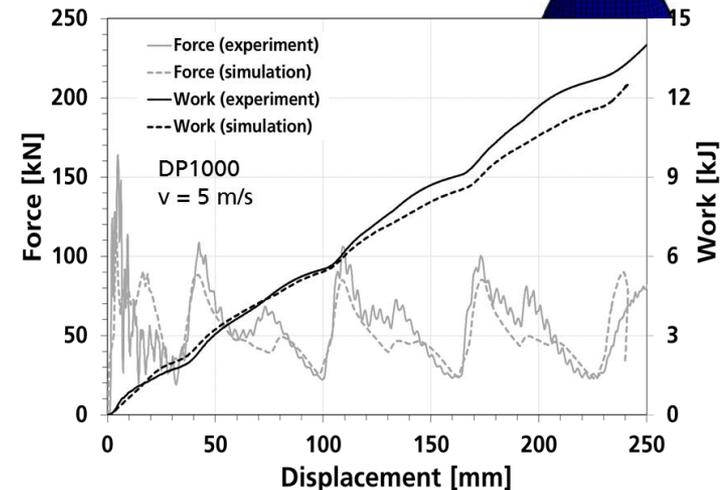
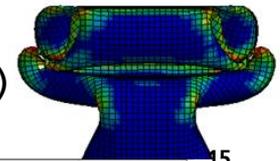
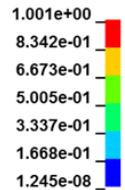
### Experiment



### Simulation

- Beispiel für
- MAT\_224 (mit adiabatischer Entfestigung)
  - GISSMO mit Dehnrateneinfluss
  - Berücksichtigung der Umformhistorie (Vordehnungen)

### Schädigung



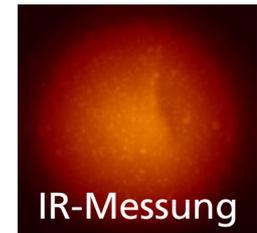
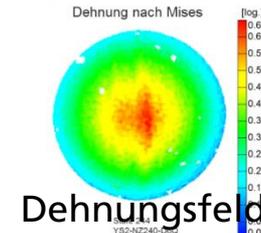
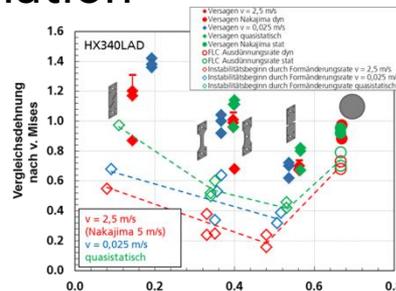
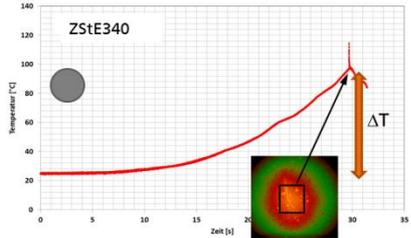
unter dynamischer Belastung werkstoffabhängig höhere Energieabsorption als unter statischer Belastung!

# Zusammenfassung

- Durchführung von Probenversuchen bei mehrachsigen Belastungen und hohen Dehnraten

- Dehnungs- und Temperaturfeldaufnahmen

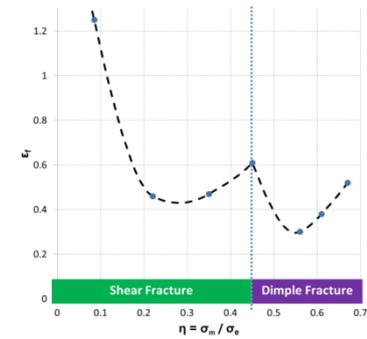
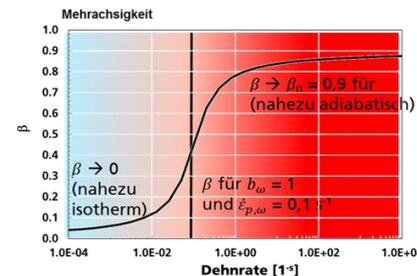
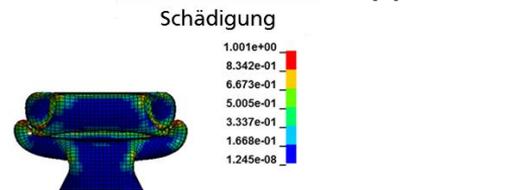
- Werkstoffdaten für die Simulation



- Modellierung

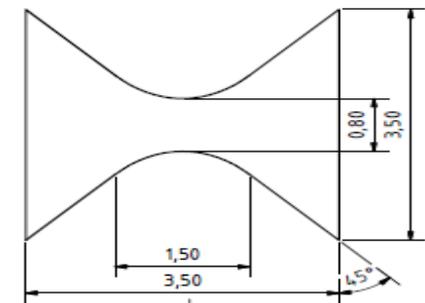
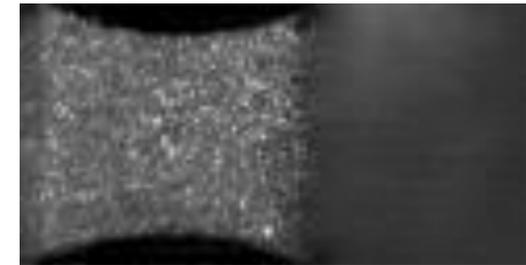
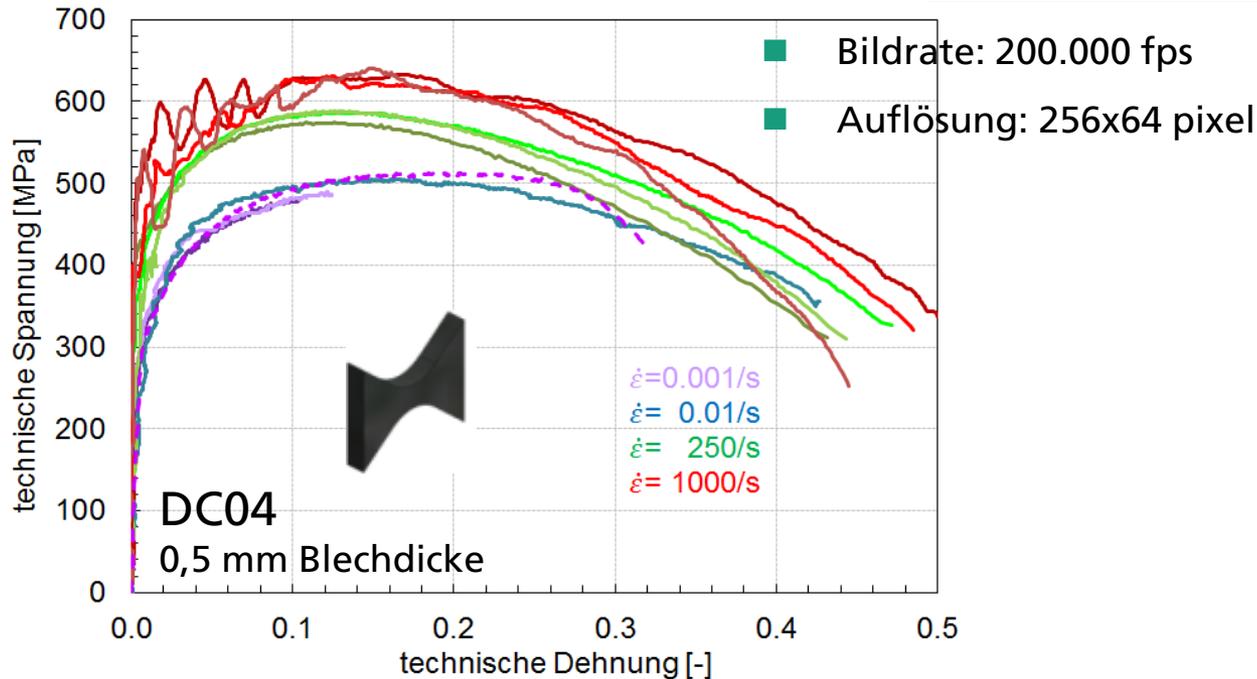
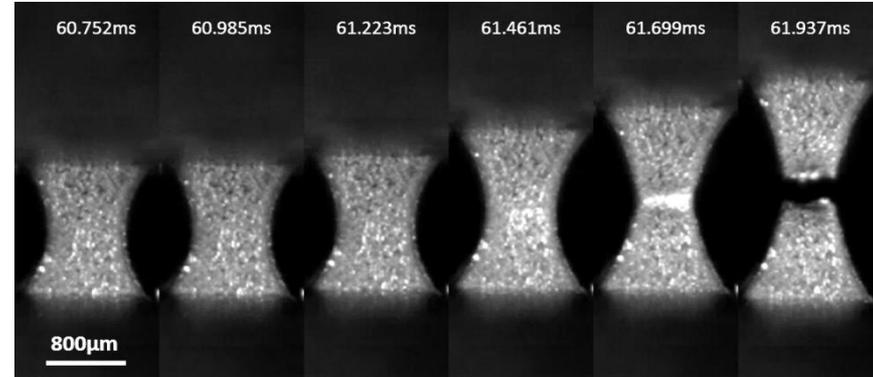
- Johnson-Cook-Modell
- Gismo-Versagensmodell

- Modellvalidierung



# Ausblick: Mikroversuche über 5 Dehnratendekaden

- Prüfgeschwindigkeit: 1 m/s
- Beschleunigung: 50 m/s<sup>2</sup>
- Bildrate: 300.000 fps



Probengeometrie

# Danksagung

Die Arbeiten wurden finanziert von der "Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen" durch die "Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e.V. (AVIF)" und die Forschungsvereinigung Stahlanwendung (FOSTA), die "Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT)" sowie zahlreiche Partner aus der Industrie.



Forschungsvereinigung  
Stahlanwendung e. V.



Forschungsvereinigung  
Automobiltechnik



DAIMLER



PORSCHE



Vorsprung durch Technik

Audi



[silke.klitschke@iwm.fraunhofer.de](mailto:silke.klitschke@iwm.fraunhofer.de)