

Kunststoffe + SIMULATION
10. /11. April 2013, München

Kritische Dehnungen als Auslegungskriterien - auch in FEM-Simulationen



INSTITUT FÜR WERKSTOFFTECHNIK
UND KUNSTSTOFFVERARBEITUNG

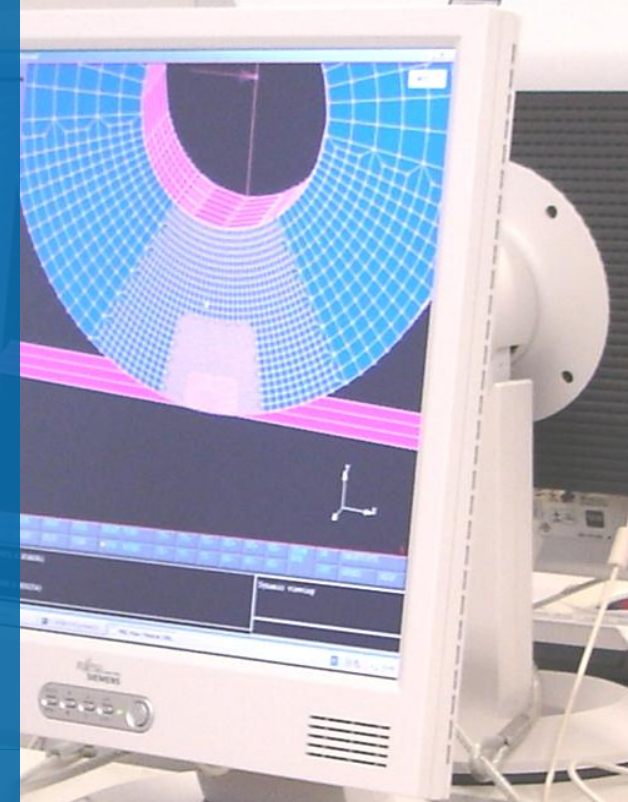
Prof. Dipl.-Ing. Johannes Kunz
Dipl.-Ing. Mario Studer



HSR

HOCHSCHULE FÜR TECHNIK
RAPPERSWIL

FHO Fachhochschule Ostschweiz







Prof. Dr.
Frank Ehrig
Institutsleitung,
Spritzgiessen,
Bauteilauslegung



Prof. Dr.
Markus Henne
Institutspartner
Leichtbau,
Faserverbundtechnik



Prof.
Daniel Schwendemann
Institutspartner
Compoundierung,
Materialentwicklung

■ Zahlen zum IWK

- Gründung 2005
- 20 Mitarbeiter (Absolventen, Industriefachleute)

■ Aufgaben des IWK

- Ausbildung (Bachelor Maschinentechnik | Innovation; Master of Science in Engineering)
- Forschung & Entwicklung entlang der gesamten Wertschöpfungskette
- Dienstleistung in Form von Prüfungen und Tests sowie Simulationen

■ Kernkompetenzen des IWK

- Spritzgiessen; Faserverbundtechnik; Compoundierung (Extrusion)
- Produktentwicklung, Werkzeug- und Prozesstechnik
- Einsatz von Simulationstools

- Einleitung
- Festigkeitsbedingung
- Dehnungsbezogene Auslegung
- Dehnungen als werkstoffmechanische Versagensgrößen
- Kritische Dehnung – ein wichtiger Werkstoffkennwert
- Werkstoffmechanisches Verständnis
- Dehnungsbezogene Auslegung mit FEM-Simulationen
- Illustrative Beispiele und Anwendungen
- Fazit

■ Auslegung:

Definition von Bauteilgeometrie und Werkstoff aufgrund der funktionellen Anforderungen und Betriebsbedingungen, insbesondere auch der mechanischen Beanspruchung

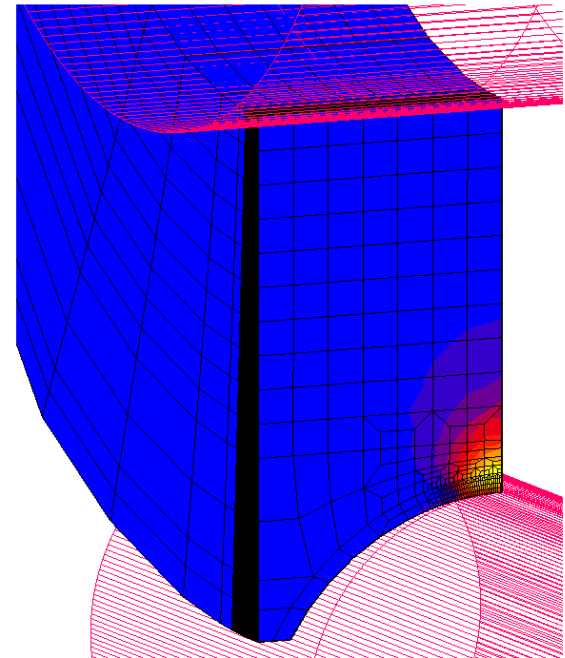
■ Festigkeitsrechnung im Zentrum

■ Herkömmliche Auslegung:

Aufgrund zulässiger Spannungen

■ Festigkeitsbedingung:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{zul} = \sigma_G \cdot \frac{C}{S}$$



■ Auslegung aufgrund zulässiger Spannungen

Festigkeitsbedingung:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{zul} = \sigma_G \cdot \frac{C}{S}$$

bzw.

$$\sigma_V \leq \sigma_{zul} = \sigma_G \cdot \frac{C}{S}$$

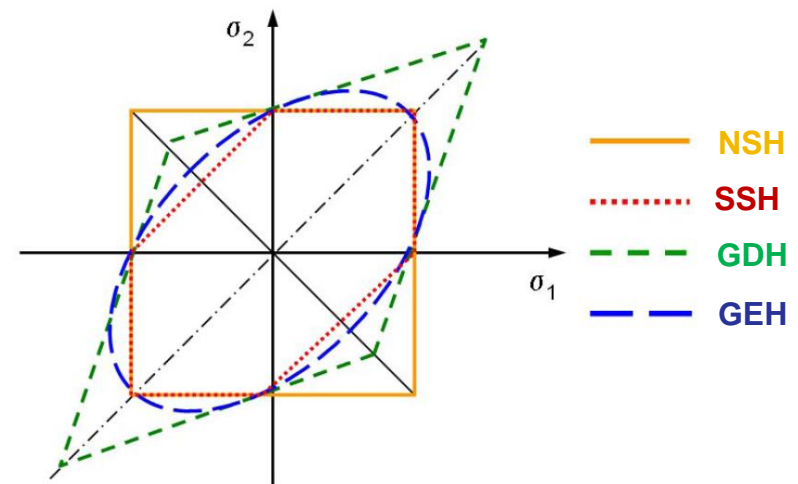
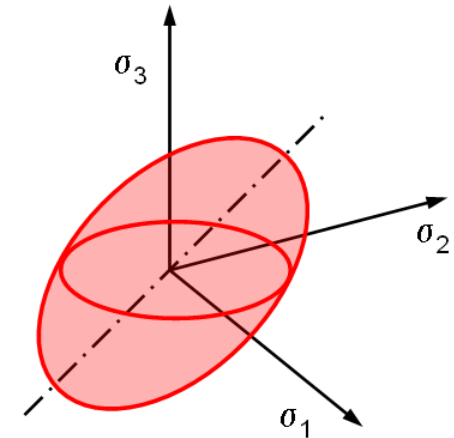
σ_{max}	Höchstspannung im Bauteil bei einachsigem Spannungszustand resp. Einachsige Vergleichsspannung σ_V bei mehrachsigem Spannungszustand
σ_{zul}	Zulässige Spannung
σ_G	Spannungs-Grenzwert für die Belastbarkeit des Werkstoffs
C	Einflussfaktor
S	Sicherheitsfaktor

■ Mehrachsiger Spannungszustand:

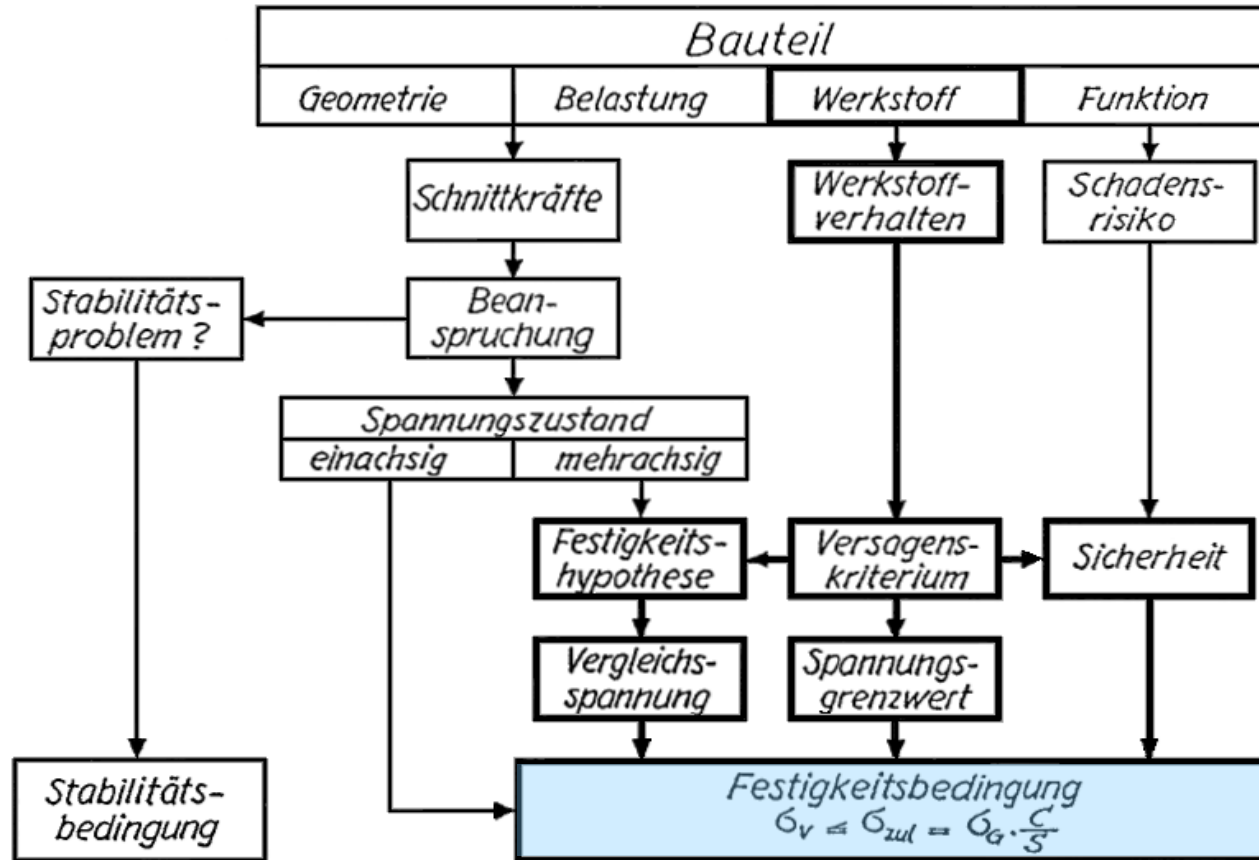
- Vergleichsspannung: Funktion der Hauptspannungen, je nach Festigkeitshypothese

$$\sigma_V = \sigma_V(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$$

- Normalspannungshypothese (NSH): (Coulomb)
- Schubspannungshypothese (SSH): (Tresca, Mohr)
- Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH): (von Mises)
- Grösstdehnungshypothese (GDH): (Navier)



■ Spannungsbezogene Festigkeitsrechnung: Schema



■ Vorteile der dehnungsbezogenen Auslegung

Dehnung bei Kunststoffteilen i. A. geeigneteres Kriterium als Spannung:
[Menges u.a., 1967 – 1977]

- Werkstoffmechanisch klare Versagenskriterien
- Denken in Verformungen: Erleichtertes Erfassen des Kunststoffverhaltens unter mechanischer Belastung
- Verformungen (Dehnungen) sind direkt sicht- und messbar, Kräfte (Spannungen) dagegen nicht
- Dehnungen sind die natürlicheren, anschaulicheren Grössen als die Spannungen
- Dehnungsbezogene Auslegung erfasst das charakteristische Versagensverhalten der Kunststoffe besser
- Einfacherer Berechnungsvorgang

- **Verformungsbedingung: wie Grösstdehnungshypothese (Navier, 1864)**

$$\varepsilon_V = \max(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) \leq \varepsilon_{zul} = \varepsilon_G \cdot \frac{C}{S}$$

- **Bestimmung der maximalen Dehnung: Verallg. Hookesches Gesetz**

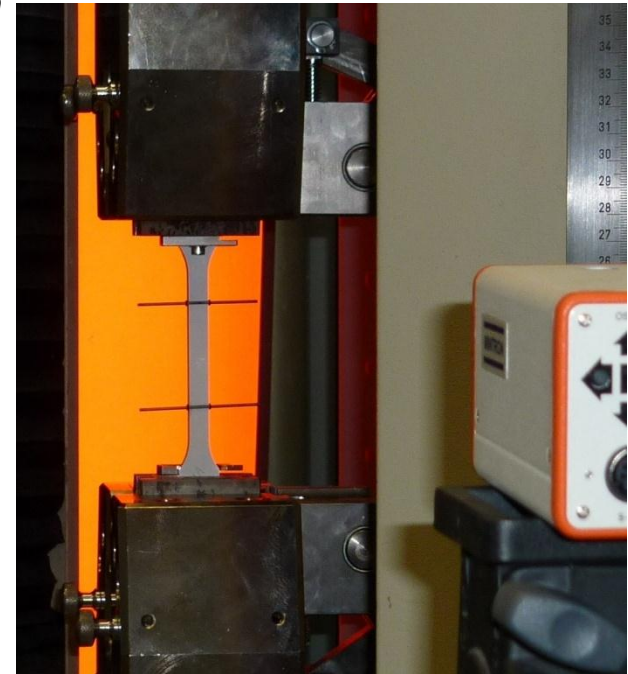
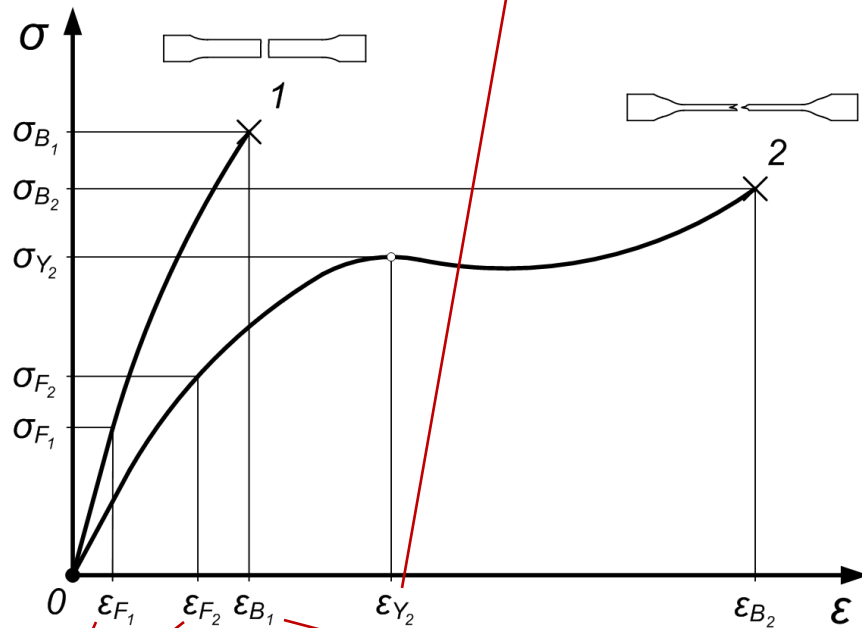
$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1e} - \mu \cdot (\varepsilon_{2e} + \varepsilon_{3e}) = \frac{\sigma_1}{E_{C1}} - \mu \cdot \left(\frac{\sigma_2}{E_{C2}} + \frac{\sigma_3}{E_{C3}} \right)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{2e} - \mu \cdot (\varepsilon_{3e} + \varepsilon_{1e}) = \frac{\sigma_2}{E_{C2}} - \mu \cdot \left(\frac{\sigma_3}{E_{C3}} + \frac{\sigma_1}{E_{C1}} \right)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{3e} - \mu \cdot (\varepsilon_{1e} + \varepsilon_{2e}) = \frac{\sigma_3}{E_{C3}} - \mu \cdot \left(\frac{\sigma_1}{E_{C1}} + \frac{\sigma_2}{E_{C2}} \right)$$

Streckdehnung

Kriterium bei zähem Verhalten



Fliessdehnung

Vermeiden irreversibler Verformungen
und Beeinträchtigung der Transparenz

Bruchdehnung

Kriterium bei sprödem Verhalten

■ Dehnungen als Versagenskriterien:

- **Bruchdehnung ε_B**
 - ➔ bei sprödem Verhalten

- **Streckdehnung ε_Y**
 - ➔ bei zähem Verhalten, z.B. zwecks Vermeiden von Verstreckungen und Weissbruch

- **Fliessdehnung ε_F** : Dehnung beim ersten Auftreten von Schädigungen (Bildung von Fliesszonen, Crazes, Mikrorissen)
 - ➔ für jedes Werkstoffverhalten, z. B. zwecks Vermeiden irreversibler Verformungen oder Beeinträchtigung der Lichtdurchlässigkeit

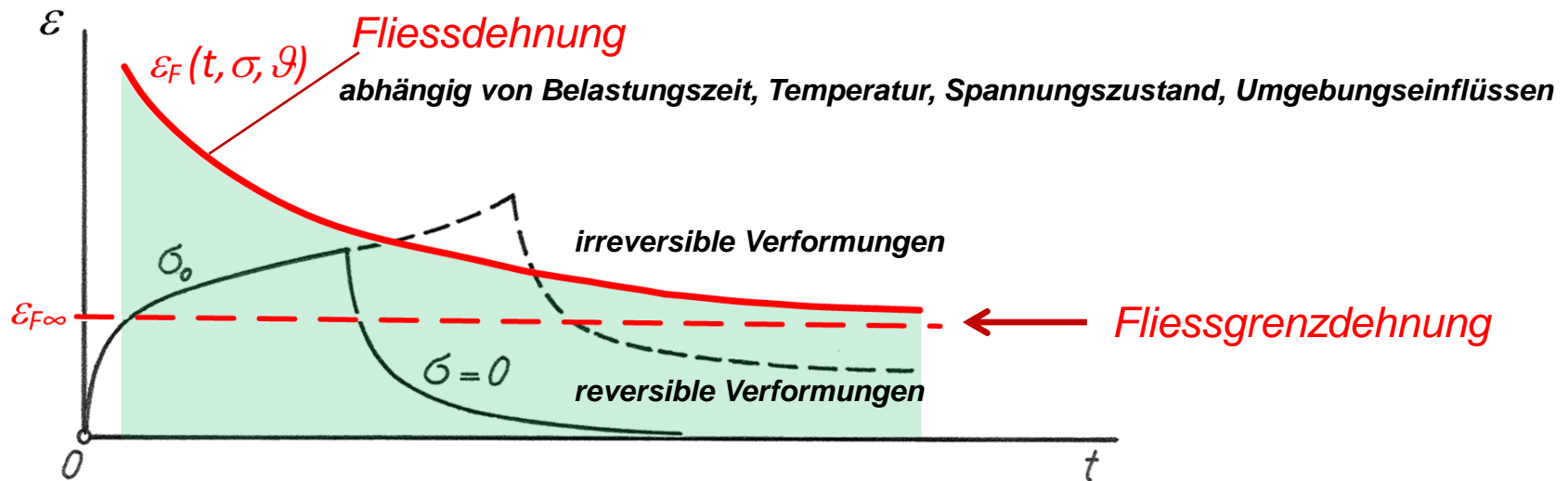
- **Fliessgrenzdehnung $\varepsilon_{F\infty}$** : Asymptotischer Grenzwert der Fliessdehnung

■ Fliessdehnung:

- Grenze zwischen reversiblen und irreversiblen Verformungen

■ Fliessgrenzdehnung:

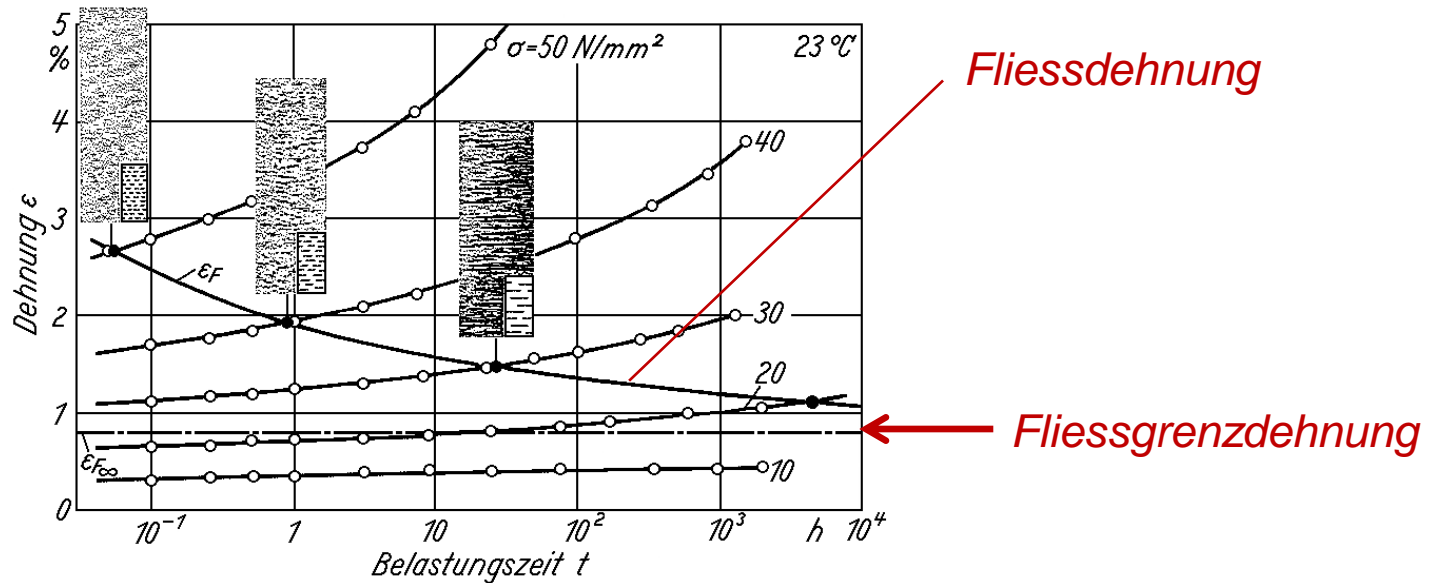
- in weiten Grenzen unabhängig von Belastungszeit, Temperatur, Spannungszustand, Umgebungseinflüssen



■ Versagenskriterium Rissbildung:

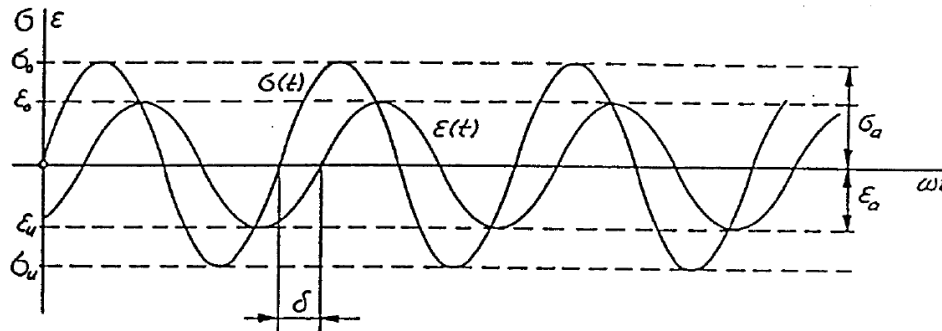
Zeitdehnlinien von PMMA unter Zugbeanspruchung (nach Menges):

- Einfluss von Belastungshöhe und Zeit auf Bildung, Länge und Anzahl von Fließzonen (Crazes)

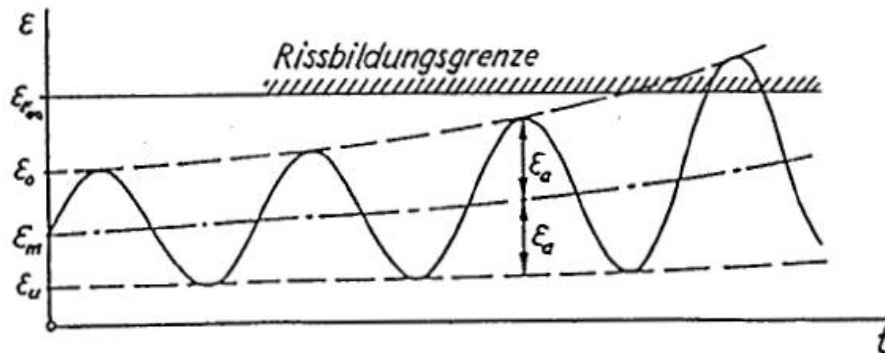


■ Versagenskriterium Rissbildung (Fließzonen, Crazes, Mikrorisse)

- auch bei schwingender Belastung relevant:



- Initialisierung der Schädigung bei erstmaligem Überschreiten der Fließgrenzdehnung:



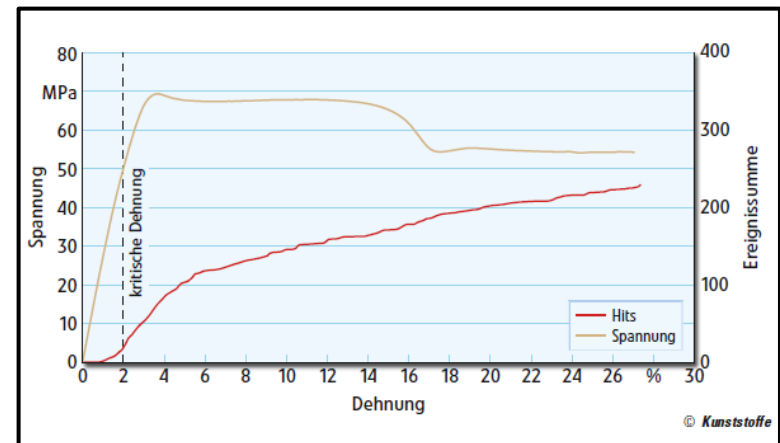
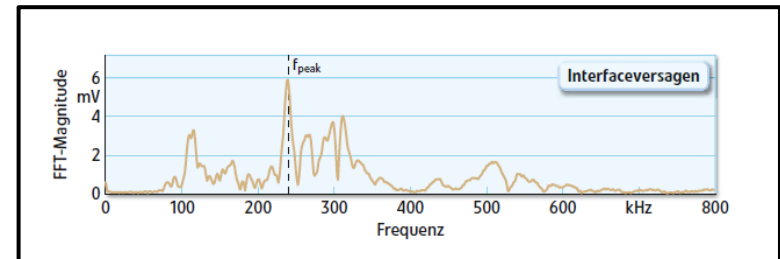
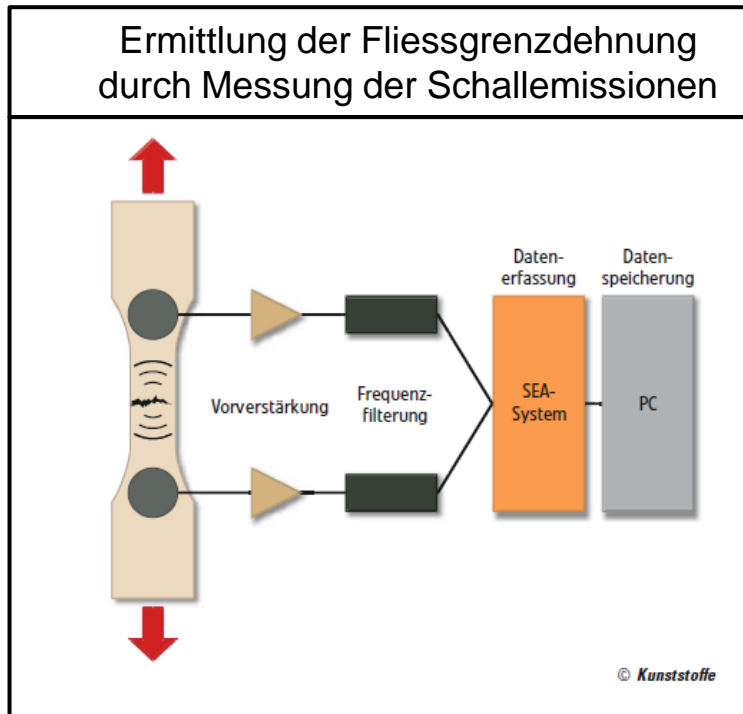
■ Fließgrenz- oder kritische Dehnung:

- korreliert – in Abhängigkeit der Kunststoffgruppen – mit ganz bestimmten Größenordnungen der makroskopischen Dehnungen [Menges]

Kunststoffgruppe	$\epsilon_{F_{\infty}}$ [%]
Thermoplaste, amorph	
- ungefüllt	0,6 ÷ 1,0
- gefüllt	0,3 ÷ 0,5
Thermoplaste, teilkristallin, steif	
- ungefüllt	2,0 ÷ 4,0
- gefüllt	1,0 ÷ 2,0
Thermoplaste, teilkristallin, weich	
- ungefüllt	3,0 ÷ 6,0
- gefüllt	2,0 ÷ 3,0
Thermoplaste, glasmattenverstärkt	0,2 ÷ 0,7
Elastomere, gefüllt	≈ 5,0
Duroplaste	
- unverstärkt	0,1 ÷ 0,2
- UD-verstärkt	0,05 ÷ 0,2

■ Fließgrenz- oder kritische Dehnung:

- Erweiterung der Datenbanken – neues Messprinzip vom IKT



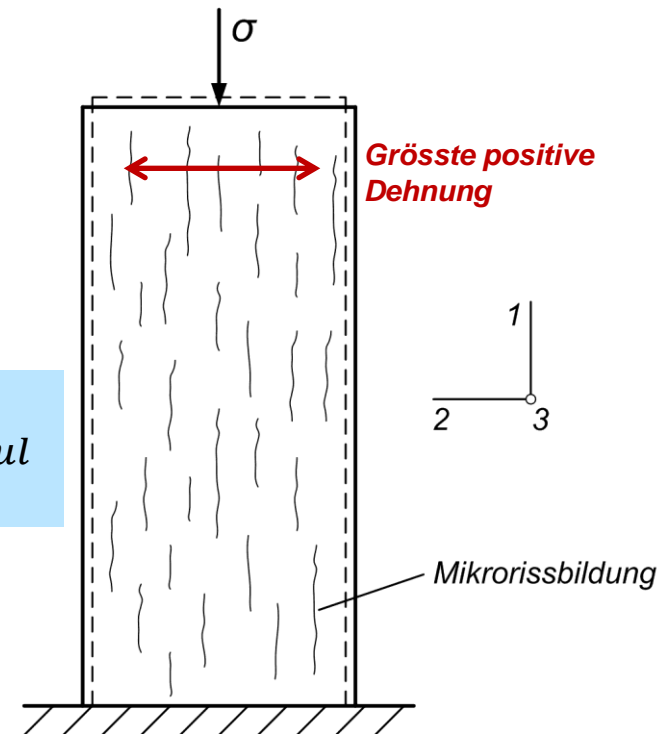
[Bonten, C.; Skrabala, O.: Kunststoffe 102(2012)9, S. 82-85]

■ Beispiel: Einachsige Druckbeanspruchung

- Mikrorissbildung senkrecht zur grössten positiven Dehnung, d.h. parallel zur Beanspruchungsrichtung
- Grösste positive Dehnung: quer zur Beanspruchungsrichtung

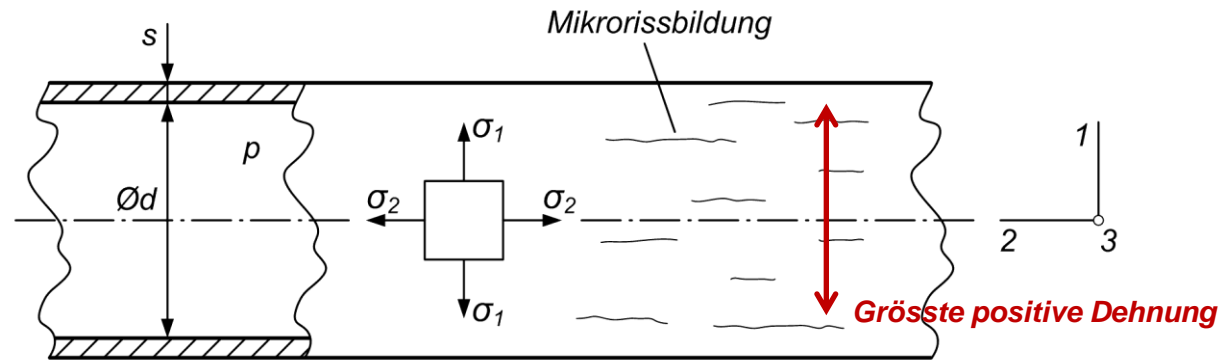
$$\varepsilon_{max} = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\mu \cdot \varepsilon_1 = -\mu \cdot \frac{\sigma_1}{E_{C1}} \leq \varepsilon_{zul}$$

- Werkstoff kann unter Druck stärker schädigungsfrei beansprucht werden als unter Zug



[Kunz, J.: Kunststoffe 101(2011)4, S. 50-54]

■ Beispiel: Rohr unter Innendruck



- Spannungszustand zweiachsig:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot d}{2 \cdot s} = 2 \cdot \sigma_2 \gg \sigma_3 \approx 0$$

- Grösste positive Dehnung in Umfangsrichtung:

$$\varepsilon_{max} = \varepsilon_1 = \varepsilon_{1e} - \mu \cdot \varepsilon_{2e} = \frac{p \cdot d}{2 \cdot s} \cdot \left(\frac{1}{E_{C1}} - \frac{\mu}{2 \cdot E_{C2}} \right) \leq \varepsilon_{zul}$$

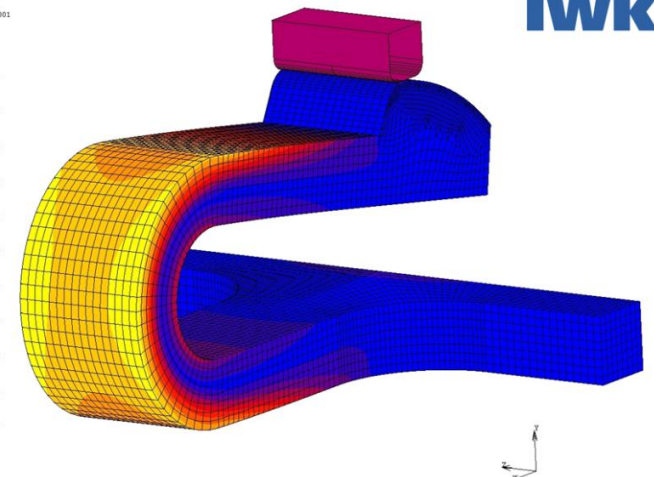
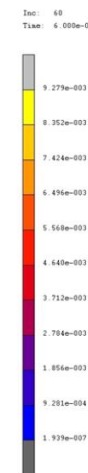
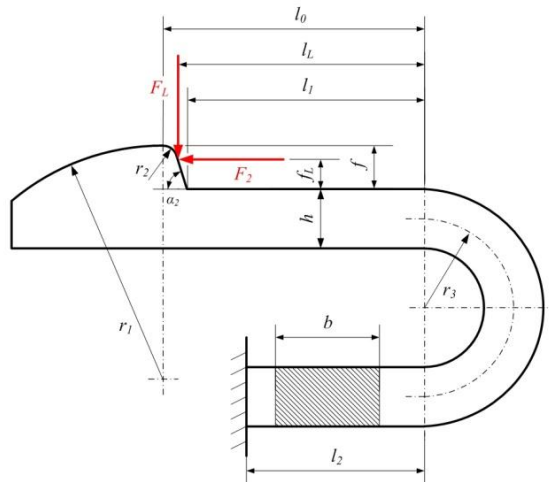
[Kunz, J.: Kunststoffe 101(2011)4, S. 50-54]

■ Denkbar einfaches Vorgehen:

- Festlegen der werkstoffmechanischen Beurteilungskriterien bzw. Versagensmechanismen, z.B. grösste positive Dehnung; Verformung
- Festlegen der massgebenden kritischen Dehnungswerte, z.B. Fließgrenzdehnung, gegebenenfalls Streck- oder Bruchdehnung
- **Preprocessing:** Bauteilgeometrie, Belastungen, Randbedingungen, Werkstoffeigenschaften (lineares oder nichtlineares Verhalten)
- **Postprocessing:** Auswertung der grössten positiven Dehnung anhand der relevanten Postvariablen; je nach Programm:
 - Maximum Principle Elastic Strain (Ansys)
 - Principle Total Strain Max (MSC.Marc-Mentat; im Preprocessing zu definieren)
- Interpretation und Beurteilung der Ergebnisse, ggf. Modellanpassungen

■ Beispiel: Gekröpfter Schnapphaken

- Grösste positive Dehnung auf Aussenseite des Übergangsbogens



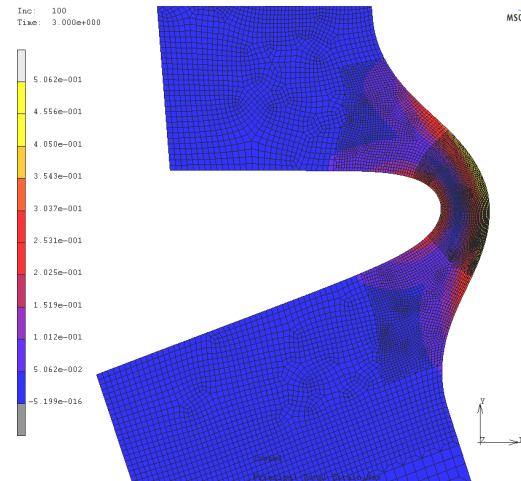
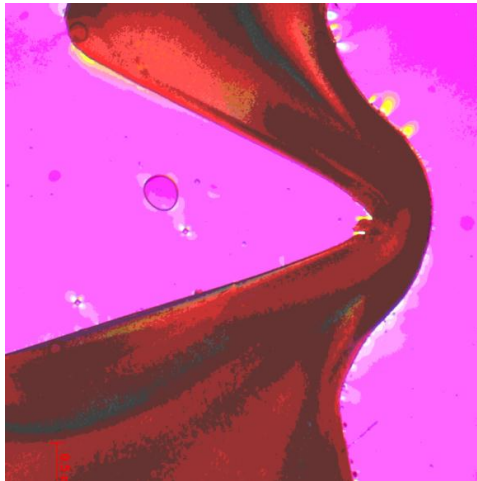
- Numerisch-analytische Auswertung:

$$\epsilon_{max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{f \cdot h}{(l_0 + r_3)^2} \cdot \left[1 - 0.2 \cdot \left(\frac{l_2}{l_1} \right)^{0.3} \right] \cdot \left[1 - 0.85 \cdot \left(\frac{r_3}{r_1} \right)^{0.23} \right]$$

[Kunz, J., Frei, R.: SwissPlastics 32(2010)7-8, S. 18-20+22]

■ Beispiel: Filmgelenk

- Grösste positive Dehnung auf Aussenseite



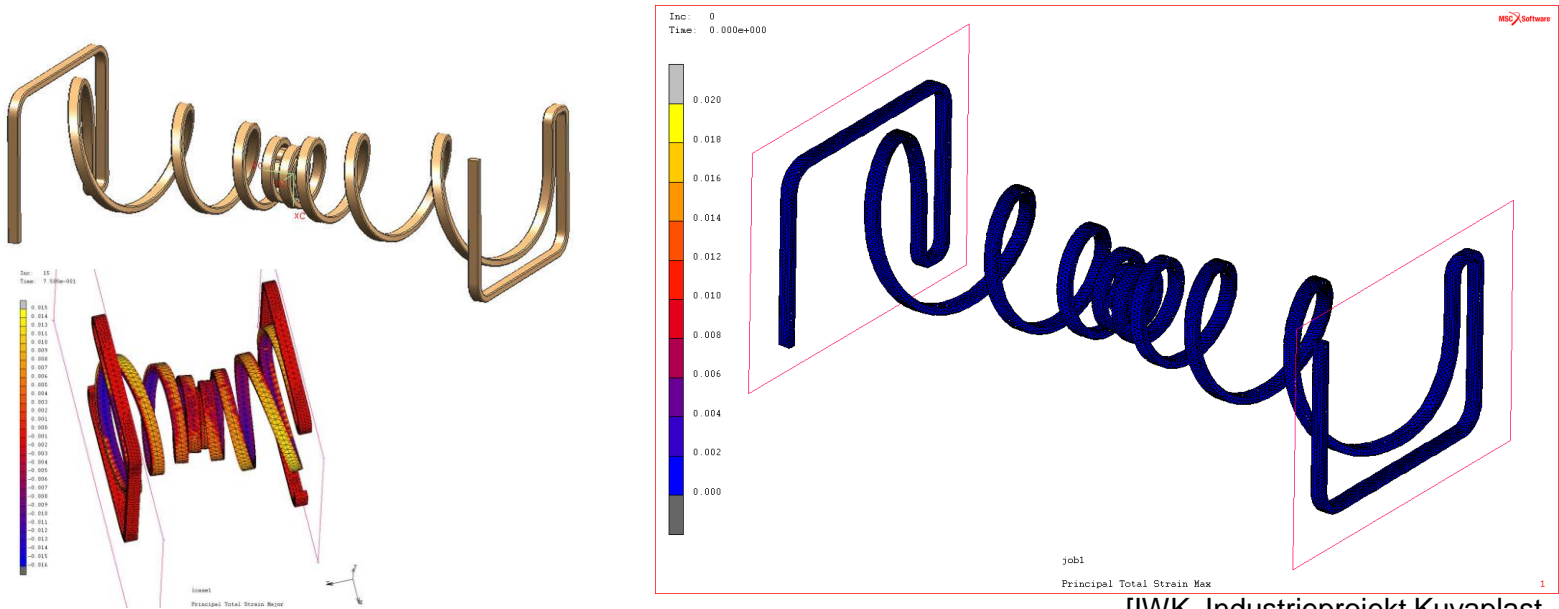
- Numerisch-analytische Auswertung:

$$\epsilon_b \approx \frac{h}{2 \cdot l^*} \cdot \beta = \frac{1}{\left(1.36 + 1.66 \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1 + \rho_2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{h}} + 1.5 \cdot \frac{l}{h}} \cdot \beta$$

[Kunz, J., Bachmann, S., Studer, M.: Kunststoffe 97(2007)12, S. 129-132]

■ Beispiel: Spritzgiessbare Spiralschraubenfeder

- **Auslegungsziel:** Optimale Geometrie für überall gleiche und möglichst geringe maximale Dehnung
- Vorgehen kombiniert analytisch-FEM-numerisch
- **Ergebnis:** Archimedische Spirale mit geeignet variierte Steigung (pat.)

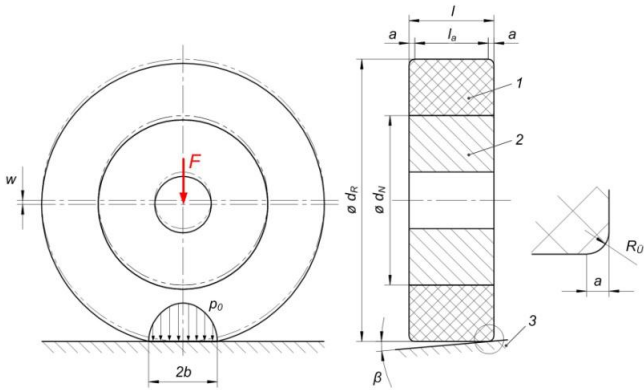


[IWK, Industrieprojekt Kuvaplast, 2009]

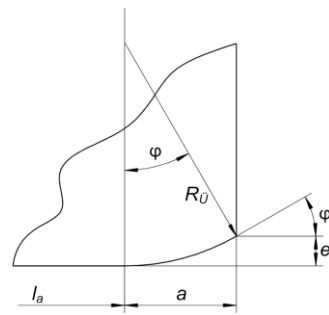
■ Beispiel: Profilloptimierung zylindrischer Laufrollen

- Ziel: Geometrie optimal, d.h. möglichst geringe max. positive Dehnung

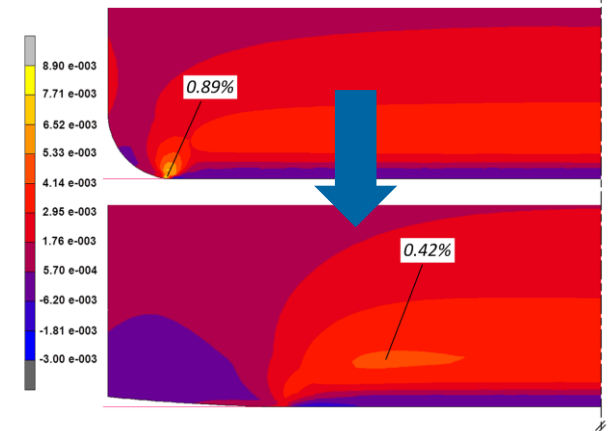
Ausgangslage



Optimierungsparameter



Ergebnis: Max. pos. Dehnung

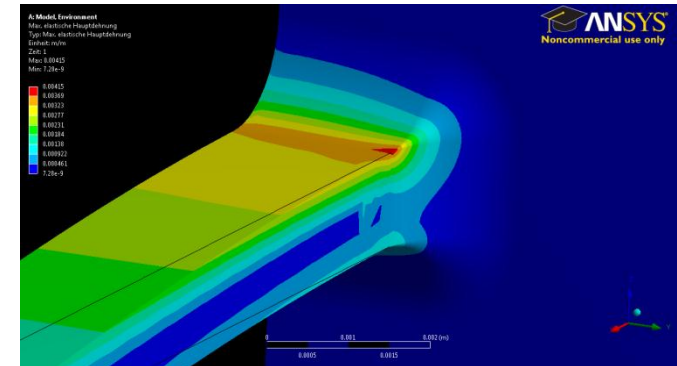
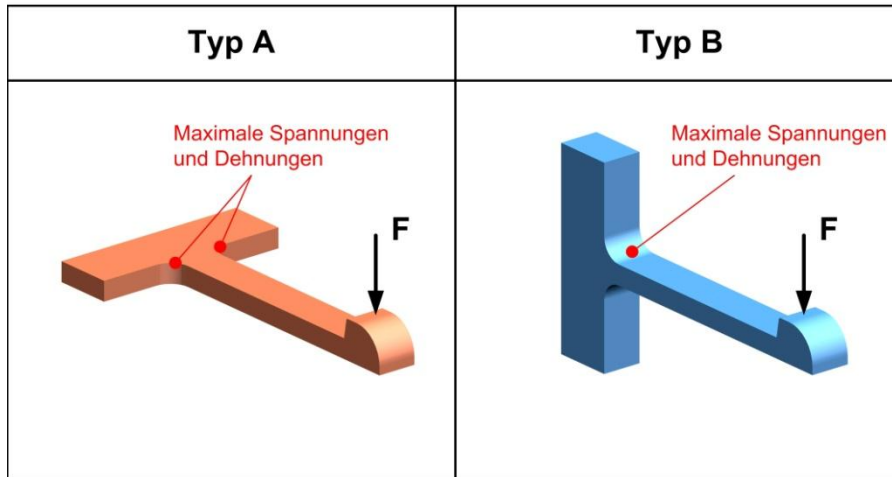


- Ergebnis: Optimierungsprozess, der zu deutlicher Reduktion der kontaktmechanischen Beanspruchung ohne und mit Verkantung führt

[Kunz, J., Peter, M.: KunststoffXtra 2(2012)5, S. 25-28]

■ Beispiel: Kerbwirkung bei der Anbindung von Schnapphaken

- Grösste positive Dehnung beim Beginn des Übergangsradius

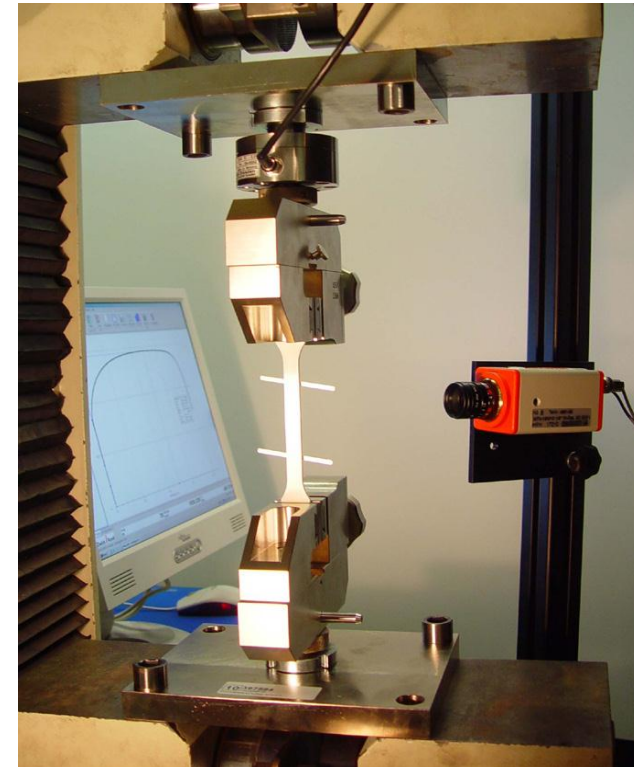


- Numerisch-analytische Auswertung (Anbindung A):

$$\epsilon_{max} = \alpha_{k\epsilon} \cdot \epsilon_n = \left[0.85 + 0.5 \cdot \left(\frac{r}{h} \right)^{-0.3} \right] \cdot \epsilon_n$$

[Kunz, J., Studer, M.: Kunststoffe 97(2007)7, S. 46-51]

- Dehnungsbezogene Auslegung erfasst das charakteristische Versagensverhalten der Kunststoffe besser
- Verformungen (und damit die Dehnungen) sind direkt sicht- und messbar, Kräfte (und damit die Spannungen) dagegen nicht
- Dehnungen sind die natürlicheren, anschaulicheren Größen als die Spannungen
- Dehnungsbezogene Auslegung in der Ingenieurausbildung bewusst lehren und in der Praxis konsequent anwenden auch bei FEM.....
- Anliegen an die Werkstoffprüfung: Dehnungs-Grenzwerte systematisch messen und in den Datenlisten dokumentieren



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Prof. Dipl.- Ing. Johannes Kunz
+41 (0)55 222 49 85
jkunz@hsr.ch

Dipl.-Ing. Mario Studer
+41 (0)55 222 48 63
mstuder@hsr.ch