

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Zusammenhänge zwischen werkstoffbedingten Skalierungseffekten und der spezifischen Schnittkraft

Dipl.-Ing. Norman Herzig
a.o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Bleicher
Prof. Dr.-Ing. L.W. Meyer
Dr.-Ing. T. Halle

LWM

Werkstoffe des Maschinenbaus



1. Einleitung und Motivation
2. Werkstoffe und Methoden
3. Größeneinflüsse beim Fließverhalten
4. Gibt es einen Zusammenhang zwischen dynamischem Materialverhalten und spezifischer Schnittkraft
5. Zusammenfassung und Ausblick

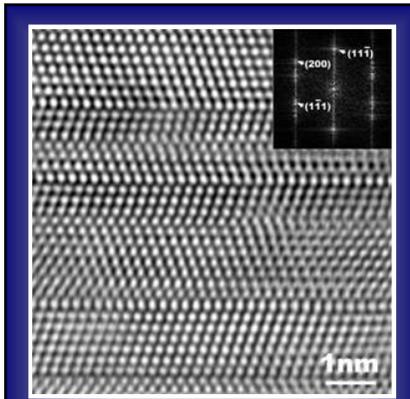


1. Einleitung und Motivation
2. Werkstoffe und Methoden
3. Größeneinflüsse beim Fließverhalten
4. Gibt es einen Zusammenhang zwischen dynamischem Materialverhalten und spezifischer Schnittkraft
5. Zusammenfassung und Ausblick



Zeitskala

Berücksichtigung einzelner Gitterdefekte



Nanoebene

Berücksichtigung von Versetzungsstrukturen, Subkörnern und einkristallinem Werkstoffverhalten



Mikroebene



Mikrostruktur (Korngröße)

Längenskala

⇒ Was wird im Projekt unter Skalierung verstanden ?

- Veränderung charakteristischer Abmessungen (makroskopisch /mikroskopisch) des im Prozess untersuchten Probenwerkstoffes (geometrisch ähnlich und nicht ähnlich)
- alle Versuchsrandbedingungen (Temperatur, Dehnrage, ...) bleiben konstant

⇒ Wie wird im Projekt der Begriff Größeneffekt definiert ?

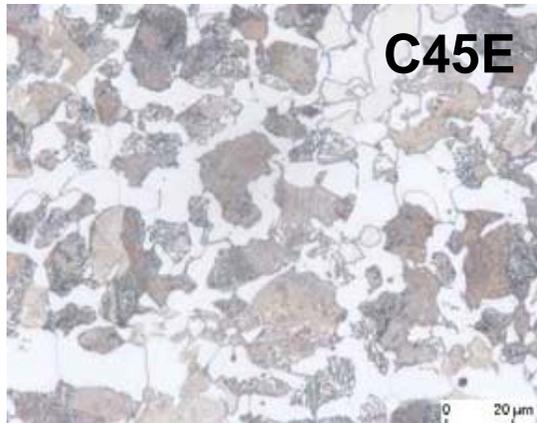
- Veränderung der gemessenen Prozesscharakteristika (Spannungen, Verformungen, ...) infolge der Skalierung

⇒ Was wurde skaliert ?

- Probengröße (geometrisch ähnlich)
- Probengeometrie (keine geometrische Ähnlichkeit)
- Korngröße



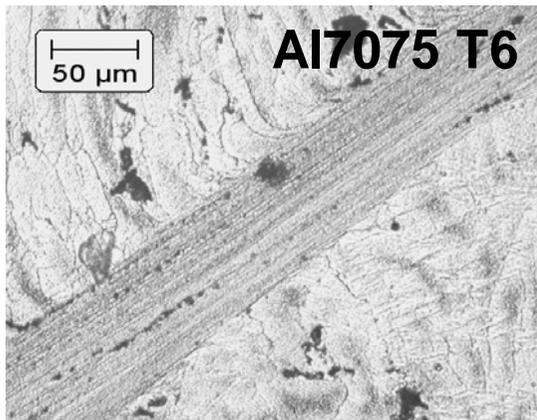
1. Einleitung und Motivation
- 2. Werkstoffe und Methoden**
3. Größeneinflüsse beim Fließverhalten
4. Gibt es einen Zusammenhang zwischen dynamischem Materialverhalten und spezifischer Schnittkraft
5. Zusammenfassung und Ausblick



| | | | |
|----------|-----------|-----------|-----------|
| C | Si | Mn | P |
| 0.45 | 0.26 | 0.6 | 0.008 |
| S | Cr | Mo | Ni |
| 0.029 | 0.07 | 0.03 | 0.08 |
| N | Al | Co | Sn |
| 0.009 | 0.025 | 0.18 | 0.01 |

C45E

- krz ferritisch-perlitische Mikrostruktur
- verschiedene Wärmebehandlungszustände
- 0,45% Kohlenstoff



| | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Zn | Mg | Cu | Fe | Si |
| 5.6 | 2.45 | 1.6 | 0.5 | 0.4 |
| Mn | Ti | Cr | | Zr |
| 0.3 | 0.2 | 0.23 | | 0.05 |

Al7075 T6

- kfz Werkstoff
- lösungsgeglüht und künstlich gealtert (peak aged)

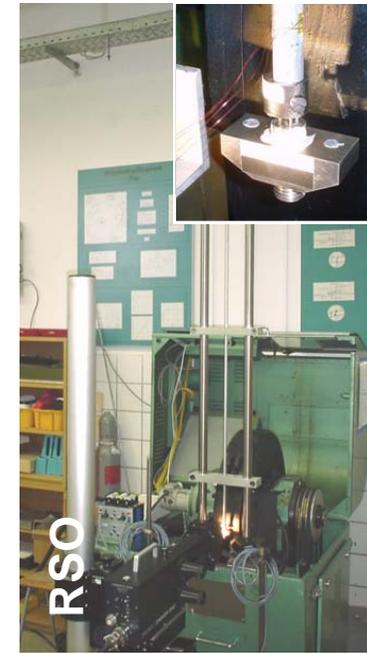
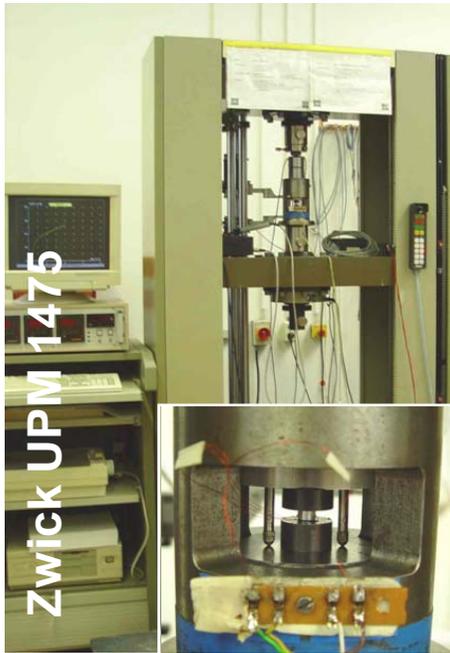


| | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Al | Sn | Zr | Cr | Mo |
| 5.75 | 1.96 | 1.99 | 2.10 | 2.15 |
| Si | Fe | O | N | C |
| 0.13 | 0.04 | 0.082 | 0.006 | 0.009 |

Chemische Zusammensetzung (Gew. %)

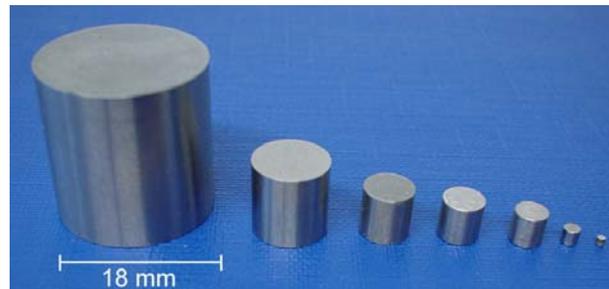
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Cr-2Mo-Si

- $\alpha+\beta$ Titanlegierung
- globulare α -Phase zwischen der lamellaren Anordnung von α - und β -Phase

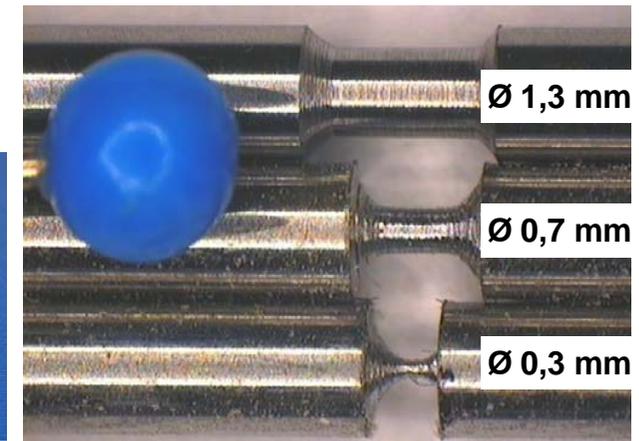


Prüfeinrichtungen für die Untersuchung von Längen- und Zeitabhängigkeiten

- ✓ Universalprüfeinrichtungen
- ✓ Split-Hopkinson-Bars
- ✓ Fallwerke (120/600 kg)
- ✓ Hochgeschwindigkeitszugprüfeinrichtungen (SZM, RSO)
- ✓ DGBA



Druck

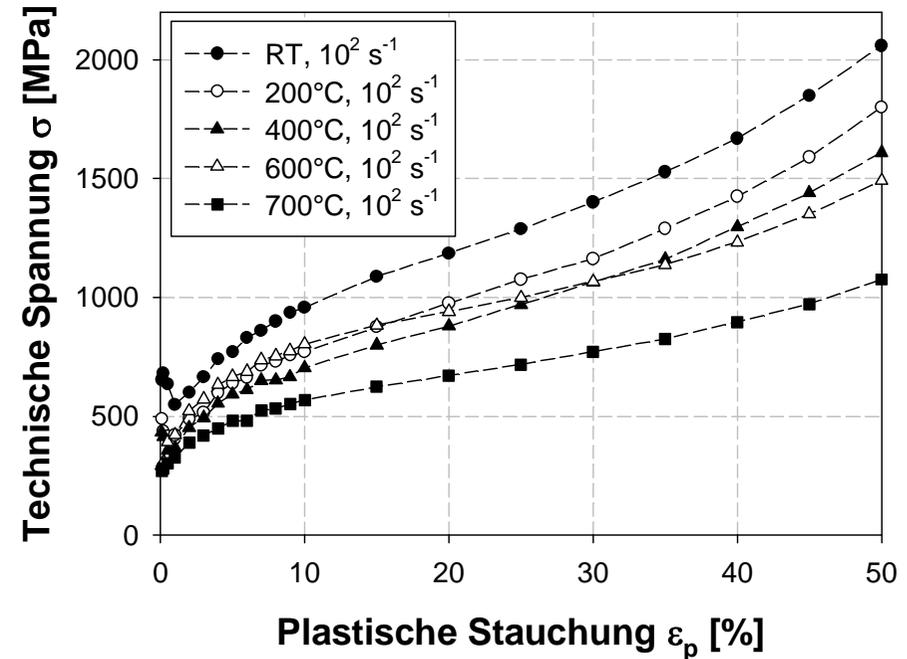
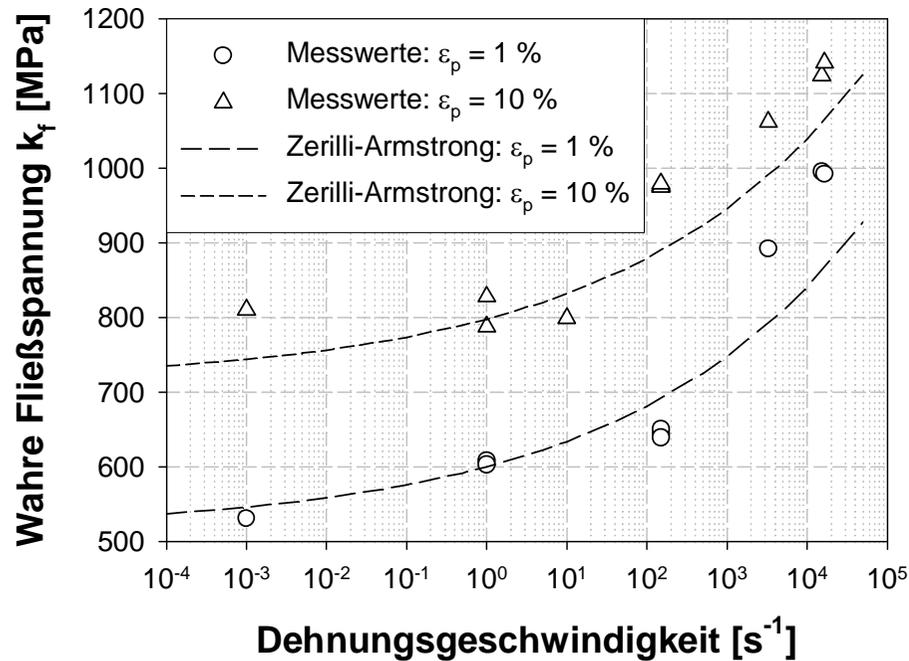


Zug



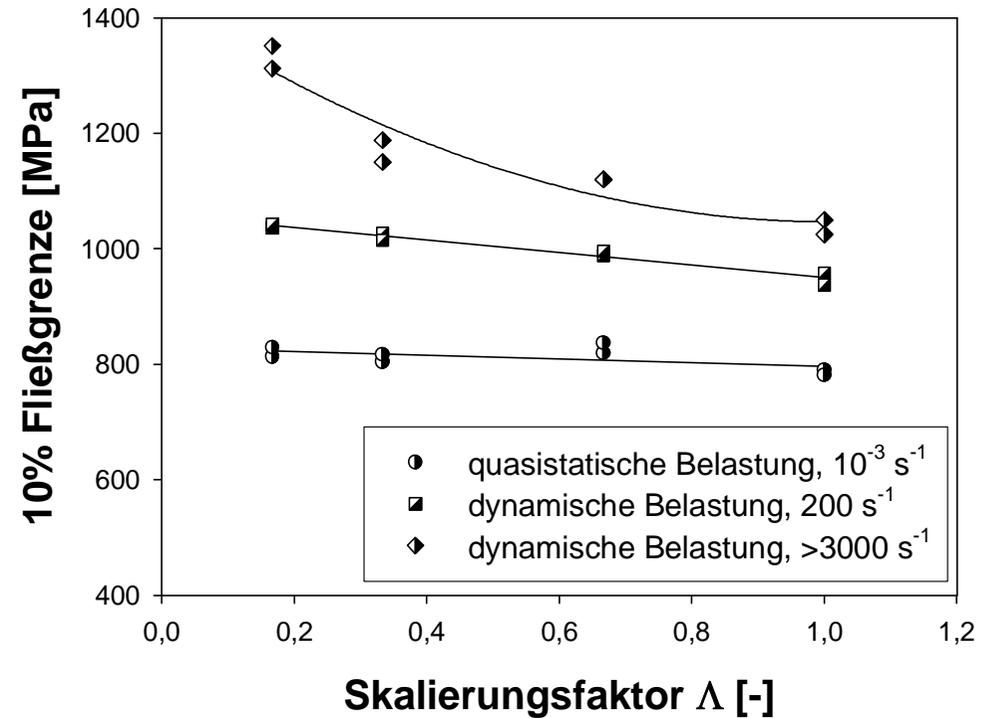
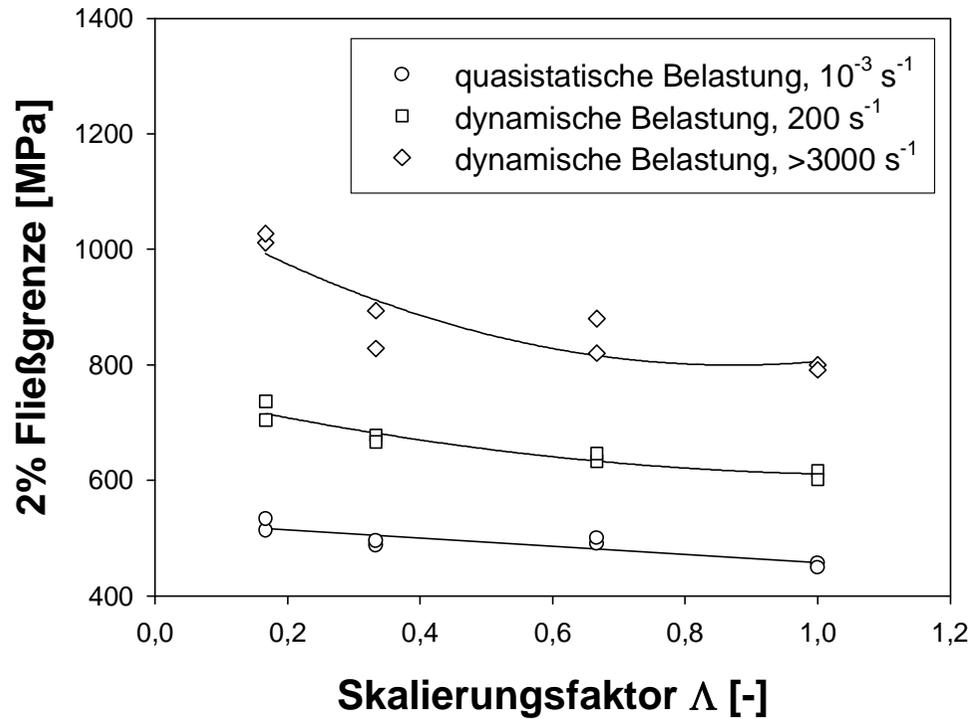
1. Einleitung und Motivation
2. Werkstoffe und Methoden
- 3. Größeneinflüsse beim Fließverhalten**
4. Gibt es einen Zusammenhang zwischen dynamischem Materialverhalten und spezifischer Schnittkraft
5. Zusammenfassung und Ausblick

➤ Bestimmung des konstitutiven Materialverhaltens von C45E anhand einer festgelegten Referenzgeometrie

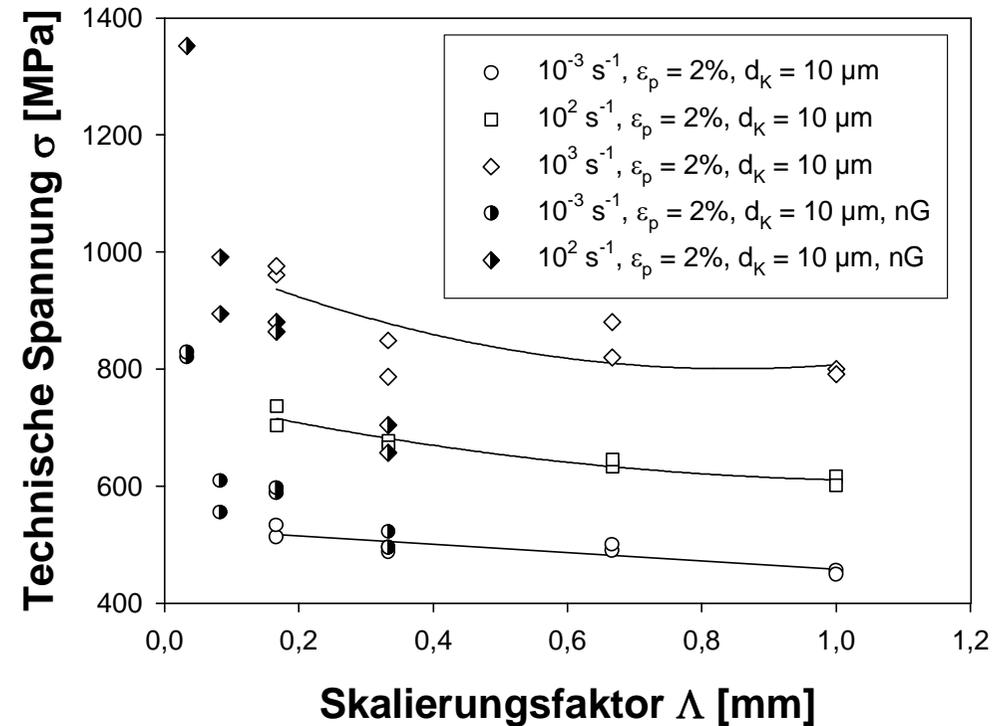
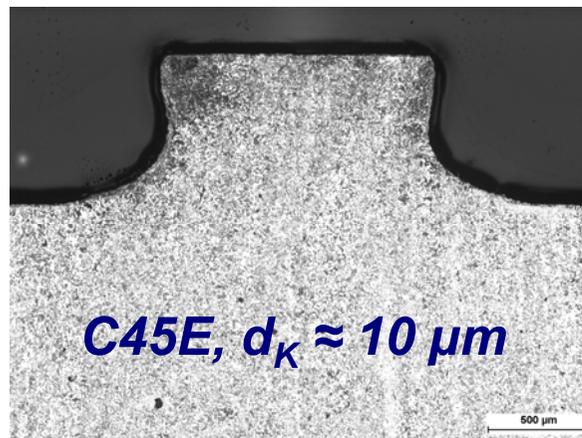
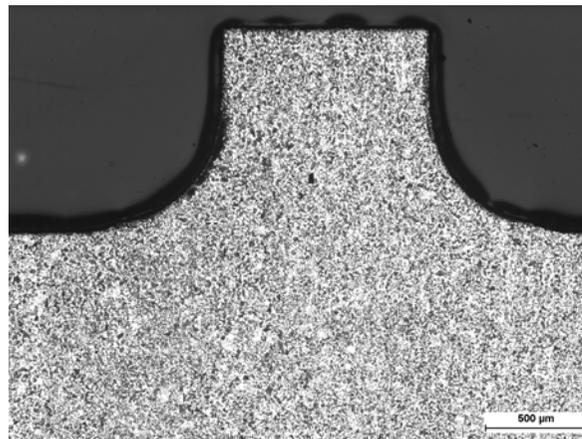
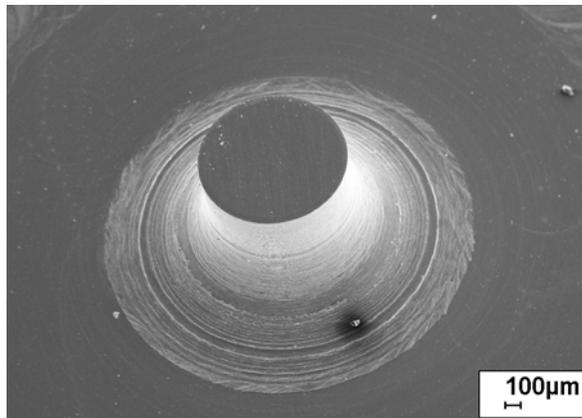


➤ Beschreibung über „konventionelle“ konstitutive Gleichungen mgl.

- ZA: $\sigma = \Delta\sigma + B_0 \cdot \exp\left[(\beta_0 - \beta_1 \cdot \ln \dot{\epsilon})T\right] + K_0 \cdot \epsilon^n$
- ZA: $\sigma = 149 + 315 \cdot \exp\left[(-0,0045 - 0,0005 \cdot \ln \dot{\epsilon})T\right] + 869 \cdot \epsilon^{0,187}$



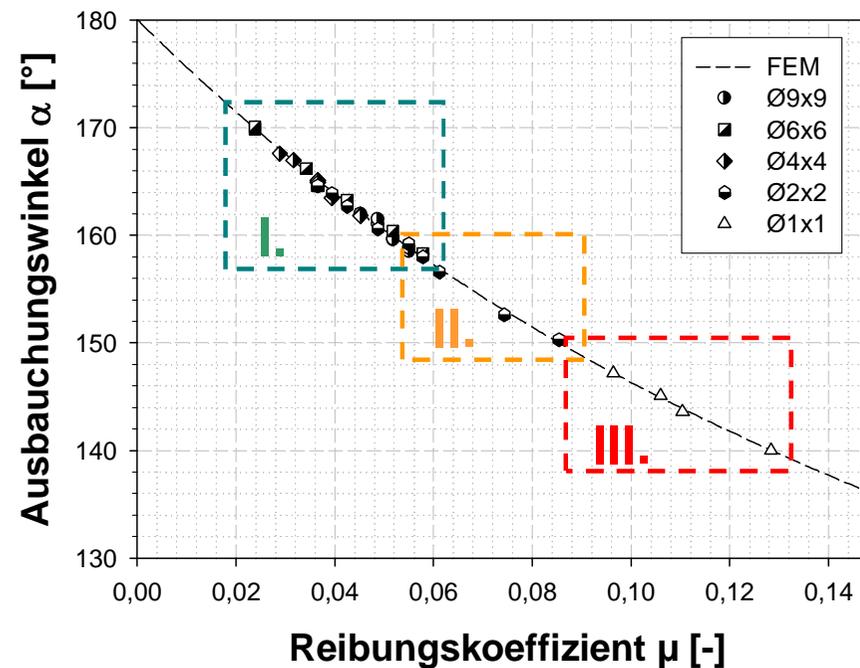
- ⇒ signifikanter Einfluss der Probengröße auf die gemessene Fließspannung
- ⇒ Fließspannungsanstieg mit kleiner werdender Probengröße
- ⇒ verstärkter Einfluss bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten
- ⇒ *Was passiert bei noch kleineren Probengeometrien ?*



- ⇒ in Vollmaterial gefräste Zylinderstauchprobe
- ⇒ Fertigung durch wbk-Karlsruhe
- ⇒ signifikanter Anstieg der Fließspannung bei Durchmessern $< \varnothing 1 \text{ mm}$
- ⇒ Auswertung nur bis max. 10% Verformung, da sonst keine Vergleichbarkeit mit Zylinderstauchversuchen möglich ist

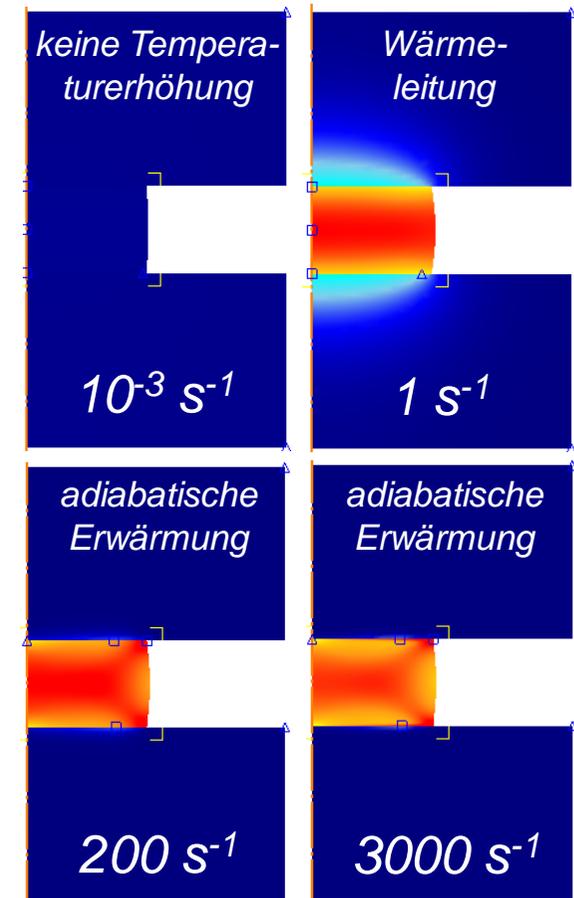
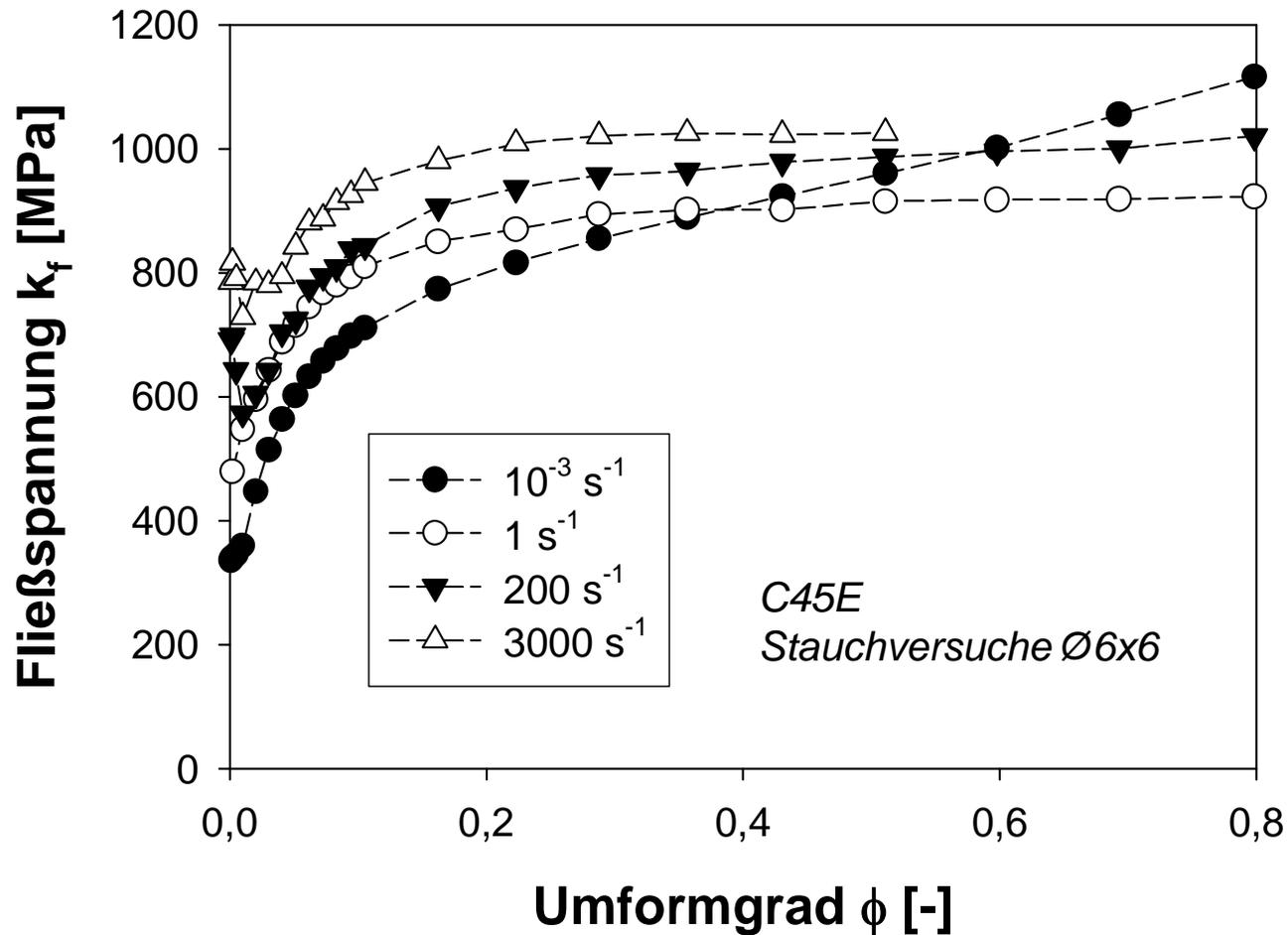
- FEM Simulationen und Variation des Reibungskoeffizienten μ
- Auswertung der Geometrie der verformten Probe
- Vergleich der Simulationsergebnisse mit experimentellen Ergebnissen und Bestimmung eines größenabhängigen Reibwertes

- I. kein Geometrieinfluss
- II. geringer Geometrieinfluss
- III. verstärkter Geometrieinfluss

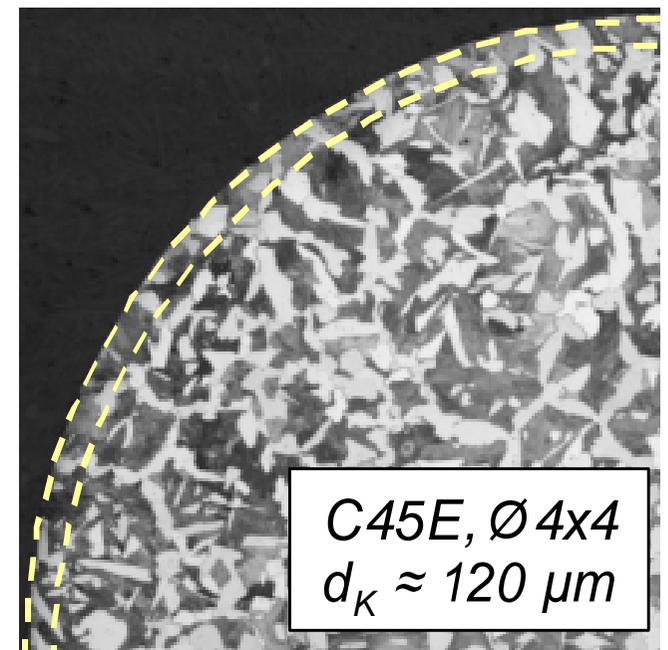
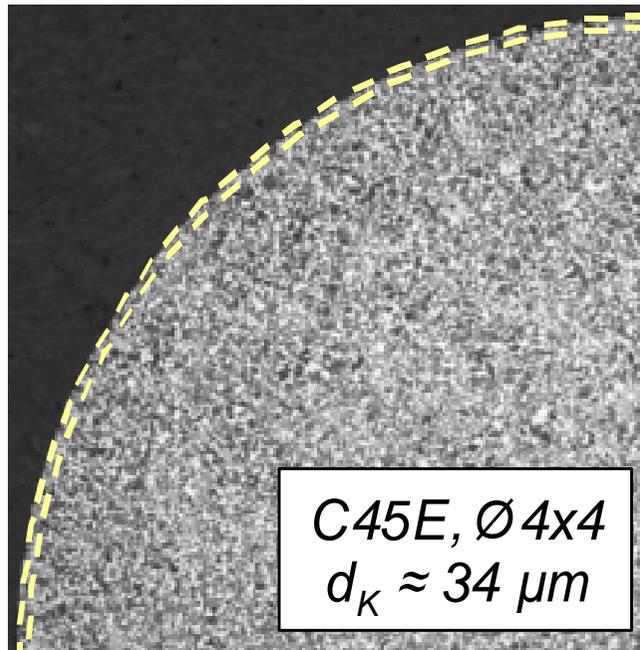
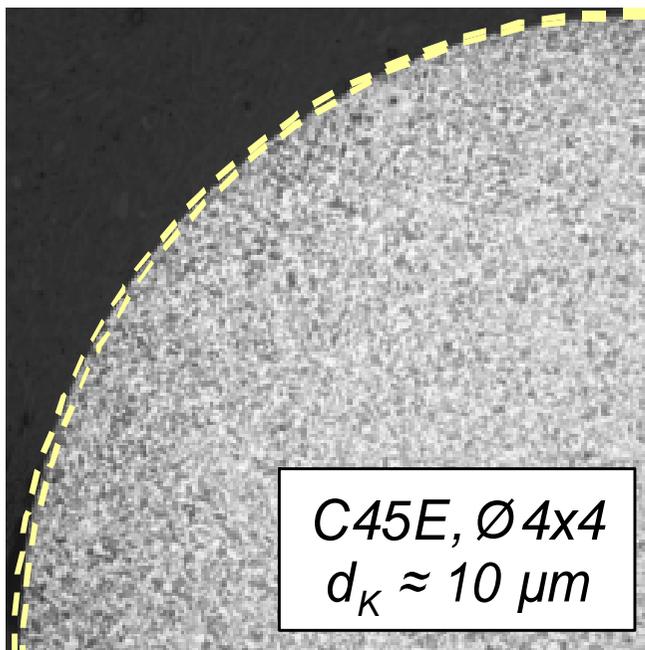
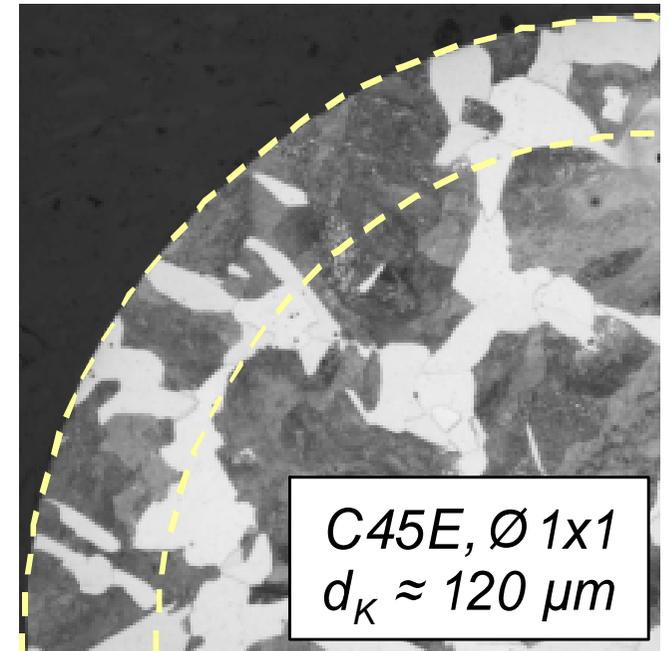
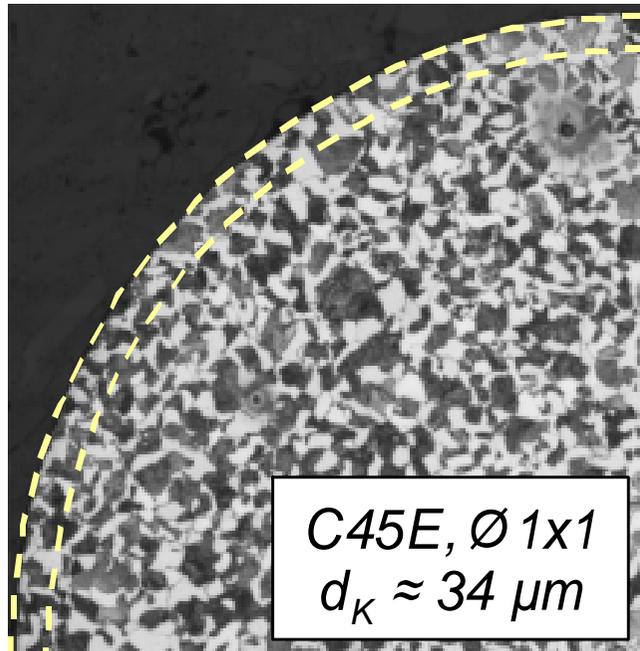
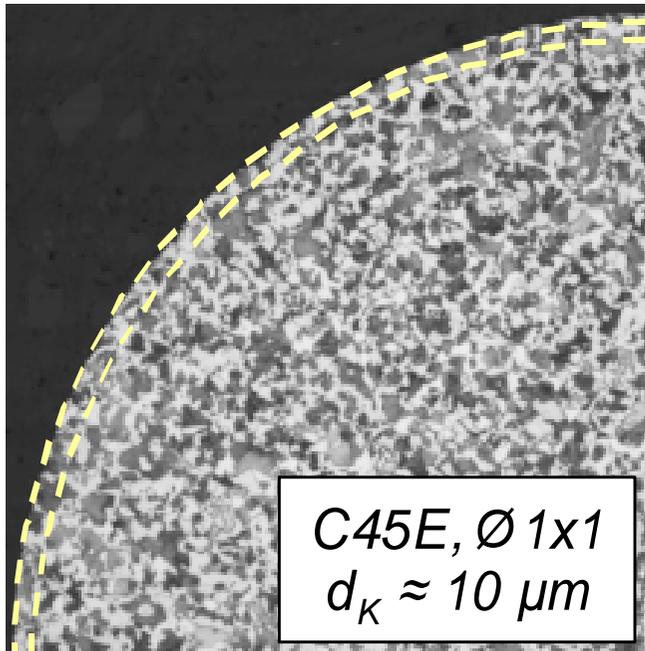


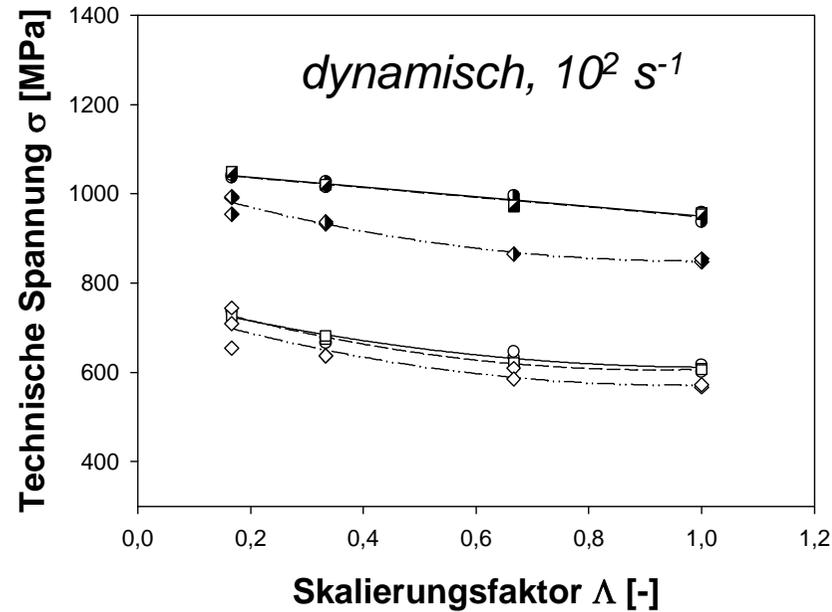
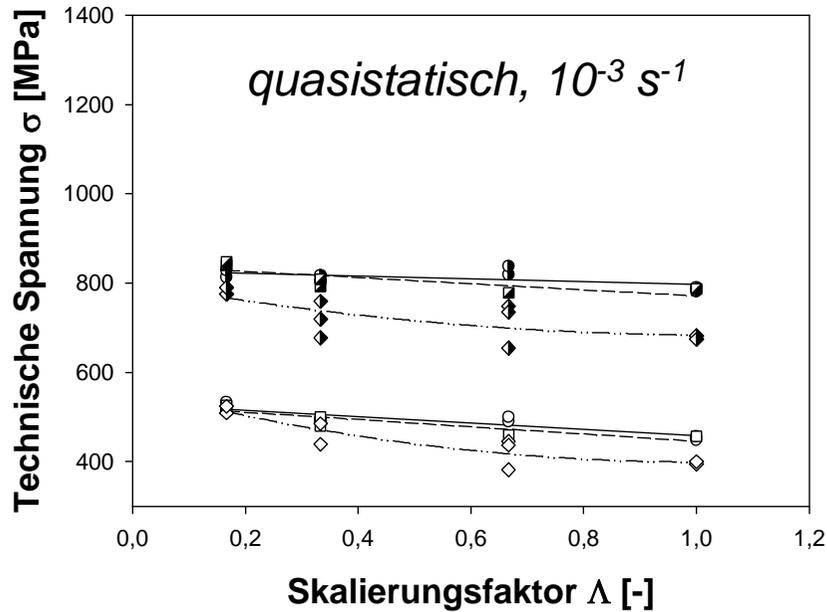
- Einfache Korrekturfunktion

$$\mu = a \cdot \exp\left(\frac{b}{K(\Lambda) + c}\right)$$

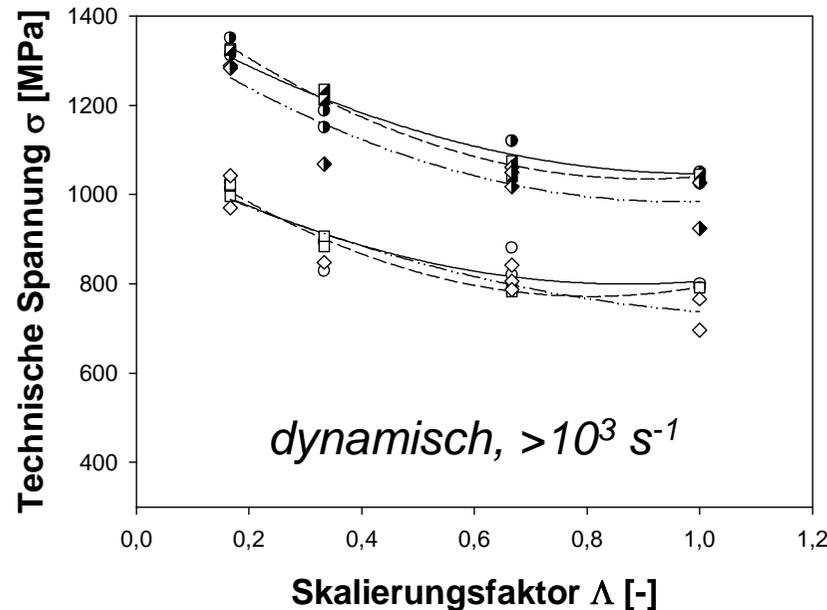


- Fließspannung steigt mit wachsender Dehngeschwindigkeit
- bei hohen Dehnraten beeinflusst der verformungsbedingte Temperaturanstieg und **Wärmeleitungseffekte** das gemessene mechanische Werkstoffverhalten
- Adiabatische Erwärmung** bei hohen Dehnraten führt zu thermischer Entfestigung





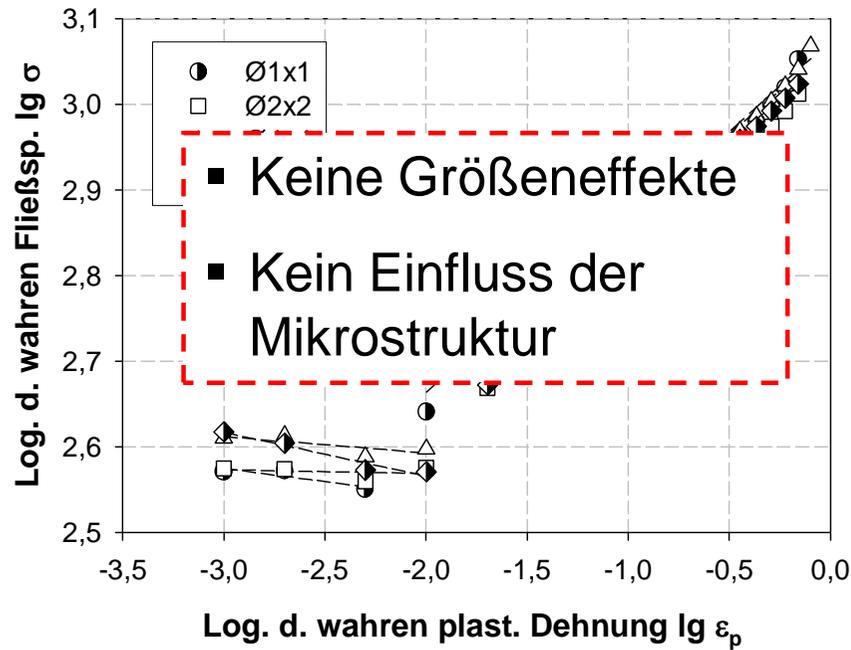
- $d_K = 10 \mu\text{m}, \epsilon_p = 2 \%$
- $d_K = 34 \mu\text{m}, \epsilon_p = 2 \%$
- ◇ $d_K = 120 \mu\text{m}, \epsilon_p = 2 \%$
- $d_K = 10 \mu\text{m}, \epsilon_p = 10 \%$
- $d_K = 34 \mu\text{m}, \epsilon_p = 10 \%$
- ◆ $d_K = 120 \mu\text{m}, \epsilon_p = 10 \%$



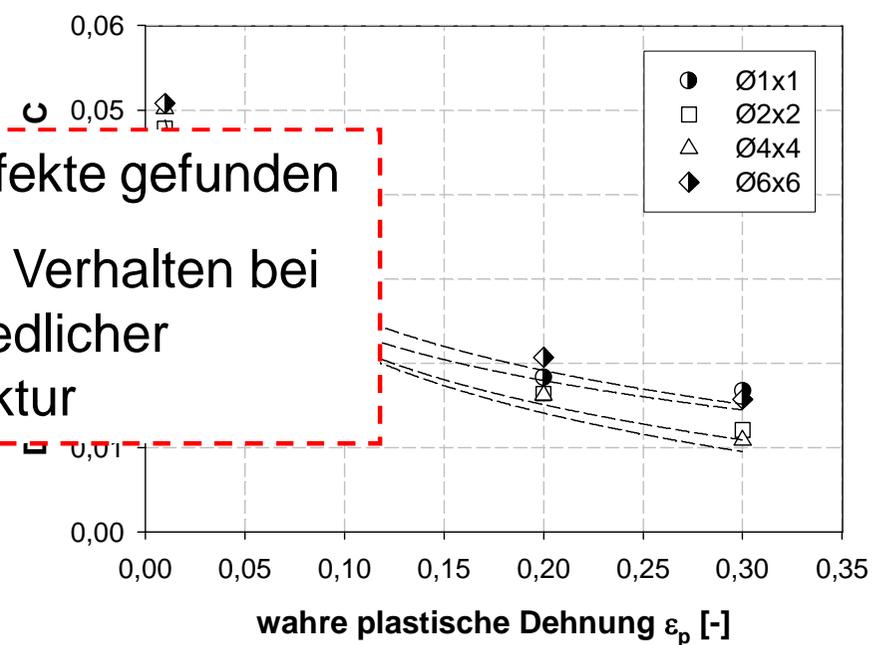
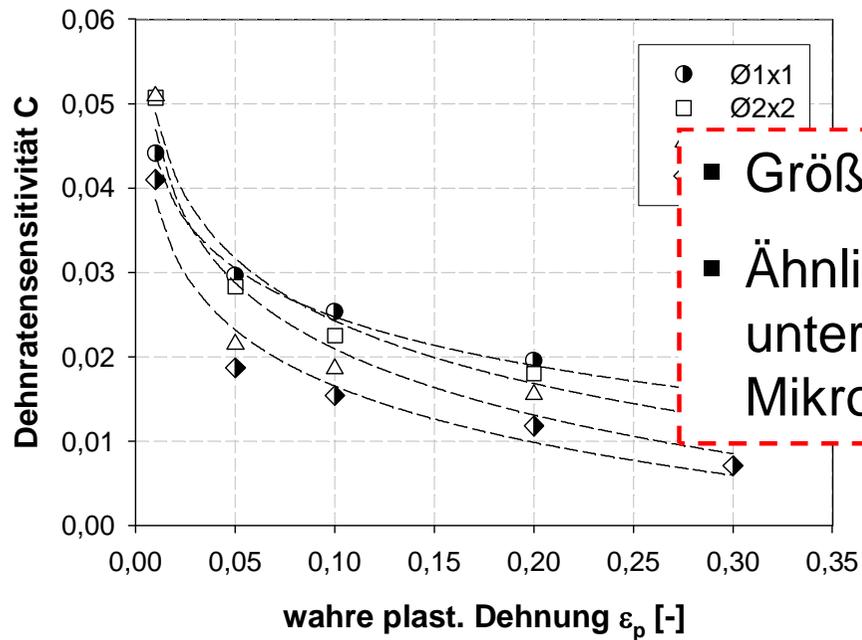
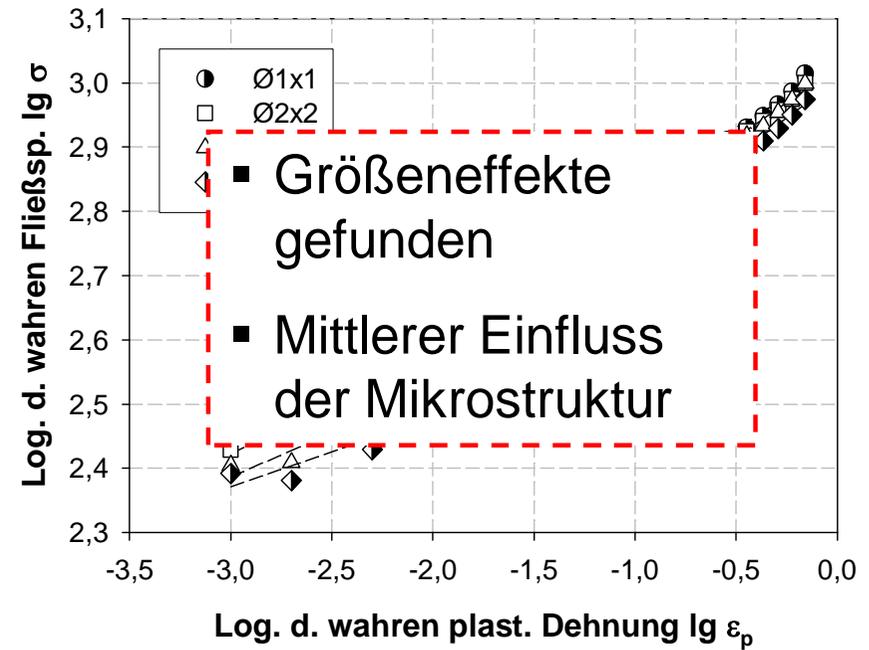
- ⇒ deutlicher Einfluss der Korngröße auf das gemessene Fließspannungsverhalten
- ⇒ Abfall der Fließspannung mit steigender Korngröße
- ⇒ mit zunehmender Skalierung vermindert sich der Korngrößeneinfluss
- ⇒ *Überlagerung mit weiteren Effekten ?*



C45E, mittlere Korngröße 10 μm



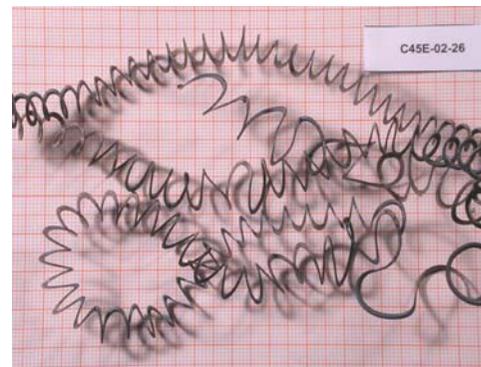
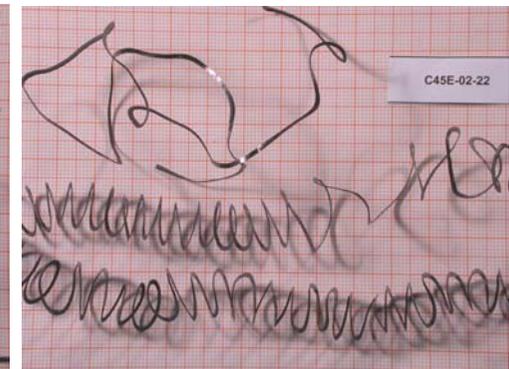
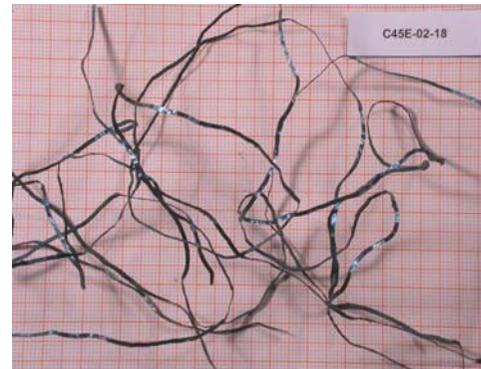
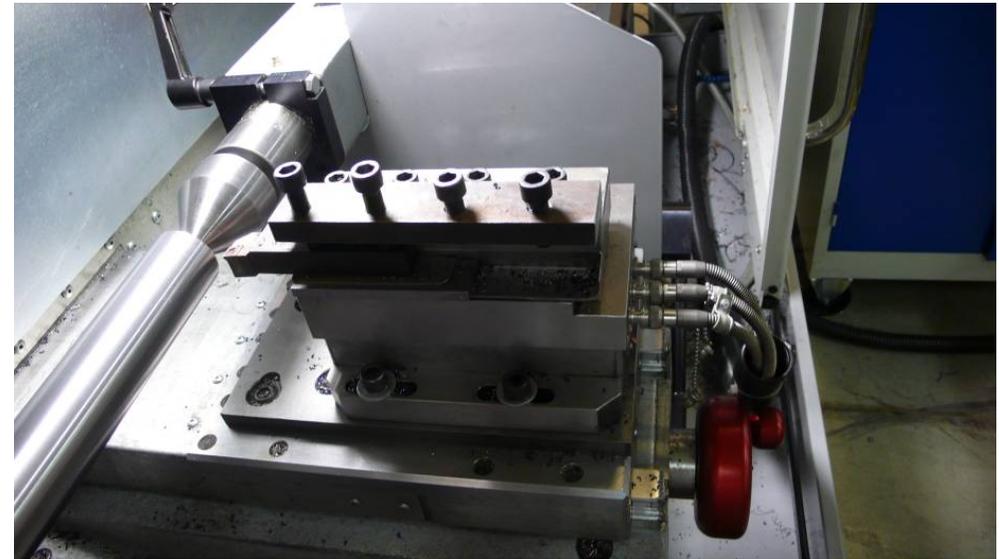
C45E, mittlere Korngröße 120 μm



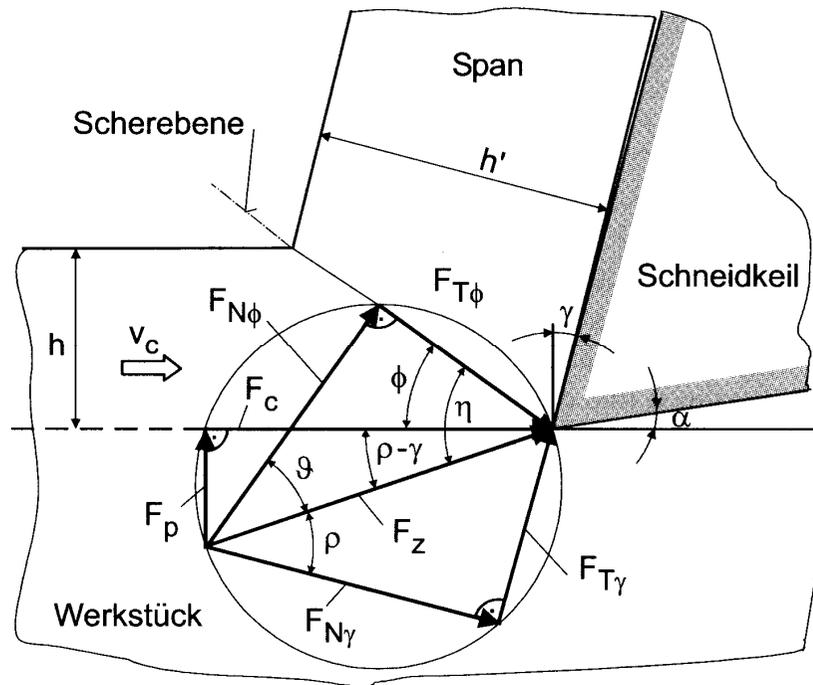


1. Einleitung und Motivation
2. Werkstoffe und Methoden
3. Größeneinflüsse beim Fließverhalten
4. Gibt es einen Zusammenhang zwischen dynamischem Materialverhalten und spezifischer Schnittkraft
5. Zusammenfassung und Ausblick

- Außenlängsdrehen
- Spanwinkel 0°
- Freiwinkel 7°
- Schnittgeschw. $v_c = 100 \text{ m/min}$
- Spannungstiefe $a_p = 1 \text{ mm}$
- Schnittlänge 15 mm
- Vorschub $0,05 - 0,5 \text{ mm / U}$
- Messung der Prozesskräfte (F_c , F_f , F_p)



- ⇒ Aus dem Kräfteplan in der Keilmessebene und den geltenden geometrischen Beziehungen lässt sich die spezifische Schnittkraft in Relation zur Werkstofffestigkeit setzen
- ⇒ Umrechnung über Fließhypothese in Fließspannung



Quelle: Degner

$$\tau_{\phi} = \frac{F_z}{b \cdot h} \cdot \cos(\phi + \rho - \gamma) \cdot \sin(\phi)$$

$$F_{T\phi} = \tau_{\max} \cdot \frac{b \cdot h}{\sin \phi}$$

$$F_z = F_{T\phi} \cdot \frac{1}{\cos(\phi + \rho - \gamma)}$$

$$F_c = F_z \cdot \sin 2\phi$$

$$k_c = \frac{\sin 2\phi}{\sin^2 \phi} \cdot \tau_{\max}$$

Tresca: $\tau_{\max} = \frac{1}{2} \cdot k_f$

von-Mises: $\tau_{\max} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot k_f$

- ⇒ Bestimmung der Fließspannung als Funktion der Dehnung, Dehnungsgeschwindigkeit und Temperatur
- ⇒ Formulierung geschlossener Materialmodelle zur Beschreibung des konstitutiven Materialverhaltens

⇒ Zerilli-Armstrong

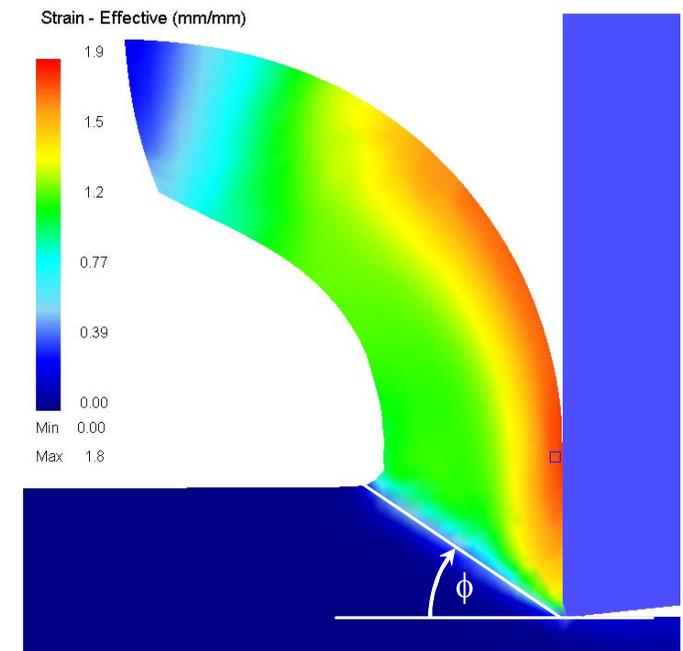
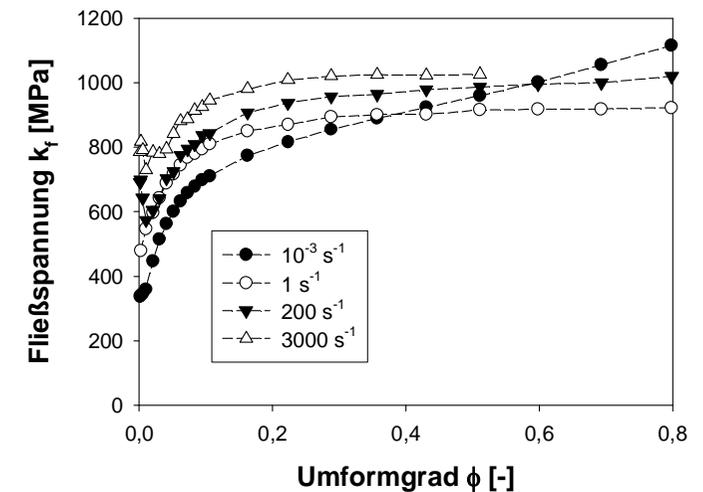
$$\overset{\text{krz}}{\sigma} = \Delta\sigma_G + B_0 \cdot \exp\left[(-\beta_0 + \beta_1 \ln \dot{\varepsilon})T\right] + K_0 \varepsilon^n$$

$$\overset{\text{kfz}}{\sigma} = \Delta\sigma_G + B_1 \cdot \varepsilon^{0,5} \cdot \exp\left[(-\beta_0 + \beta_1 \ln \dot{\varepsilon})T\right]$$

⇒ Johnson-Cook

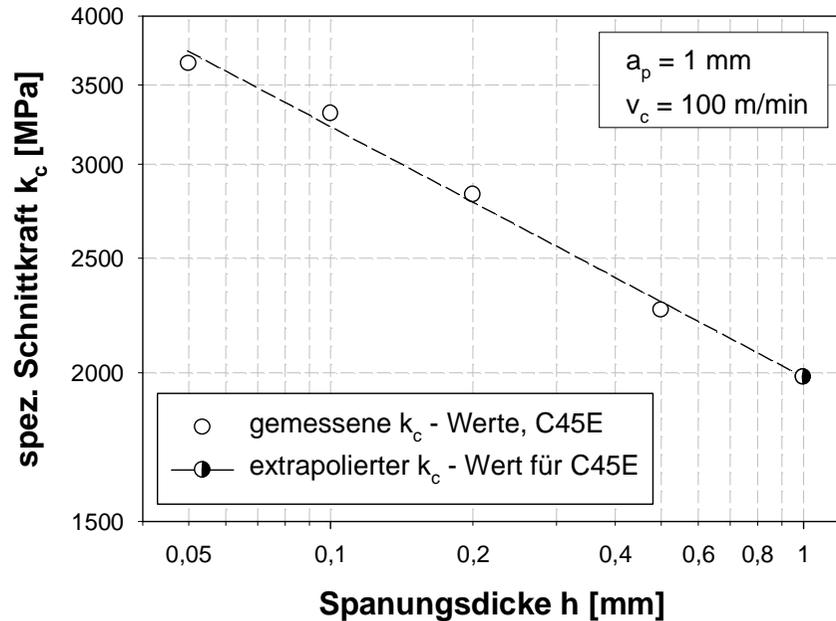
$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 - C \ln \varepsilon^*)(1 - T^{*m})$$

- ⇒ Bestimmung der in der Scherebene wirkenden Belastungen und des Scherwinkels mittels FEM - Simulationen





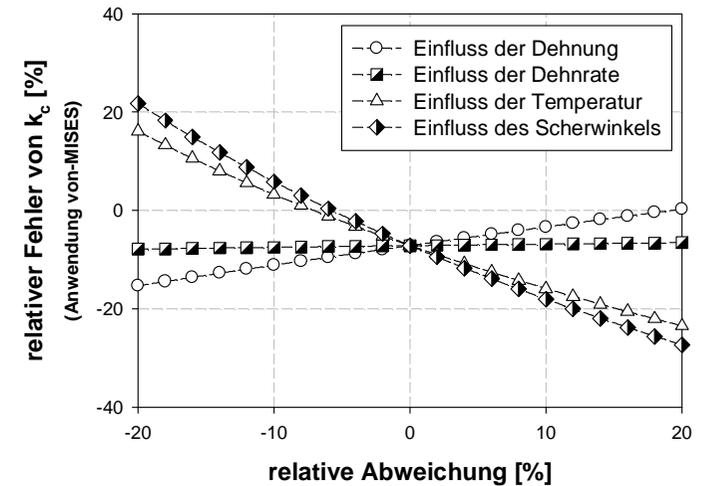
⇒ Experimentell ermittelte Werte für die spezifische Schnittkraft für C45E



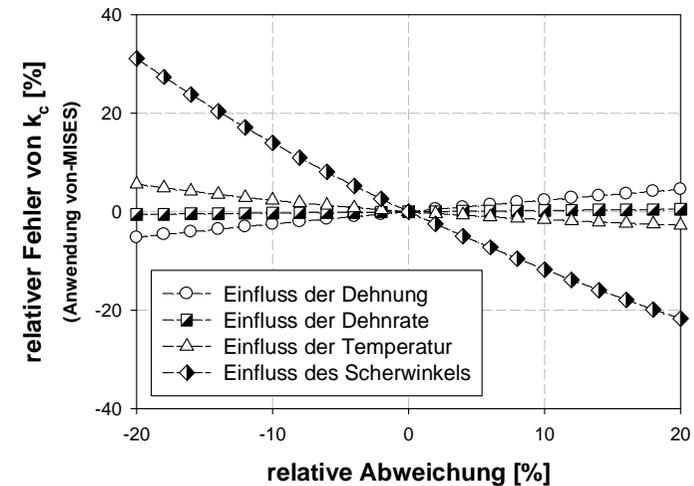
⇒ Berechnung der spezifischen Schnittkraft k_c aus dem dynamischen Werkstoffverhalten und Vergleich mit $k_{c1.1} = 1984 \text{ MPa}$

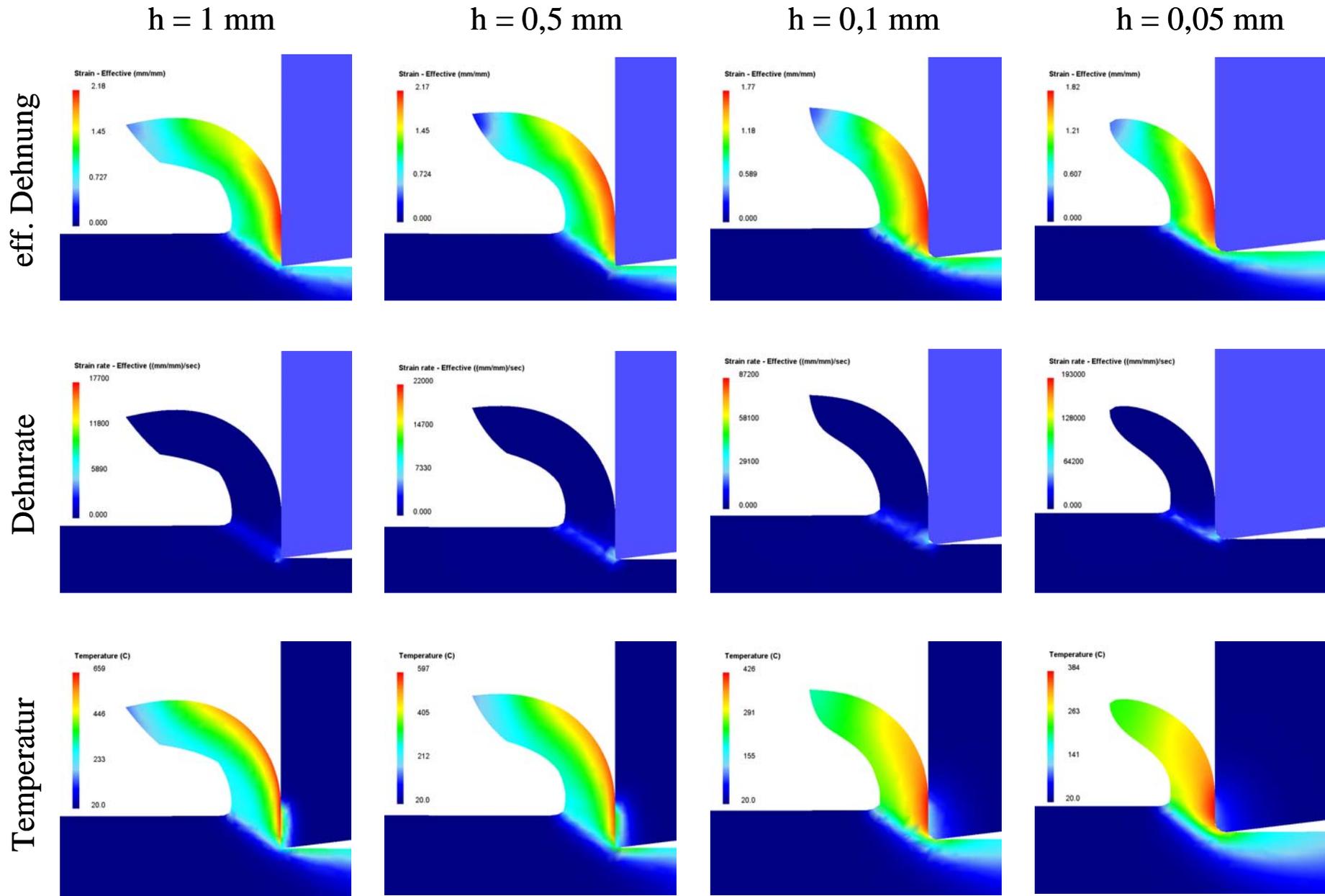
| | | | |
|----------------------|----------|----------------------|----------|
| $K_{c1.1}$ JC Mises | 1843 MPa | $K_{c1.1}$ ZA Mises | 1983 MPa |
| $K_{c1.1}$ JC Tresca | 1596 MPa | $K_{c1.1}$ ZA Tresca | 1718 MPa |

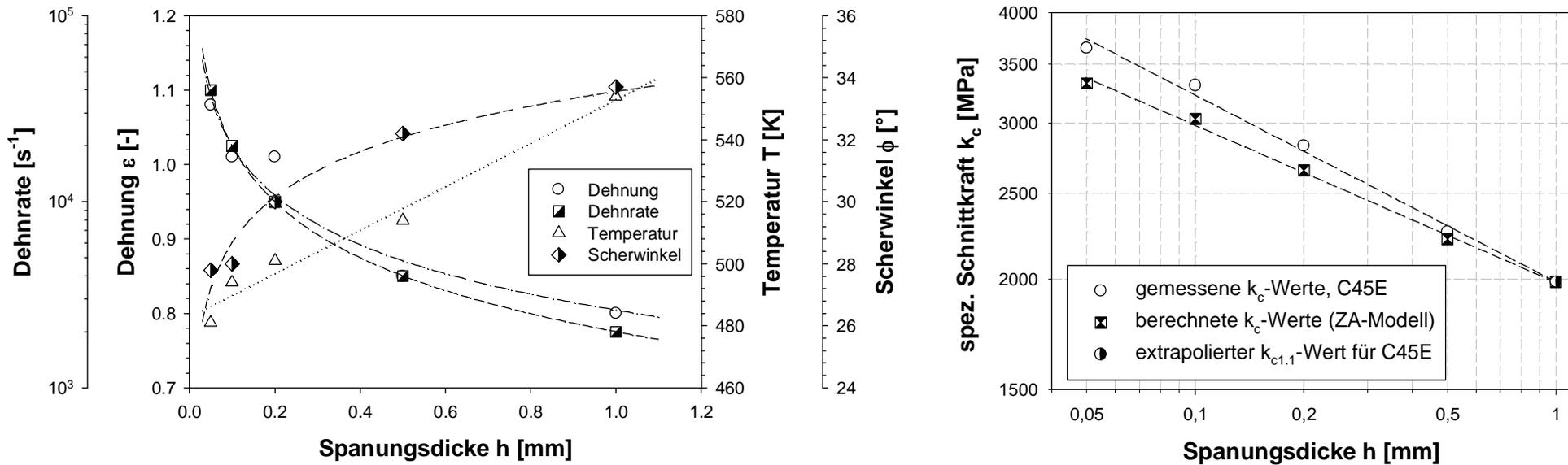
Fehlerabschätzung JC



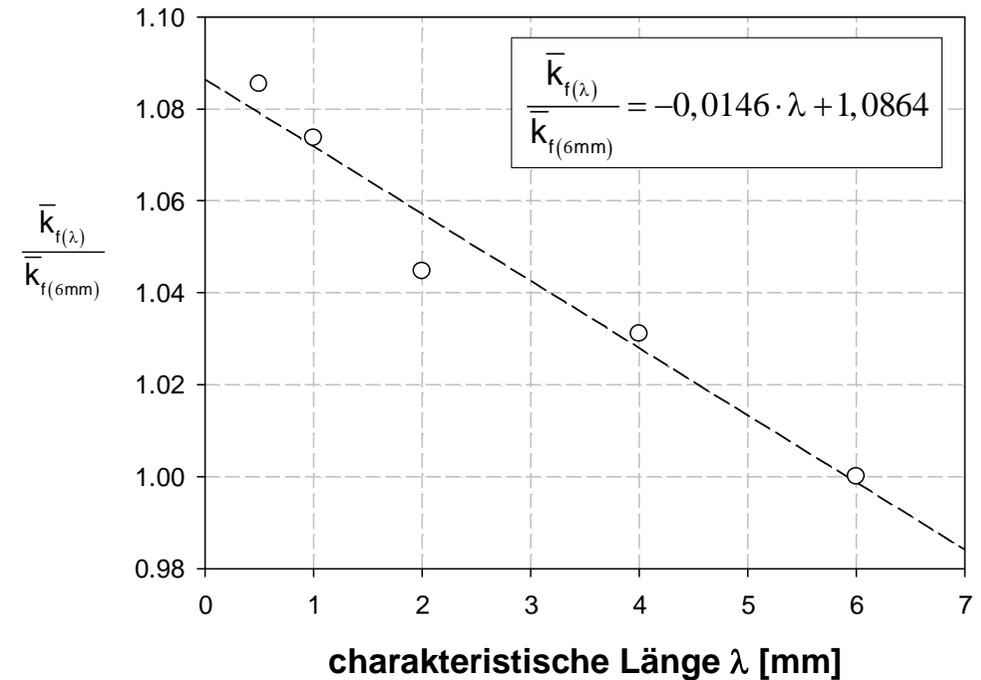
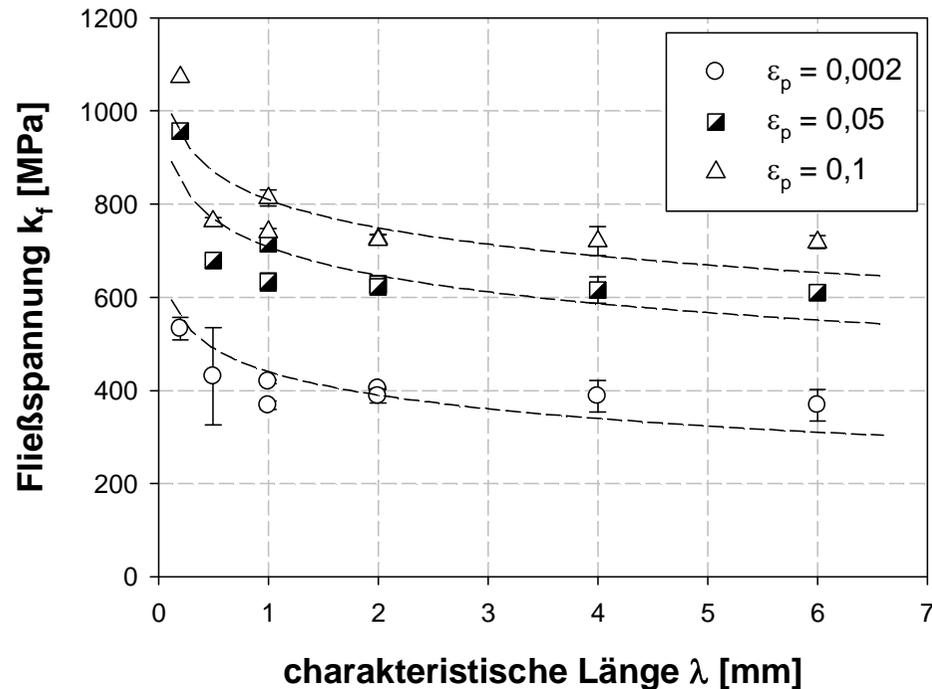
Fehlerabschätzung ZA



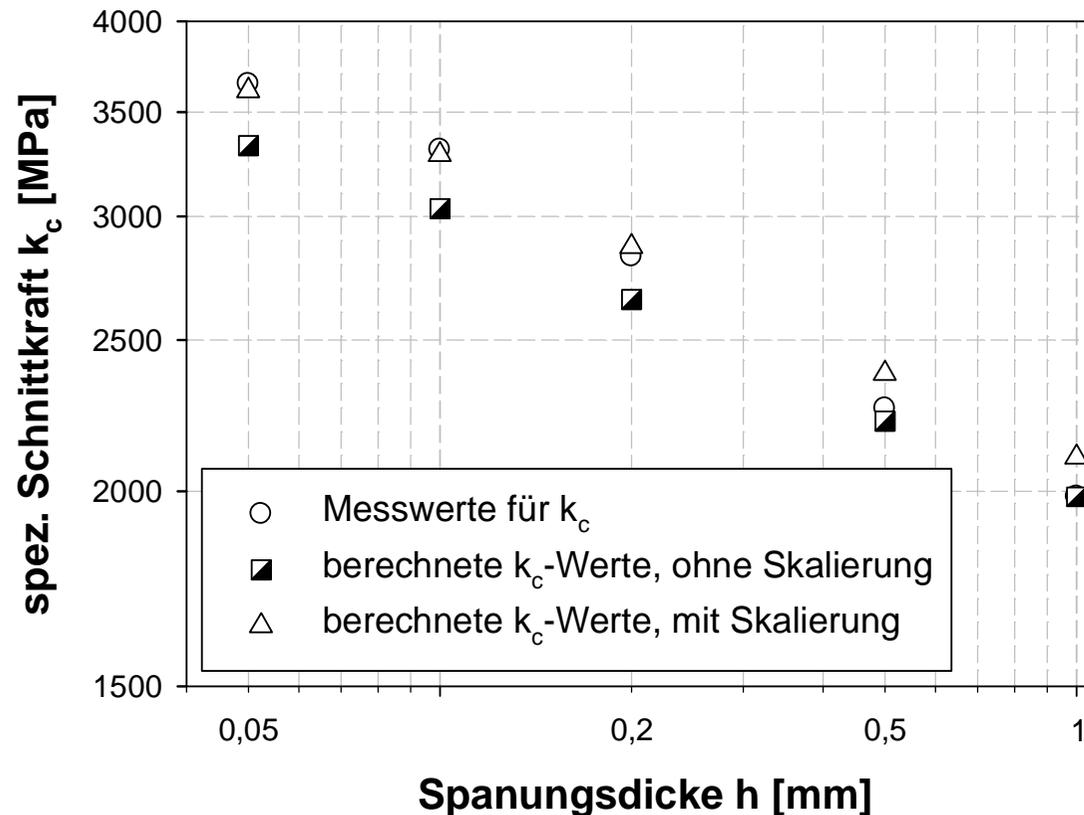




- Ermittlung der Entwicklung von Dehnung, Dehnungsgeschwindigkeit, Temperatur und Scherwinkel als Funktion der Spannungsdicke h basierend auf FEM - Variationsrechnungen
- Berechnung der spezifischen Schnittkräfte für verschiedene Spannungsdicken h
- Zunehmende Abweichung der berechneten Kräfte bei kleiner werdenden Spannungsdicken
 - **Frage nach Größeneffekten ?**

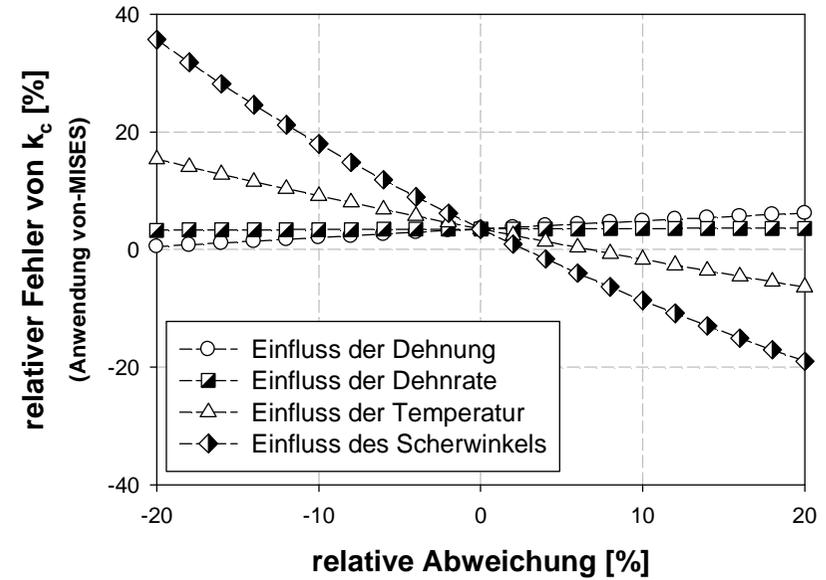
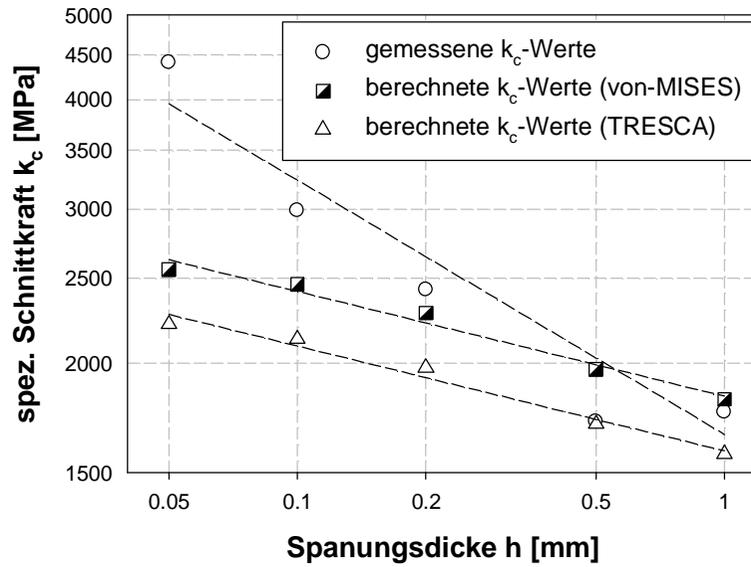


- Signifikanter Fließspannungsanstieg bei kleiner werdenden Probenabmessungen
- Einbeziehung des Skalierungseffektes in die Materialmodellierung
- Da thermodynamisch bedingte Größeneffekte bereits in den FEM – Simulationen berücksichtigt werden, genügt es zunächst für eine erste Näherung nur die quasistatischen Ergebnisse mit einzubeziehen

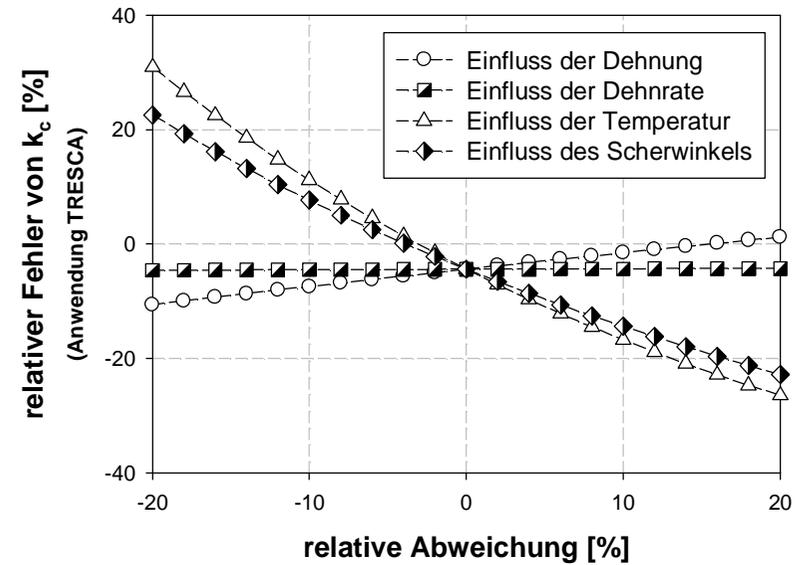
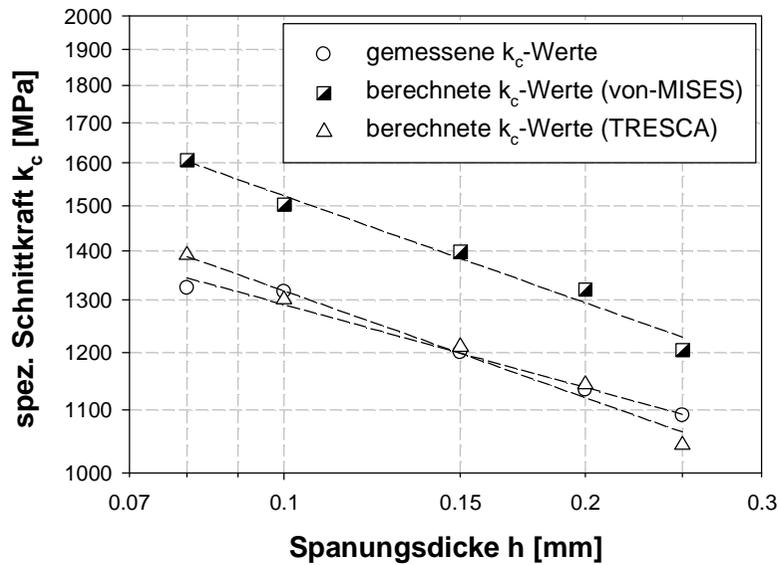


- Durch die Einbeziehung von werkstoffbedingten Skalierungseffekten lassen sich die gemessenen spezifischen Schnittkräfte relativ gut vorhersagen
- Zunehmender Einfluss von bspw. Der Schneidkantenverrundung wird durch die Kalibrierung der Methode mittels FEM mit berücksichtigt und macht zusätzliche Korrekturfaktoren nicht zwingend notwendig

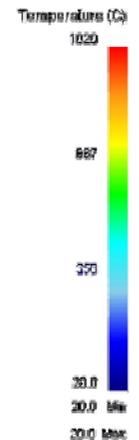
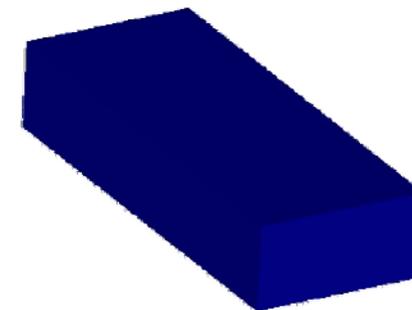
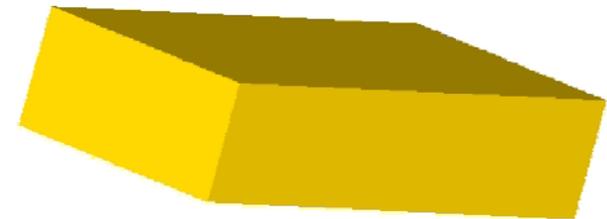
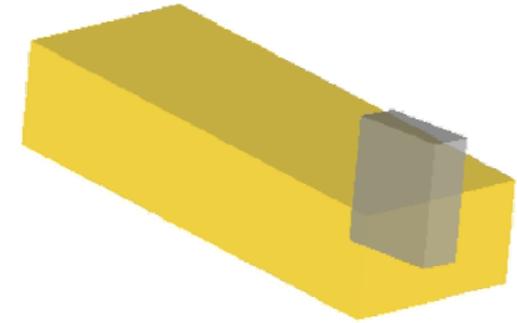
Böhler Stahl M315



Al-Leg. AlSi9Cu3



- 3D Verifikationsrechnungen in Deform-3D™
- starres Werkzeug
 - $\alpha = 7^\circ$
 - $\beta = 83^\circ$
 - $\gamma = 0^\circ$
 - $\kappa = 95^\circ$
 - 2000 tetraeder elements
- Werkstück
 - $25 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$
 - plastic
 - C45E
 - 80000 Tetraeder elemente
- Rechenzeit: 64,5 h





1. Einleitung und Motivation
2. Werkstoffe und Methoden
3. Größeneinflüsse beim Fließverhalten
4. Gibt es einen Zusammenhang zwischen dynamischem Materialverhalten und spezifischer Schnittkraft
- 5. Zusammenfassung und Ausblick**

- Das gemessene mechanische Werkstoffverhalten wird stark durch die Probenform und –größe beeinflusst.
- Veränderte **tribologische und thermodynamische Prozessbedingungen** konnten als wesentliche Ursachen für gemessene Größeneffekte gefunden werden.
- **Modellierungsansätze** ergeben sich aus der Berücksichtigung des veränderten thermodynamischen Prozesszustandes bei der geometrischen Skalierung.
- Es ist gelungen, unter Einbeziehung des **dynamischen größenabhängigen Materialverhaltens**, die **spezifische Schnittkraft** analytisch zu berechnen und eine gute Übereinstimmung mit experimentell gemessenen Werten zu erreichen.