HSR
HOCHSCHULE FÜR TECHNIK
RAPPERSWIL

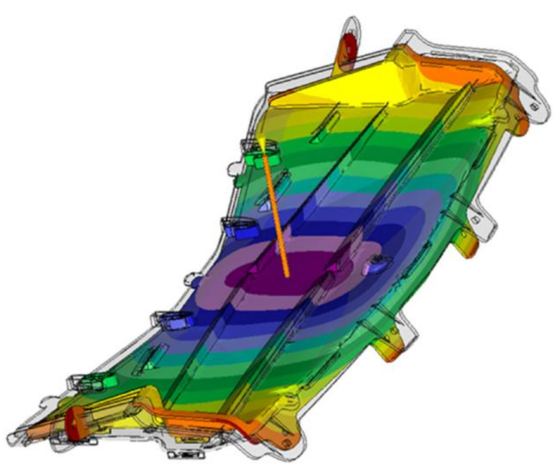
FHO Fachhochschule Ostschweiz

INSTITUT FÜR WERKSTOFFTECHNIK
UND KUNSTSTOFFVERARBEITUNG

Vortrag

Auslegung von Kunststoffbauteilen aufgrund kritischer Dehnungen

- ein Plädoyer



Prof. Johannes Kunz, IWK

Seminar Entwicklung von Kunststoffbauteilen

Auslegung von Kunststoffbauteilen aufgrund kritischer Dehnungen - ein Plädoyer

iwk INSTITUT FÜR WERKSTOFFTECHNIK UND KUNSTSTOFFVERARBEITUNG

Prof. Dipl.-Ing. Johannes Kunz
Institutspartner
Rapperswil, 9. Februar 2012

HSR HOCHSCHULE FÜR TECHNIK RAPPERSWIL
FHO Fachhochschule Ostschweiz

Übersicht

- Einleitung
- Festigkeitsbedingung
- Dehnungsbezogene Auslegung
- Dehnungen als werkstoffmechanische Versagensgrössen
- Kritische Dehnung – ein wichtiger Werkstoffkennwert
- Illustrative Beispiele und Anwendungen
- Dehnungen als Kriterium des Stabilitätsverhaltens
- Abschliessende Gedanken

Einleitung

- **Auslegung:**

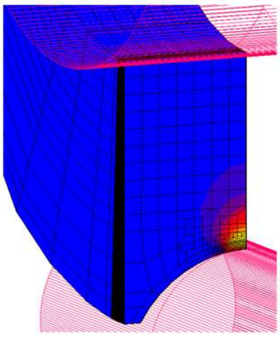
  Definition von Bauteilgeometrie und Werkstoff aufgrund der funktionellen Anforderungen und Betriebsbedingungen, insbesondere auch der mechanischen Beanspruchung

- **Festigkeitsrechnung im Zentrum**

- **Herkömmliche Auslegung:**
  Aufgrund zulässiger Spannungen

- **Festigkeitsbedingung:**

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



Festigkeitsbedingung

- **Auslegung aufgrund zulässiger Spannungen**

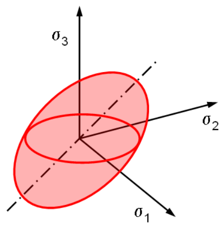
Festigkeitsbedingung:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{zul} = \sigma_G \cdot \frac{C}{S} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_V \leq \sigma_{zul} = \sigma_G \cdot \frac{C}{S}$$

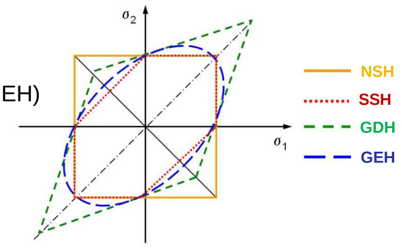
σ_{max}: Höchstspannung im Bauteil bei einachsigem Spannungszustand resp. einachsige Vergleichsspannung σ_V bei mehrachsigem Spannungszustand
σ_{zul}: Zulässige Spannung
σ_G: Spannungsgrenzwert für die Belastbarkeit des Werkstoffs
C: Einflussfaktor
S: Sicherheitsfaktor

- **Mehrachsiger Spannungszustand:**
  - Vergleichsspannung: Funktion der Hauptspannungen, je nach Festigkeitshypothese

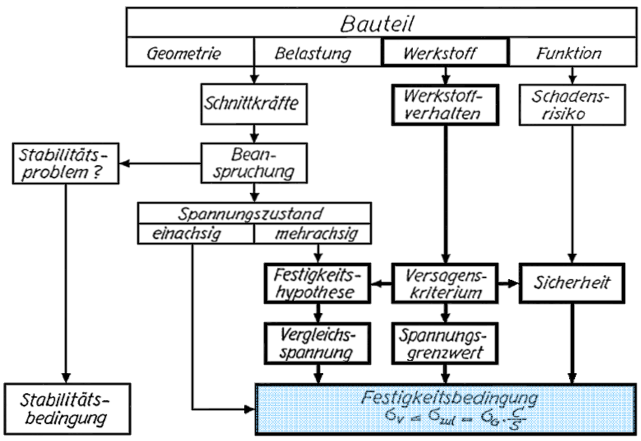
$$\sigma_V = \sigma_V(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$$



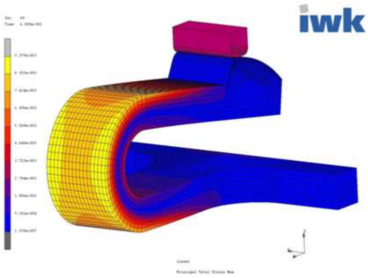
  - Normalspannungshypothese (NSH) (Coulomb)
  - Schubspannungshypothese (SSH) (Tresca, Mohr)
  - Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) (von Mises)
  - Grösstdehnungshypothese (GDH) (Navier)



- **Spannungsbezogene Festigkeitsrechnung: Schema**



- **Vorteile der dehnungsbezogenen Auslegung**
  - Dehnung bei Kunststoffteilen i. A. geeigneteres Kriterium als Spannung
  - Werkstoffmechanisch klare Versagenskriterien
  - Denken in Verformungen erleichtert das Erfassen des Kunststoffverhaltens unter mechanischer Belastung
  - Einfacherer Berechnungsvorgang



- **Grundlegende Erkenntnisse um 1970 durch Menges et al. am IKV Aachen**
  - Ingenieurmässige Festigkeitsrechnung für Spritzgussteile aus Thermoplasten. Kunststoffe 57(1967)1
  - Spannungsrisse bei Langzeit-Zugbeanspruchung von Kunststoffen. Kunststoffe 11(1967)11
  - Spannungsrissbildung und elastisch-plastisches Verformungsverhalten bei Langzeitbeanspruchung. Plastverarbeiter 19(1968)7
  - Kriterium „Kritische Stauchung". Kunststoff-Berater 14(1969)1
  - Denken in Verformungen erleichtert das Dimensionieren von Kunststoffteilen. VDI-Z 112(1970)6 u.10
  - Erleichtertes Verständnis des Werkstoffverhaltens bei verformungsbezogener Betrachtungsweise. Fortschritts-Bericht VDI Reihe 5, Nr. 12 (1971)
  - Das Verhalten von Kunststoffen unter Dehnung. Kunststoffe 63(1973)2 u.3
  - Verarbeitungs- und Umgebungseinflüsse auf die kritische Dehnung von Kunststoffen. Kunststoffe 64(1974)
  - Einfluss korrosiver Flüssigkeiten auf mechanisch beanspruchte Thermoplaste. Kunststoffe 64(1974)4
  - Dimensionierung von Kunststoffteilen auf Basis von kritischen Deformationen. Kunststoffe-Plastics 24(1977)8

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

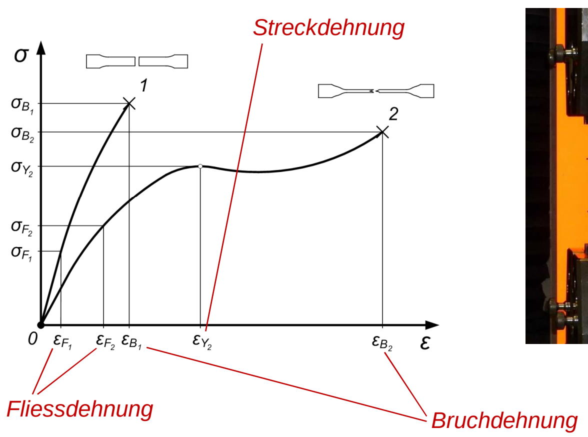
$$\varepsilon_{\max} = \max(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) \le \varepsilon_{zul} = \varepsilon_G \cdot \frac{C}{S}$$

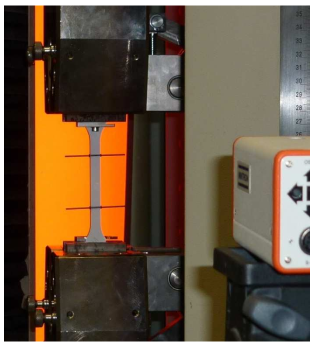
- **Bestimmung der maximalen Dehnung:**

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

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

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



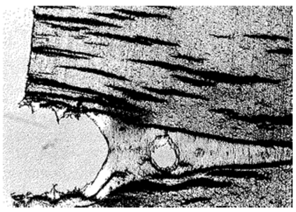


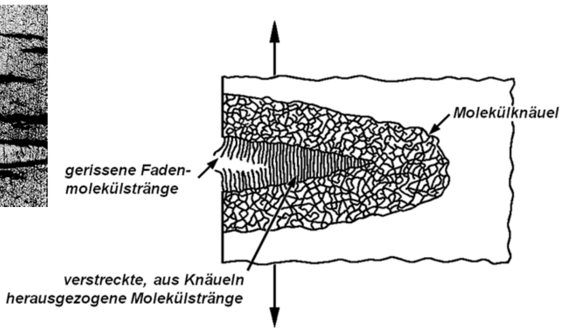
Dehnungen als werkstoffmechanische Versagensgrössen

- **Dehnungen als Versagenskriterien:**
  - **Bruchdehnung**
    ➡ bei sprödem Verhalten
  - **Streckdehnung**
    ➡ bei zähem Verhalten, z.B. zwecks Vermeiden von Verstreckungen und Weissbruch
  - **Fliess- bzw. Fliessgrenzdehnung**
    (Bildung von Fliesszonen, Crazes, Mikrorissen)
    ➡ für jedes Werkstoffverhalten, z. B. zwecks Vermeiden irreversibler Verformungen oder Beeinträchtigung der Lichtdurchlässigkeit

Dehnungen als werkstoffmechanische Versagensgrössen

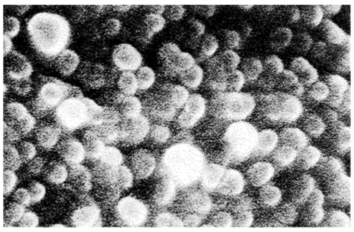
- **Craze: Fliesszone** (nach Kambour)

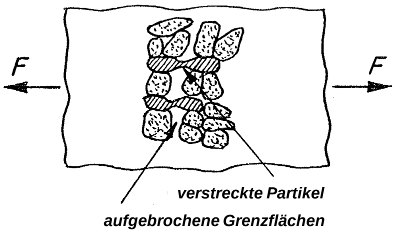




Dehnungen als werkstoffmechanische Versagensgrössen

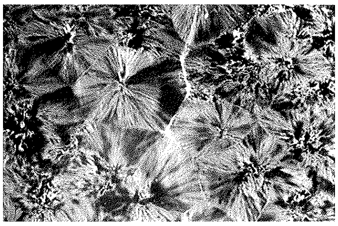
- **Amorphe Thermoplaste: Aufreissen von Partikel-Grenzflächen** (nach Menges)

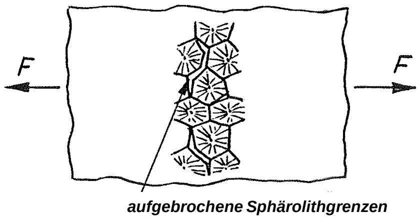




Dehnungen als werkstoffmechanische Versagensgrössen

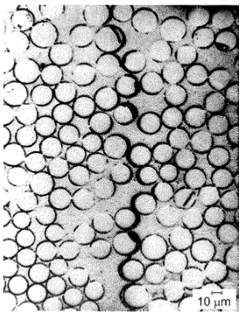
- **Teilkristalline Thermoplaste: Aufbrechen von Sphärolitgrenzen** (nach Menges und Alf)



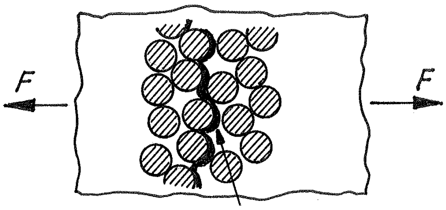


Dehnungen als werkstoffmechanische Versagensgrössen

- **Faserverbundkunststoffe (FVK) : Ablösung zwischen Faser und Matrix**



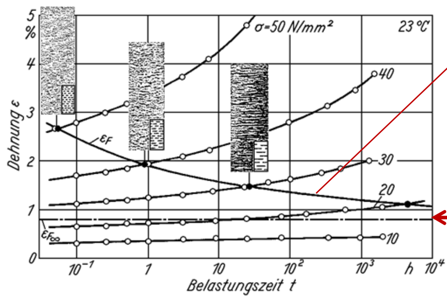
Ehrenstein



abgelöste Grenzflächen zwischen Fasern und Matrix

Kritische Dehnung – ein wichtiger Werkstoffkennwert

- **Versagenskriterium Rissbildung:**
  Zeitdehnlinien von PMMA unter Zugbeanspruchung (nach Menges):
  - Einfluss von Belastungshöhe und Zeit auf Bildung, Länge und Anzahl von Fliesszonen (Crazes)



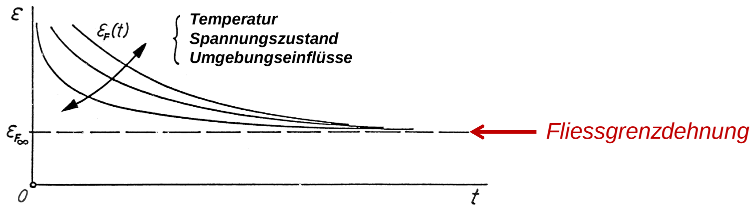
Fliessdehnung

Fliessgrenzdehnung

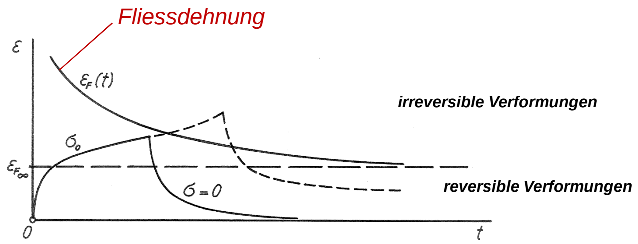
ε_F: Fliessdehnung: Dehnung beim ersten Auftreten von Crazes

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

- **Fliessgrenz- oder kritische Dehnung:**
  - in weiten Grenzen unabhängig von Belastungszeit, Temperatur, Spannungszustand, Umgebungseinflüssen

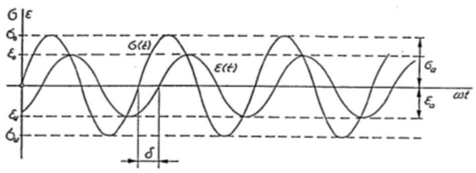


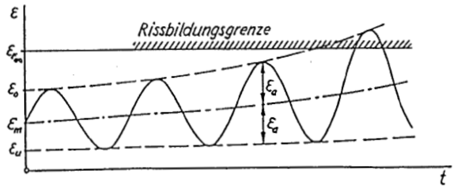
- **Fliessdehnung:**
  - Grenze zwischen reversiblen und irreversiblen Verformungen



Kritische Dehnung – ein wichtiger Werkstoffkennwert

- **Versagenskriterium Rissbildung:**
  - auch bei schwingender Belastung relevant





Kritische Dehnung – ein wichtiger Werkstoffkennwert

- **Fliessgrenz- oder kritische Dehnung:**
  - korreliert – in Abhängigkeit der Kunststoffgruppen – mit ganz bestimmten Grössenordnungen der makroskopischen Dehnungen

Kunststoffgruppe	$\varepsilon_{F\infty}$ [%]
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

Kritische Dehnung – ein wichtiger Werkstoffkennwert

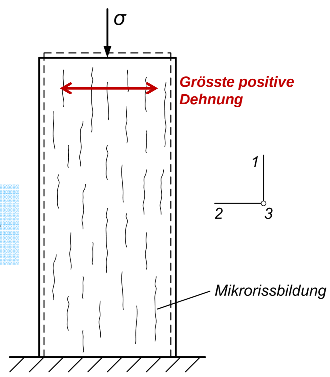
- **Fliessgrenz- oder kritische Dehnung:**
  - ist ein wahrer Werkstoffkennwert
  - ist in weiten Grenzen unabhängig von Belastungszeit, Temperatur, Spannungszustand, Umgebungseinflüssen
  - korreliert – in Abhängigkeit der Kunststoffgruppen – mit ganz bestimmten Grössenordnungen der makroskopischen Dehnungen
  - bildet die Grenze zwischen reversiblen und irreversiblen Verformungen
  - ist auch bei schwingender Belastung relevant

Illustrative Beispiele und Anwendungen

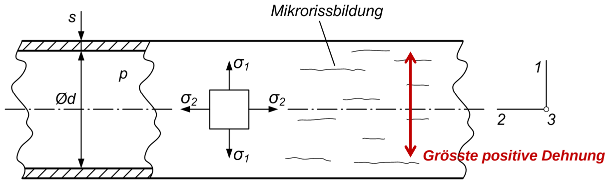
- **Beispiel: Einachsige Druckbeanspruchung**
  - Mikrorissbildung senkrecht zur grössten positiven Dehnung, d.h. parallel zur Beanspruchungsrichtung
  - Grösste positive Dehnung:
    quer zur Beanspruchungsrichtung

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

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



Beispiel: Rohr unter Innendruck



- Spannungszustand zweiachsig:

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

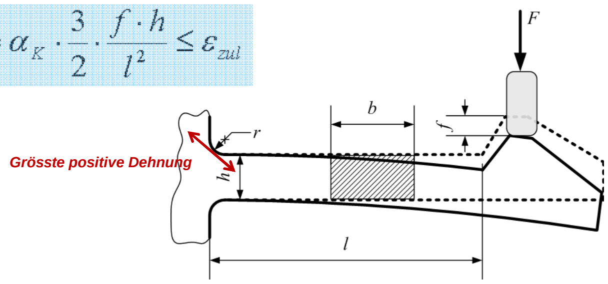
- Grösste positive Dehnung in Umfangsrichtung:

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

Beispiel: Schnapphaken

- Grösste positive Dehnung auf Zugseite der Anbindung: Kerbwirkung beachten!

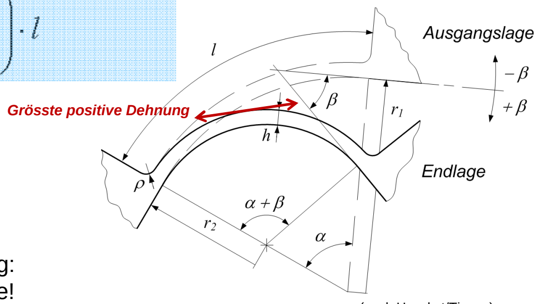
$$\varepsilon_{\max} = \alpha_K \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{f \cdot h}{l^2} \leq \varepsilon_{zul}$$



- Grösste positive Dehnung: rein geometrische Grösse!

- **Beispiel: Filmgelenk**
  - Grösste positive Dehnung auf Zugseite des Filmgelenks
    Kerbwirkung beachten!

$$\varepsilon_{\max} = \frac{h}{2 \cdot \left(1 + \frac{h}{2 \cdot r_1}\right) \cdot l} \cdot \beta \leq \varepsilon_{zul}$$

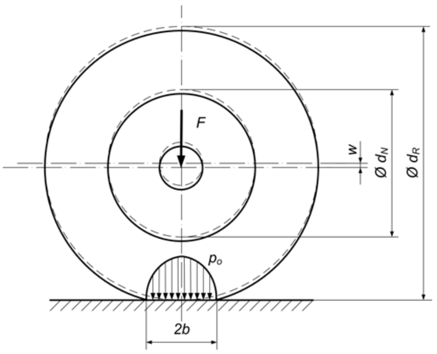


  - Grösste positive Dehnung:
    rein geometrische Grösse!

- **Beispiel: Laufmantelrolle**
  - Kompromiss zwischen möglichst hoher Belastbarkeit und möglichst kurzfristiger, vollständiger Rückverformung: Erfahrungsformel

$$\bar{\varepsilon} \approx 3 \cdot \frac{w}{d_R - d_N} \leq \varepsilon_{zul}$$

  - Abplattung w:
    - nimmt zeitabhängig zu
    - hängt auch von der Geometrie des Profils ab

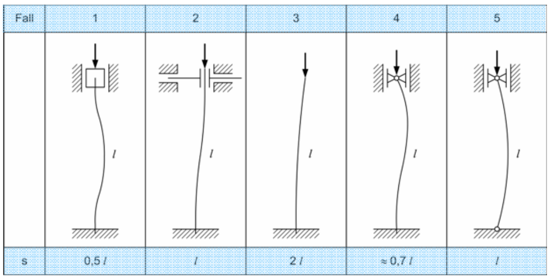


Knicken schlanker Stäbe unter Druck: Euler-Theorie

- Knickkraft: Übergang vom stabilen zum instabilen Gleichgewicht

$$F_K = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{s^2}$$

- Knickfälle; freie Knicklänge s:



Knicken schlanker Stäbe unter Druck: Dehnungsbezogene Betrachtung

- Kritische Dehnung beim Übergang vom stabilen zum instabilen Gleichgewicht: werkstoffunabhängig, rein geometrisch bestimmt!

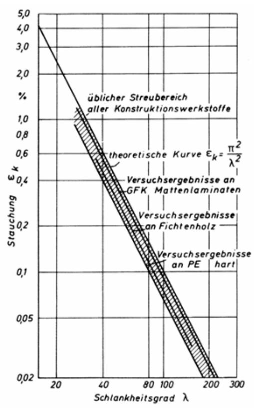
$$\varepsilon_K = \frac{\sigma_K}{E} = \frac{F_K}{E \cdot A} = \pi^2 \cdot \frac{I}{s^2 \cdot A} = \frac{\pi^2}{\lambda^2}$$

- Schlankheitsgrad:

$$\lambda = s \cdot \sqrt{\frac{A}{I}}$$

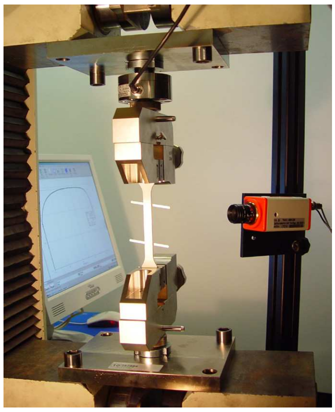
- Stabilitätsbedingung:

$$|\varepsilon| \le \varepsilon_{zul} = \varepsilon_K \cdot \frac{C}{S_K}$$



Abschliessende Gedanken

- 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, anschau-licheren Grössen als die Spannungen
- Dehnungsbezogene Auslegung in der Ingenieurausbildung bewusst lehren und in der Praxis konsequent anwenden



- Anliegen an die Werkstoffprüfung: Dehnungs-Grenzwerte systematisch messen und in den Datenlisten dokumentieren

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Auslegung von Kunststoffbauteilen aufgrund kritischer Dehnungen
- ein Plädoyer

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