

# Methoden des regelkonformen vereinfachten Ermüdungs- und Ratcheting-Nachweises

Workshop „Vereinfachte Ermüdungsnachweise“  
Erlangen, 20.06.2008

Hartwig Hübel  
FH Lausitz, Cottbus

# Forderungen KTA 3201.2 - vereinfachter Ermüdungsnachweis -

vereinfachte elast.-plast. Ermüdungsanalyse nach  
Abschnitt 7.8.4

(identisch mit komp.spezif. Analysen 8.3 und 8.4):

- ASME-Faktor  $K_e$
- dabei Definition:  $K_e = \varepsilon^{\text{el-pl}} / \varepsilon^{\text{fel}}$  bzw.  $\Delta\varepsilon^{\text{el-pl}} / \Delta\varepsilon^{\text{fel}}$
- basiert auf einzelnen Lastpaaren
- nur zulässig, wenn  $S_n > 3S_m$ , aber  $S_{n,\text{mechan}} < 3S_m$

Öffnungsklausel Abschnitt 7.8.1.2 (1)c:

„Anstelle dieses  $K_e$ -Wertes dürfen auch experimentell oder rechnerisch belegte oder aus der Literatur entnommene Werte verwendet werden. Die Anwendbarkeit ist zu zeigen.“

→ auch andere Methoden zur Bestimmung von  $K_e$  sind prinzipiell zulässig

# Inhalts-Übersicht

→ Teil A: wovon hängt  $K_e$  ab?

Teil B: Geschichte des ASME-Faktors  $K_e$

Teil C: alternative Methoden zur Bestimmung von  $K_e$

---

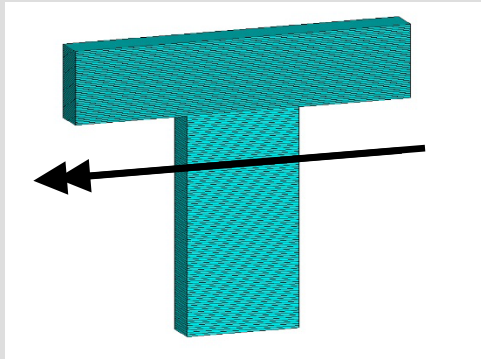
Teil D: Ratcheting-Nachweis nach KTA

Teil E: alternative Methoden für vereinfachte  
Ratcheting-Nachweise

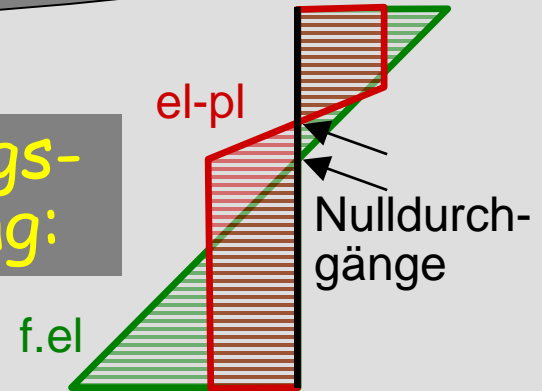
Zusammenfassung

# Verteilung von $K_e$ im Bauteil am Bsp. T-Profil

reine Biegung:

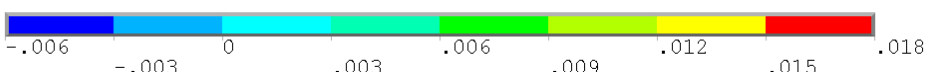
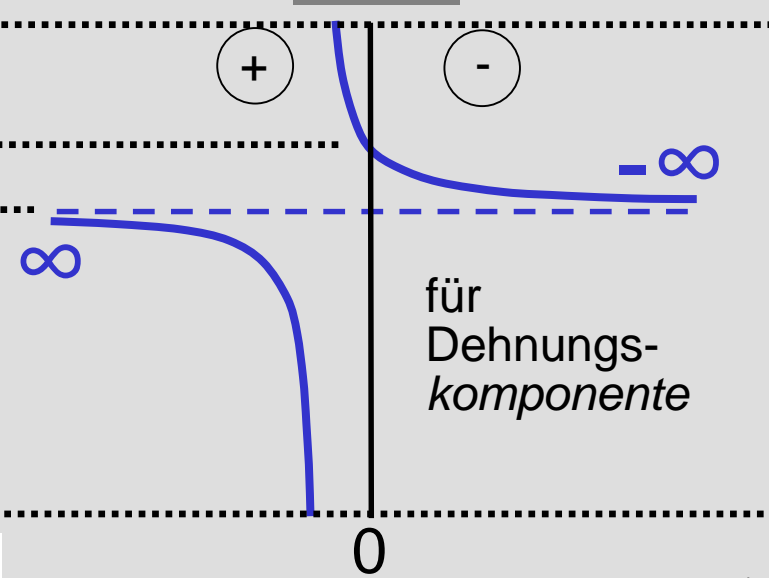
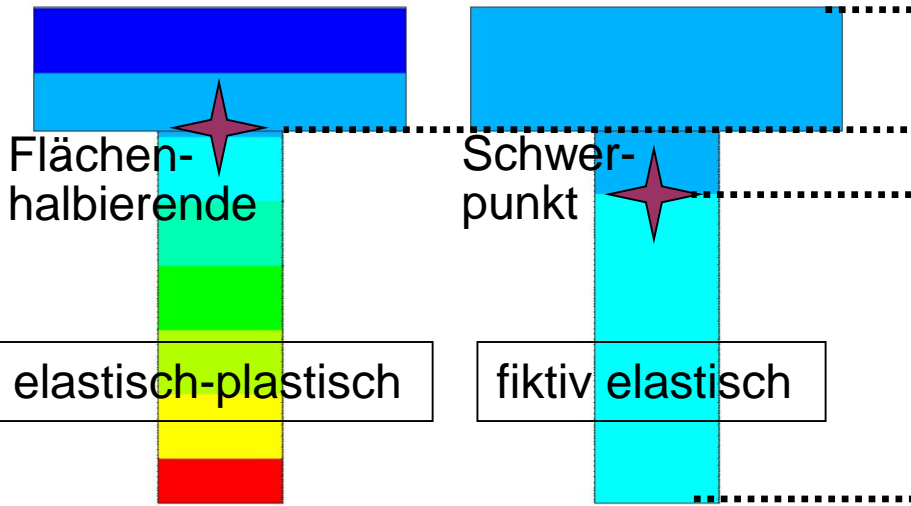


Spannungsverteilung:

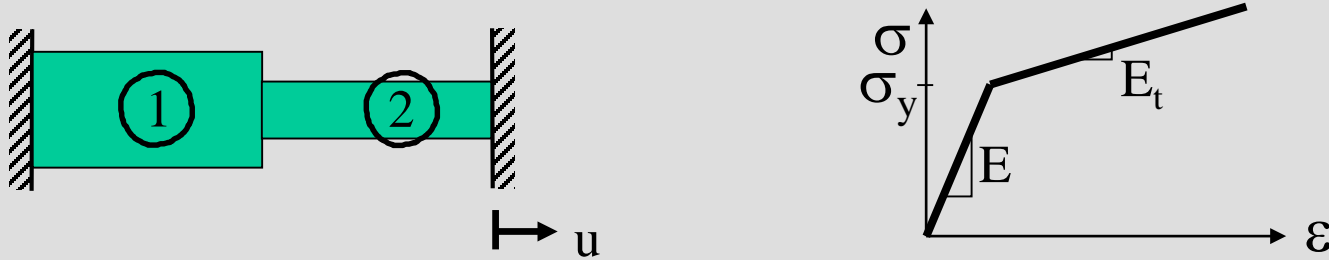


Dehnungen:

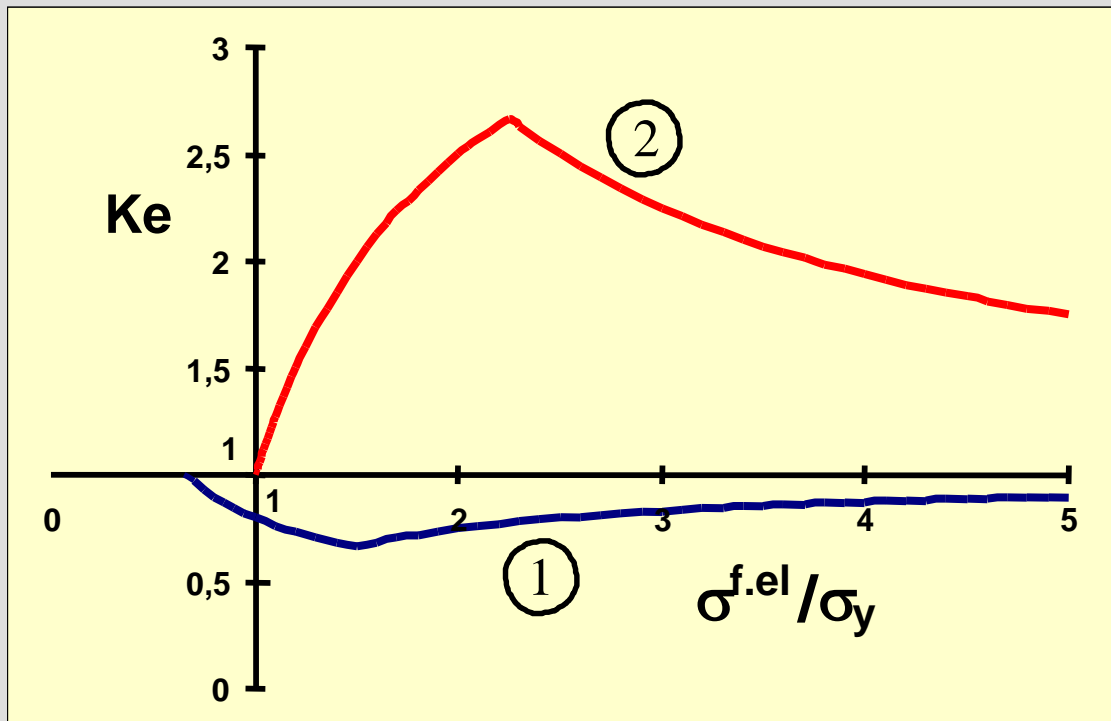
$K_e$ :



# Abhängigkeit von $K_e$ vom Belastungsniveau am Bsp. Zweistab-Modell



für bestimmte Geometrie- und Werkstoffdaten:



# Eigenschaften von $K_e$

$K_e = -\infty \div +\infty$  (bei Bezug auf Vergleichsdehnungen  $0 \div +\infty$ )

- nicht nur bei kraft-, sondern auch bei weggesteu. Belastung
- nicht nur bei ideal plast., sondern auch bei verfest. Werkstoff
- nicht nur bei  $\infty$  hoher, sondern schon bei mäßiger Belastung

$K_e \neq 1$  selbst in elastischen Tragwerksteilen

$K_e$  steigt nicht unbedingt mit steigender Beanspruchung

$K_e$  hängt ab von:

- Bauteilgeometrie
- Belastungsart
- Belastungsniveau
- betrachtetem Ort im Bauteil
- Werkstoffverfestigung

beachte:

- ein großer Wert von  $K_e$  bedeutet nicht unbedingt auch hohe Beanspruchung
- hoch beanspruchte Stellen im Bauteil haben  $K_e > 1$

# Inhalts-Übersicht

Teil A: wovon hängt  $K_e$  ab?

→ Teil B: Geschichte des ASME-Faktors  $K_e$

Teil C: alternative Methoden zur Bestimmung von  $K_e$

---

Teil D: Ratcheting-Nachweis nach KTA

Teil E: alternative Methoden für vereinfachte  
Ratcheting-Nachweise

Zusammenfassung

# Basis des ASME-Faktors $K_e$

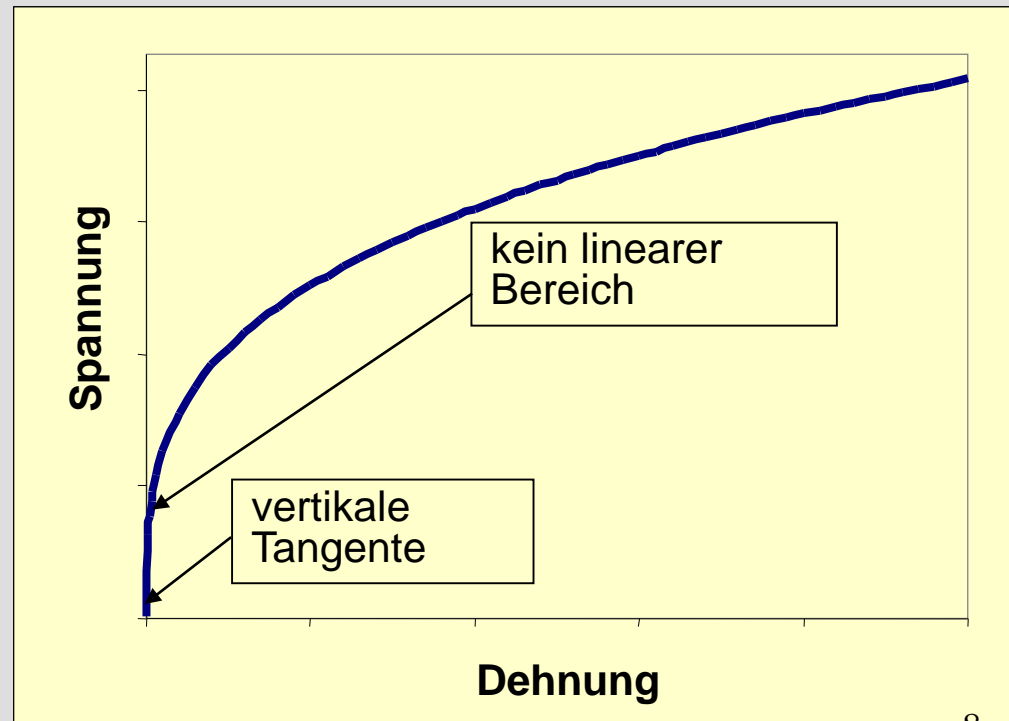
Arbeiten:

- von Tagart, Radomski und White, Langer
- 1968-1969

Werkstoffgesetz:

$$\sigma = A \varepsilon^n \text{ (Potenzgesetz)}$$

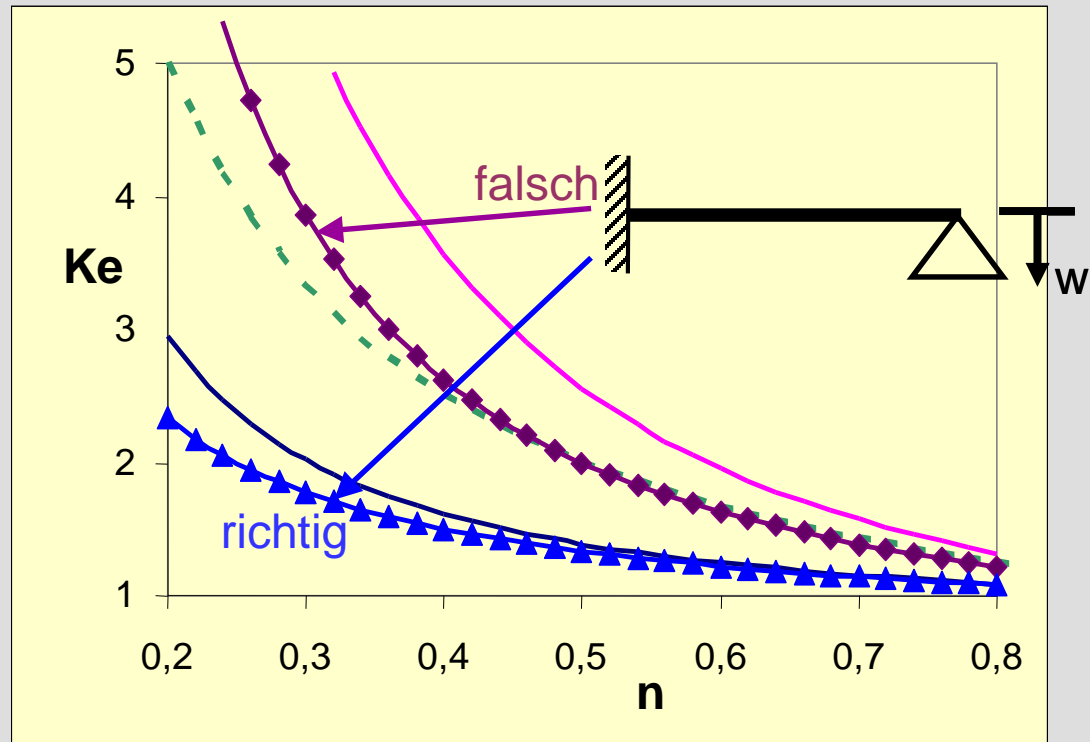
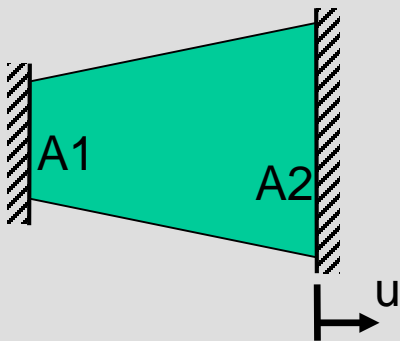
→  $0 < n < 1$   
→ keine Fließfläche





# Beschränkung des ASME-Ke auf $1/n$

Zugstab veränderlicher Querschnittsfläche  
(nur Steifigkeitsverteilung, kein Kerbeffekt):



$Ke = 1/n$  ungefähr die Mitte zwischen  $A_2/A_1=2$  und 10

scheinbare Bestätigung durch Kragarm weggesteuert,  
aber Rechenfehler (falsch integriert)!

# Abhängigkeit des ASME-Faktors $K_e$ vom Belastungsniveau

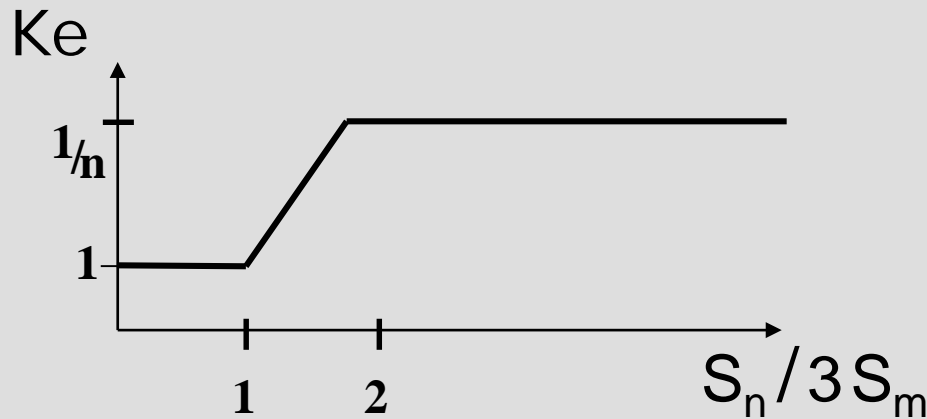
Potenzgesetz:  $K_e$  theoretisch unabhängig vom Belastungsniveau (bei betrachtetem Zugstab und Kragarm)

„künstliche“ Abhängigkeit eingeführt:

$K_e$  abhängig von  $\Delta\sigma^{f.el} / 2\sigma_y \rightarrow S_n / 3S_m \rightarrow$  keine Kerbeffekte ( $S_p$ )!

zunächst willkürliche Festsetzung:

linearer Anstieg von  $K_e = 1$  bis  $1/n$  im Bereich  $S_n / 3S_m = 1$  bis 2



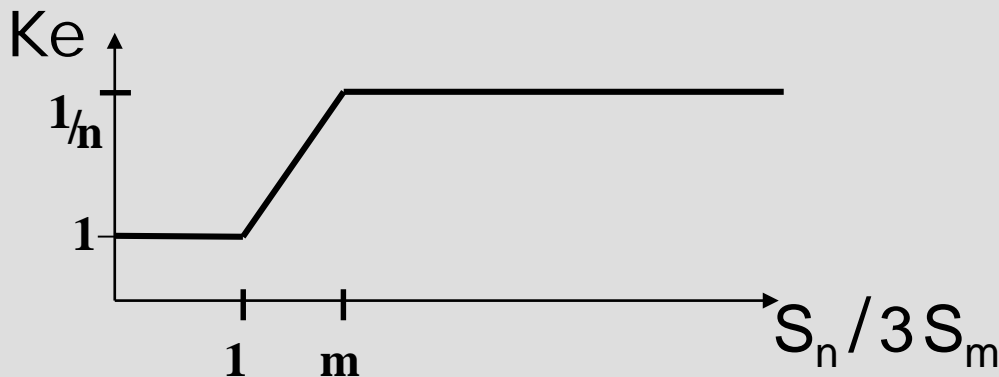
da für Austenit (zunächst)  $n=0,5$  angegeben:

→ Steigung identisch mit der bei **spannungsgesteuerter** Belastung!

# Abhängigkeit des ASME-Faktors $K_e$ vom Belastungsniveau (2)

später Modifikation der Steigung durch Einführung eines zweiten Werkstoffparameters „m“ ( $m \neq 2$ ):

- keine physikalische Begründung
- Zweck: geringerer Unterschied zu Nuclear Power Piping Code USAS B31.7; dabei sind ohne Kerbe (also  $S_p = S_n$ ) bei  $n=0,5$  die Steigungen bei  $m=2$  identisch
- der Unterschied zum USAS B31.7 beruht also auf der unterschiedlichen Erfassung von **Kerbefekten**  
→ mit Werkstoff-Parameter  $m$  nicht zu erfassen
- für Austenit:  $m=1,7$  gewählt  
→ stärkere Steigung als bei Spannungssteuerung!



später für Austenit:  
 $n=0,5 \rightarrow 0,3$

# Zusammenfassung Grundlage des ASME-Faktors $K_e$

ASME-Faktor  $K_e$  basiert u.a. auf:

- Potenzgesetz ohne elastischen Bereich
- willkürlich praxisferner Struktur
- Rechenfehler
- nur pragmatisch festgesetzten Werten  $n$  und  $m$

Ergebnis:

- ASME-Faktor  $K_e$  mechanisch nicht fundiert
- spiegelt die maßgebenden Einflussgrößen nicht wider
- mitunter über- oder un-konservativ

# Inhalts-Übersicht

Teil A: wovon hängt  $K_e$  ab?

Teil B: Geschichte des ASME-Faktors  $K_e$

→ Teil C: alternative Methoden zur Bestimmung von  $K_e$

---

Teil D: Ratcheting-Nachweis nach KTA

Teil E: alternative Methoden für vereinfachte Ratcheting-Nachweise

Zusammenfassung

# einige alternative Methoden zur Bestimmung von Ke

wg. der Öffnungsklausel Abschnitt 7.8.1.2 (1)c:  
prinzipiell sind auch andere Methoden regelwerks-  
konform

Auswahl (zur Erfassung individueller BT-Geometrie und Belastung):

- Hübel
- Roche
- Seshadri/GLOSS
- Zarka

# Vorschlag von Hübel

Vorschlag von 1985 (und 1994 für Zitierfähigkeit in KTA 3201.2):

3 Faktoren:

- $K_v$  für Querdehn-Effekte
- $K_{\varepsilon l}$  für lokale Kerb-Effekte
- $K_{\varepsilon g}$  für globale Struktur-Effekte

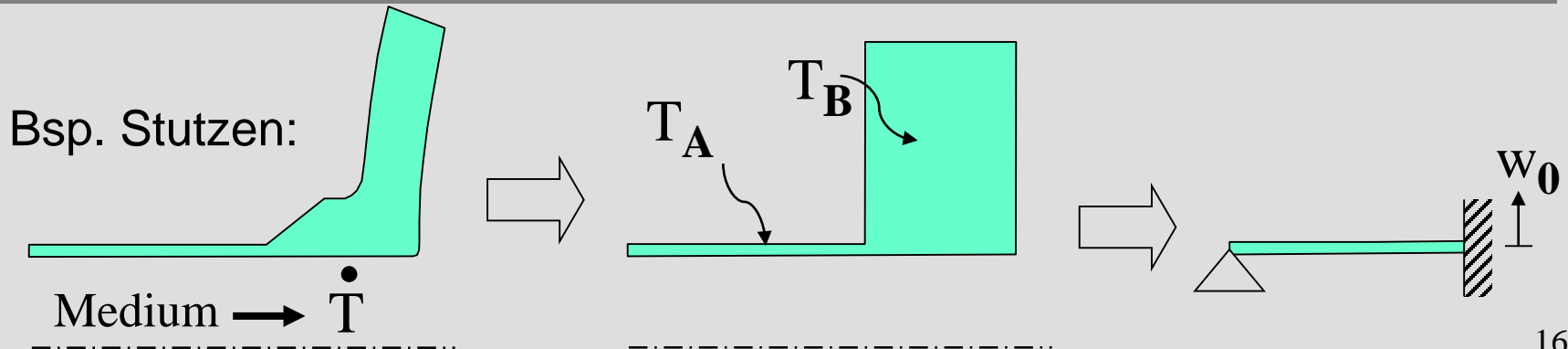
- jeweils getrennt voneinander bestimmen
- unter Berücksichtigung von Verfestigung
- auf Basis von  $S_p$
- wenn im Anwendungsfall keiner dieser 3 Faktoren ausgeschlossen werden kann:  $K_e = \max \{K_v, K_{\varepsilon l}, K_{\varepsilon g}\}$

# Vorschlag von Hübel (2)

$K_v$  :  
bei dehnungsgesteuerter Belastung; z.B. Zylinder mit  
zyklischem radialen Temperaturgradient  
( $K_v = 1 \dots 1,4$  abh. von  $\nu$  und  $S_p$  und Verfestigung)

$K_{\varepsilon l}$  :  
Neuber-Methode ( $K_{\varepsilon l} = 1 \dots \infty$  abh. von  $S_p$  und Verfest.)

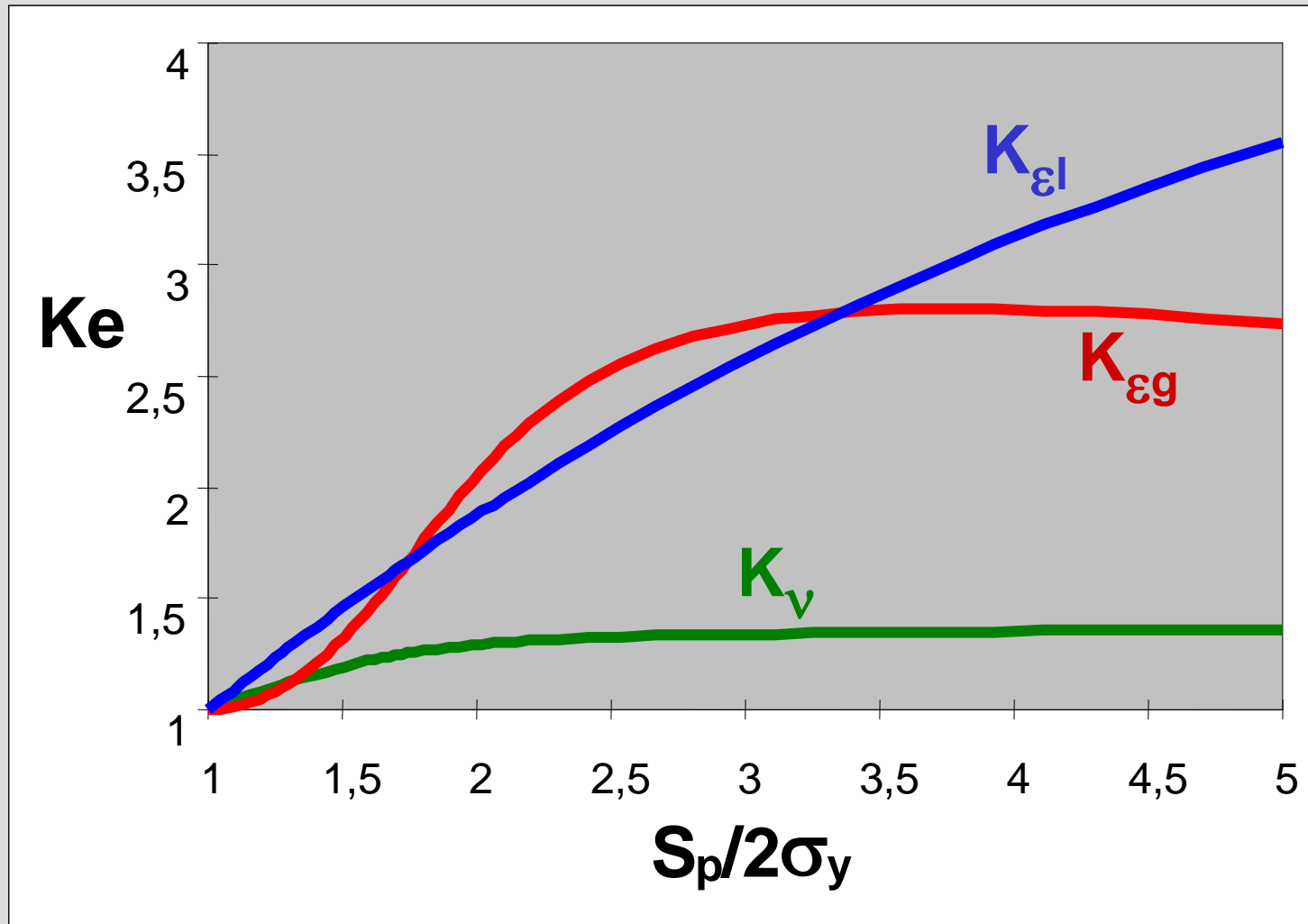
$K_{\varepsilon g}$  :  
aus Katalog für BT-Geometrie und Belastungsart  
z.B. deckt Kragarm unter weggesteuerter Belastung  
eine Reihe von Auslegungssituationen konservativ ab:





# Vorschlag von Hübel (3)

z.B. für lineare kinem. Verfestigung mit  $C/E=0,025$ :



# Vorschlag von Roche

Vorschlag von 1986: gewisse Ähnlichkeit mit Vorschlag von Hübel, aber viele Unterschiede im Detail

3 Faktoren:

- $K_v$  für Querdehn-Effekte
- $K_{e2}$  für Spannungsumlagerungen im Querschnitt und lokale Kerb-Effekte
- $K_{e1}$  für globale Effekte, aber nur gleichmäßige Reduktion der Schnittgrößen (keine Umlagerungen!)

Überlagerung:  $K_e = K_{e1} K_{e2}$

- $K_v$  abh. vom Verhältnis der Dehnungskomponenten zueinander,  $K_v = 1 \dots 1,61$
- $K_{e2}$  auf Basis Neuber-Ansatz, aber mit mehreren Modifikationen (z.B. J-Integral; abh. von  $K_{e1}$ )

# Vorschlag von Roche (2)

-  $K_{e1}$  auf Basis der Kachanov-Hypothese:

$$\sigma_{(x,y,z)} = \varphi \sigma_{(x,y,z)}^{f.el} ; \text{ mit } \varphi \neq \varphi_{(x,y,z)}$$

daher als Werkstoffgesetz nur **Ramberg-Osgood-Gesetz** zulässig:

$$\varepsilon = \sigma/E + B\sigma^n$$

→ Verfestigung, aber keine Fließfläche

→  $K_e > 1$  sobald  $S_n > 0$

dann  $\varphi$  iterativ bestimmen aus:

$$T(\varphi - 1) + \varphi^n = 0$$

$$T = \frac{1}{EB} \frac{\int (\sigma_{(x,y,z)}^{f.el})^2 dV}{\int (\sigma_{(x,y,z)}^{f.el})^{1+n} dV}$$

$K_{e1}$  ergibt sich dann zu:

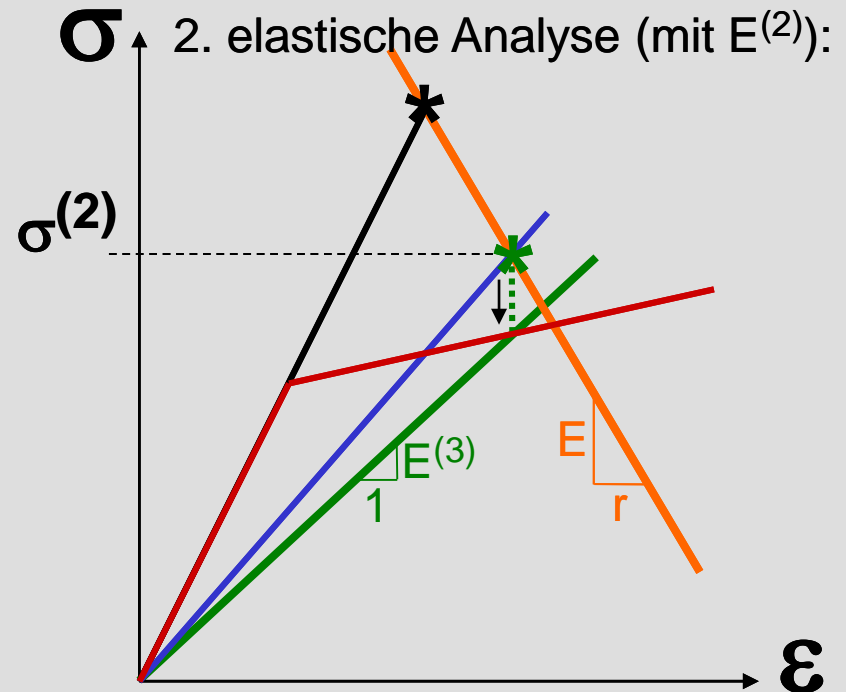
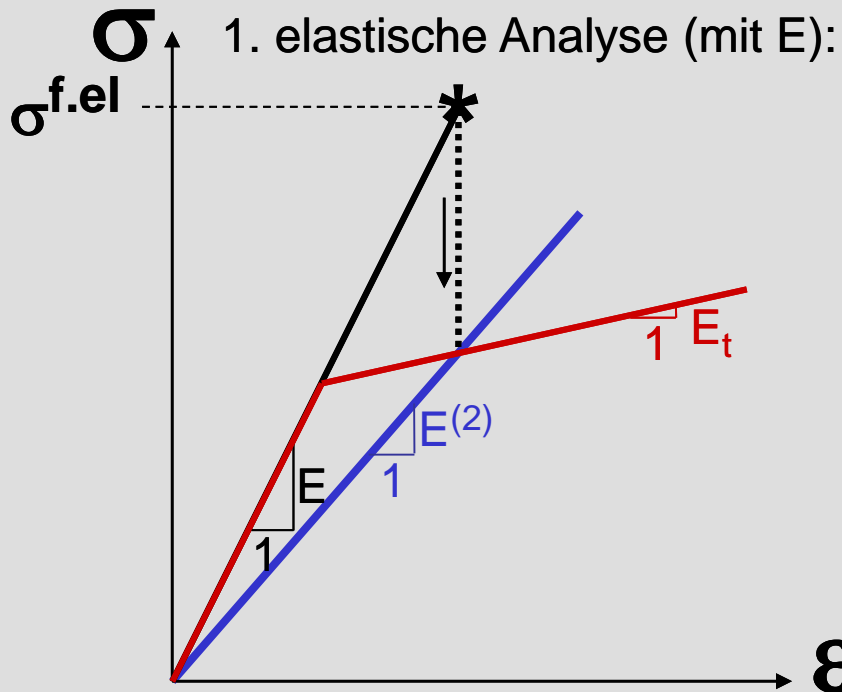
$$K_{e1(x,y,z)} = 1 + \left( \frac{EB T}{(\sigma_{(x,y,z)}^{f.el})^{1-n}} - 1 \right) (1 - \varphi)$$

# Vorschlag von Seshadri

Vorschlag von 1990: GLOSS-Methode (generalised local stress strain)

Serie modifizierter elastischer Analysen;  
dabei wird in  $V_p$  der E-Modul geändert  
→ elastic follow-up Parameter "r";

z.B. bei bilinearem  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm:

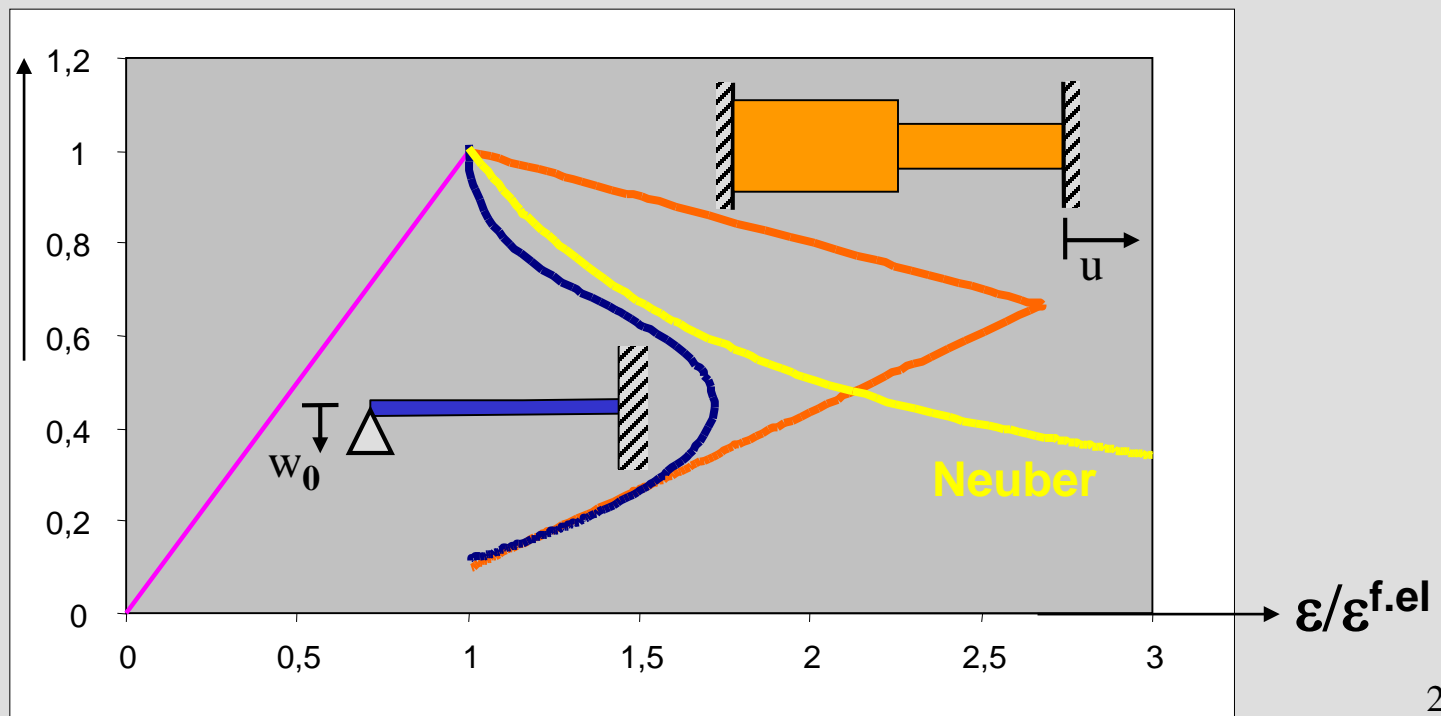


# Vorschlag von Seshadri (2)

am effektivsten (d.h. gute Näherung mit nur wenigen modifiziert elastischen Analysen), wenn „r“ nur schwach abhängig vom Belastungsniveau

dies ist aber nicht unbedingt der Fall  
→ siehe z.B. exakte Lösung für Zweistab-Modell und Kragarm unter weggesteuerter Belastung:

$\sigma/\sigma^{f.el}$



z.B. bei  $E_+/E=0,1$ :

# Vorschlag von Zarka

## Vorschlag von 1979

- Serie modifizierter elastischer Analysen (Modifikationen von  $E$ ,  $\nu$ , Belastung)
- bei 1-achsiger Spannung immer exakt
- seit 1985 in RCC-MR implementiert
- theoretisch am besten fundiert
- einzige der hier betrachteten Methoden mit Ausbaupotential hinsichtlich Ratcheting-Nachweis

→ später mehr

es gibt noch weitere in Frage kommende und theoretisch gut basierte Methoden, z.B. LA.T.IN (=Large time increment) von Ladeveze

# Zusammenfassung zu Faktor $K_e$

vor 40 Jahren:

- ASME-Faktor  $K_e$ : einfache Formel, heute noch in KTA, schlecht fundiert: tlw. unkonservativ, tlw. überkonservativ
- Vorteil: geringer Rechenaufwand (Rechenschieber)

vor 20-30 Jahren:

- Entwicklung verbesserter Vorgehensweisen, mehr oder weniger grobe Erfassung der Haupt-Einflussgrößen, gut für einige spezielle Tragwerke,
- unterschiedliche Güte und Komplexität (Formel bis iterative FE-Analysen)

heute:

- mechanisch gut basierte Verfahren (wg. Rechentechnik) nun auch in Praxis anwendbar, alle Einflussgrößen erfassbar

# Inhalts-Übersicht

Teil A: wovon hängt  $K_e$  ab?

Teil B: Geschichte des ASME-Faktors  $K_e$

Teil C: alternative Methoden zur Bestimmung von  $K_e$

---

→ Teil D: Ratcheting-Nachweis nach KTA

Teil E: alternative Methoden für vereinfachte  
Ratcheting-Nachweise

Zusammenfassung



# Forderungen KTA 3201.2 - vereinfachter Ratcheting- Nachweis -

vereinfachter Ratcheting-Nachweis nach Abschnitt 7.13:

- basiert auf einzelnen Lastpaaren (also wie schon auch bei Ke)
- nur erforderlich bei  $S_n > 3 S_m$

Begrenzung der Spannungen (durch RID):

Fall 1: lineare Temperaturverteilung über Wand

Fall 2: parabolische Temperaturverteilung über Wand

Fall 3: allg. Bauteilgeometrie und Belastung

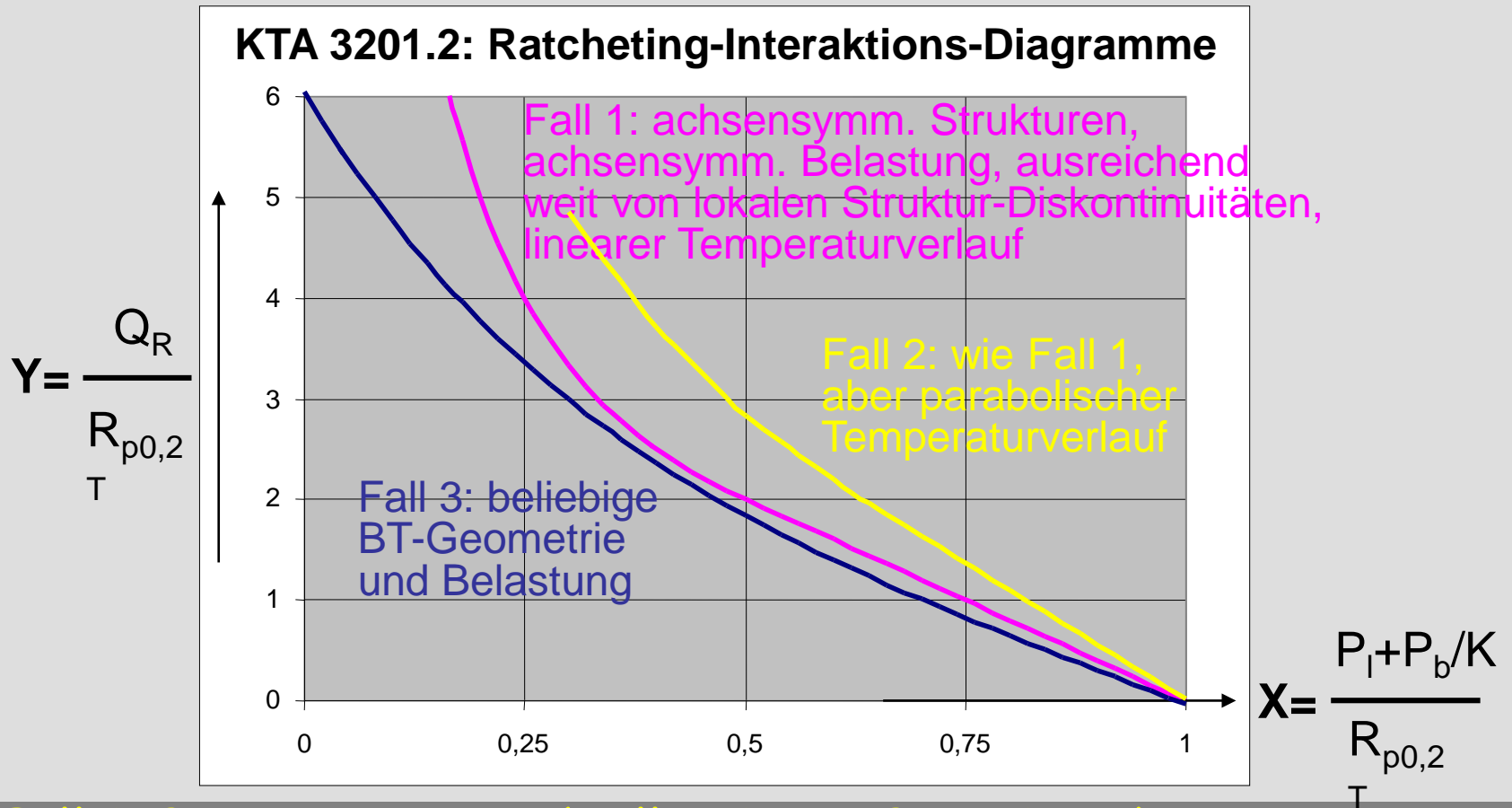
Begrenzung der Dehnungen:

nur Fall 1 (formal auch Fall 2, aber dabei  $\Delta T_2$  unberück.)

komponentenspezifische Analysen:

- nur Rohrleitungen (Abschn. 8.4.3.4.1b)
- nur Begrenzung der Spannungen, nur Fall 1

# KTA 3201.2: Begrenzung der Spannungen durch RID



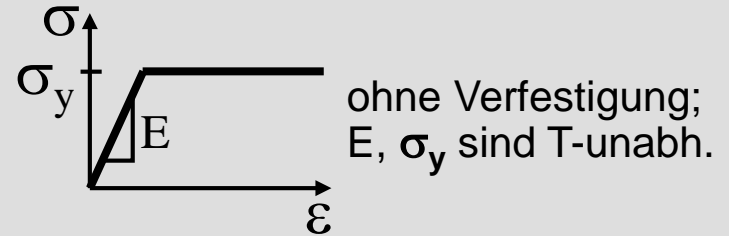
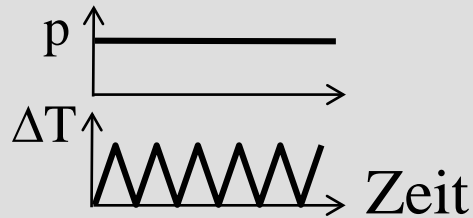
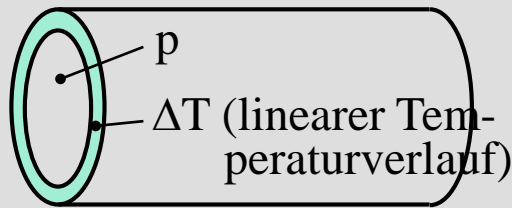
→ Fall 1: Bree-Diagramm (Miller 1959, Bree 1967)

→ Fall 2: Miller (1959)

→ Fall 3: Sartory (1989)

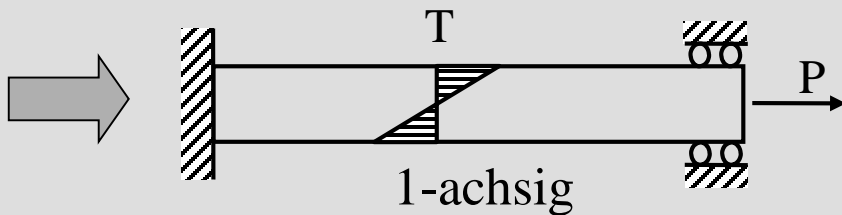
# Fall 1: Bree-Diagramm: Begrenzung der Spannungen

dünnwandiges, langes Rohr (weit entfernt von Enden):



➔  $\sigma_{ax}^{(p)} = \frac{1}{2} \sigma_{Umf}^{(p)}$  ;  $\sigma_{ax}^{(T)} = \sigma_{Umf}^{(T)}$  ;  $\sigma_{rad}^{(p,T)} = 0$

Näherung:  $\sigma_{ax} = 0 \rightarrow$  1-achsige Spannung



Balken mit  $P$  und  $T$  bei verhinderter Krümmung

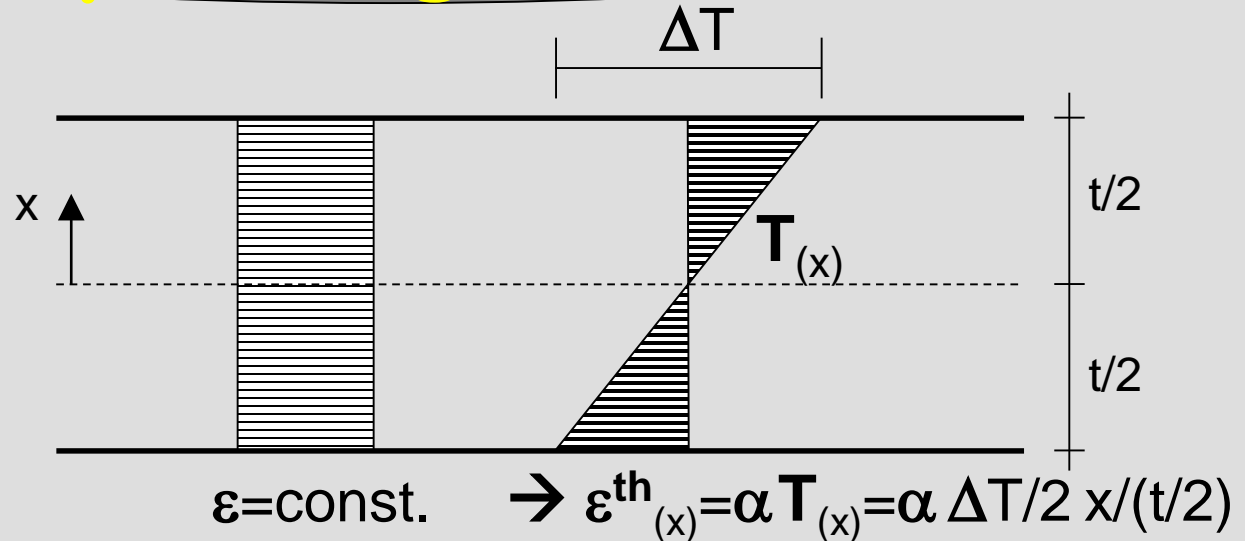
→ homogen in Längsrichtung

→ nur Betrachtung eines Querschnittes erforderlich

→ Handrechnung möglich

# Fall 1: Bree-Diagramm: Spannungen (2)

Querschnitt:



fiktiv elastische Lösung für 1.HZ:

$$\sigma_p = P/t \quad ; \quad \sigma_t = -\frac{1}{2} E \alpha \Delta T$$

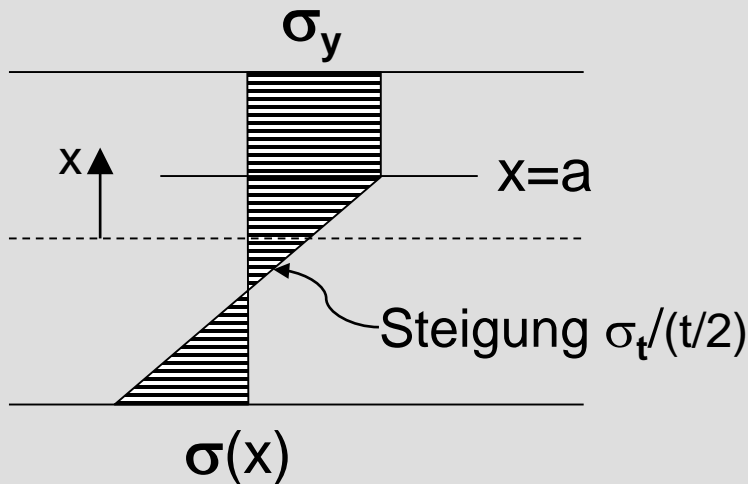
elastisch-plastische Lösung für 1.HZ:

$$\varepsilon = \varepsilon_{(x)}^{\text{el}} + \varepsilon_{(x)}^{\text{pl}} + \varepsilon_{(x)}^{\text{th}} = \text{const.} \Rightarrow E\varepsilon = \sigma_{(x)} + E\varepsilon_{(x)}^{\text{pl}} - \frac{x}{t/2} \sigma_t = \text{const.}$$

$$\Rightarrow \sigma_{(x)} + E\varepsilon_{(x)}^{\text{pl}} = \text{lin. mit Steigung } \frac{\sigma_t}{t/2}$$

# Fall 1: Bree-Diagramm: Spannungen (3)

z.B. wenn nur 1-seitiges Plastizieren in 1.HZ:



Gleichgewicht:

$$\int_{-t/2}^{+t/2} \sigma(x) dx = \sigma_p t \quad \rightarrow \quad \frac{1}{4} \frac{\sigma_t}{\sigma_y} \left( \frac{a}{t/2} + 1 \right)^2 + \frac{\sigma_p}{\sigma_y} = 1$$

- 1.) elastische Grenze: kein Plastizieren an Oberseite:  $a \geq +t/2 \quad \rightarrow \quad \frac{\sigma_t}{\sigma_y} + \frac{\sigma_p}{\sigma_y} \leq 1$
- 2.) Traglast: kein Plastizieren an Unterseite:  $a \leq -t/2 \quad \rightarrow \quad \frac{\sigma_p}{\sigma_y} \leq 1$

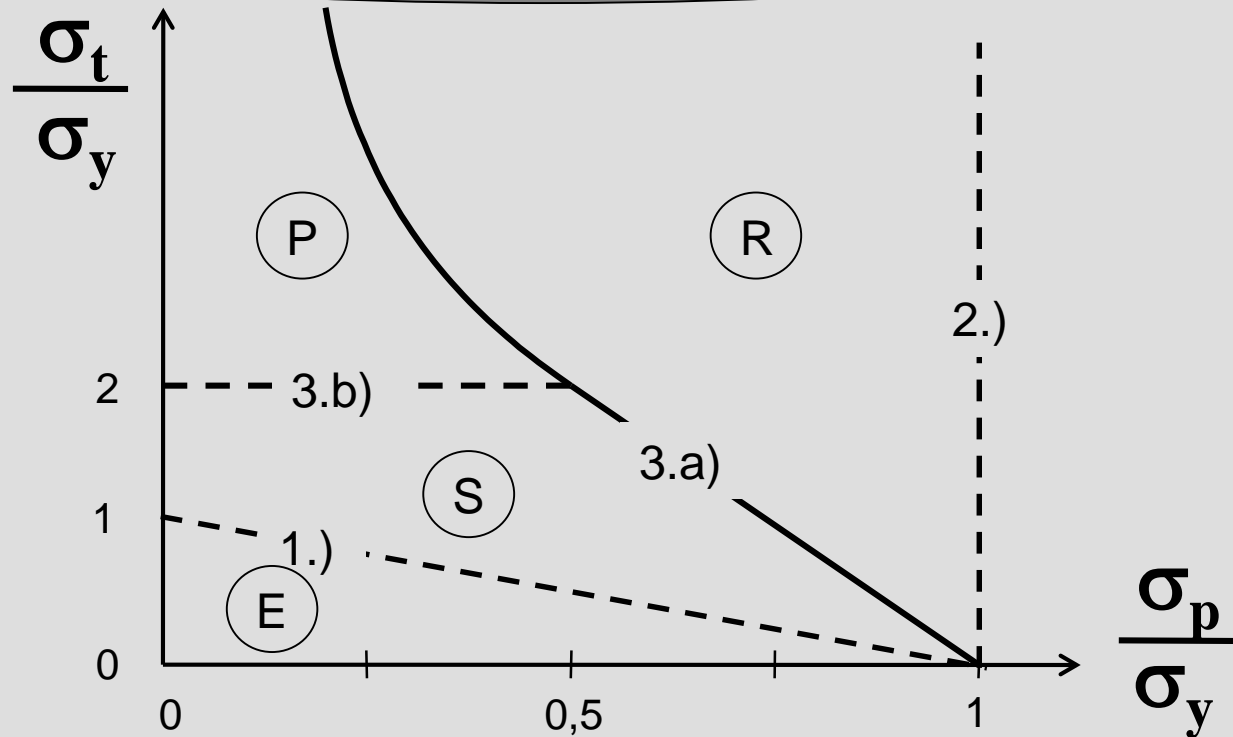
3.) damit im nächsten (=2.) HZ nur elastische Änderungen:

Superposition mit Steigung  $-\sigma_t/(t/2)$ :

a) an Oberseite kein umgekehrtes Plastizieren:  $a \geq 0 \quad \rightarrow \quad \frac{1}{4} \frac{\sigma_t}{\sigma_y} + \frac{\sigma_p}{\sigma_y} \leq 1$

b) außerdem an Unterseite kein Plastizieren:  $\rightarrow \quad \frac{\sigma_t}{\sigma_y} \leq 2$

# Fall 1: Bree-Diagramm: Spannungen (4)

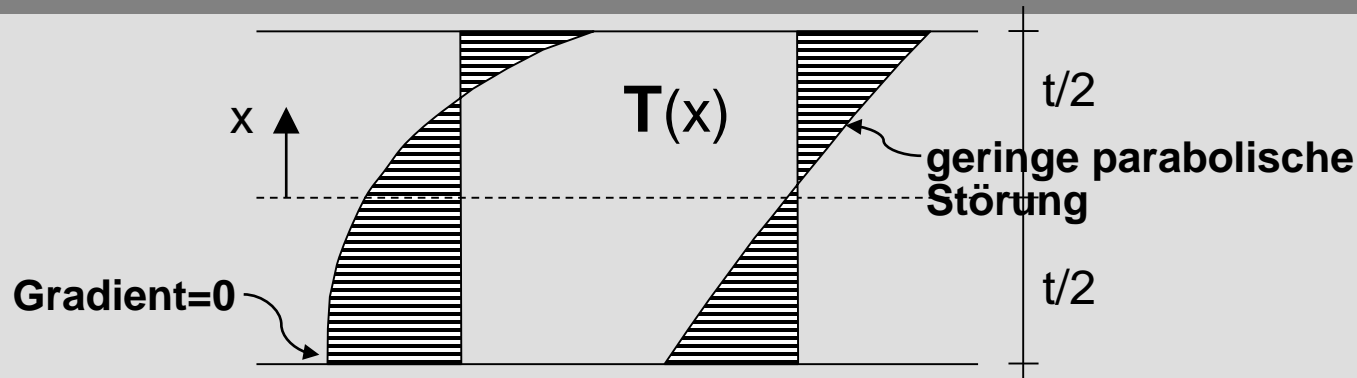


das Bree-Diagramm:

- ist konservativ hinsichtlich Mehrachsigkeit
- ist in weiten Bereichen auch konservativ bei zeitl. veränderl.  $\sigma_p$  (sowohl in-phase als auch out-of-phase mit  $\sigma_+$ )
- gilt auch für Wechsel- statt Schwellbelastung durch  $\sigma_+$
- Anwendung auch bei komp.spezifischer Analyse Rohrleitungen:  $\Delta T_2$  sowie  $M_i$  bleiben dabei jedoch unberücksichtigt!

# Fall 2: Begrenzung der Spannungen bei parabolischem Temperaturverlauf

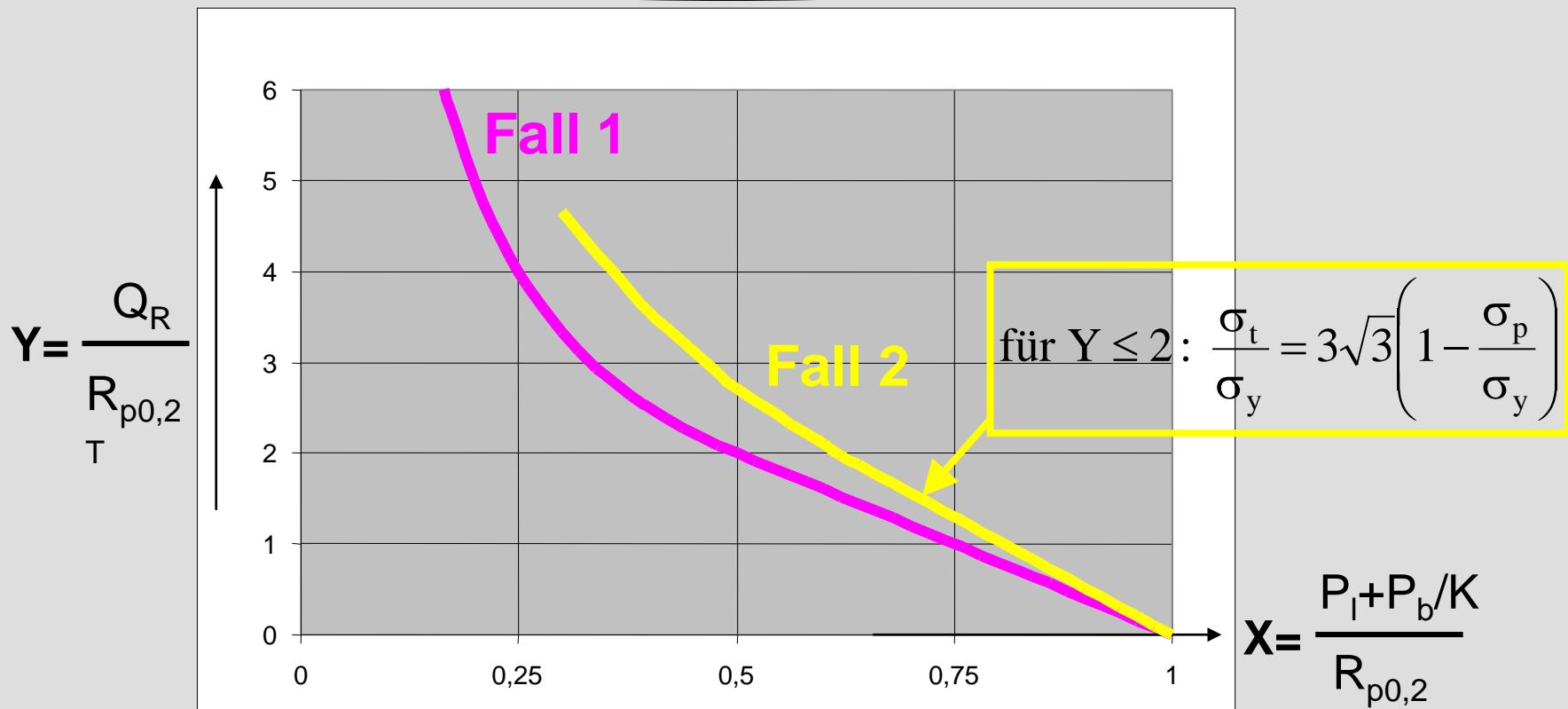
die in KTA angegebenen Gleichungen basieren auf Miller (1959): analytische Lösung für Bree-Rohr, aber Temperaturverlauf parabolisch mit Gradient = 0 an einer Wandoberfläche:



KTA macht aber keine Einschränkungen über Art der parabolischen Temperaturverteilung (nur, dass monoton wachsend oder fallend)

- auch eine geringe parabolische Störung der linearen Temperaturverteilung von Fall 1 wäre zulässig
- Fall 2 aber hierfür nicht konservativ!

# Fall 2: Begrenzung der Spannungen bei parabolischem Temperaturverlauf (2)



ferner: falsche Übertragung von  $\sigma_t$  aus Literatur:  
 bei Miller ist  $Q_R + F_R$  gemeint statt nur  $Q_R$   
 $\rightarrow$  KTA tendentiell unkonservativ (Grenzkurve müsste  
 fast auf Fall 1 liegen, weil  $Q_R = 3/4 \sigma_t$ )

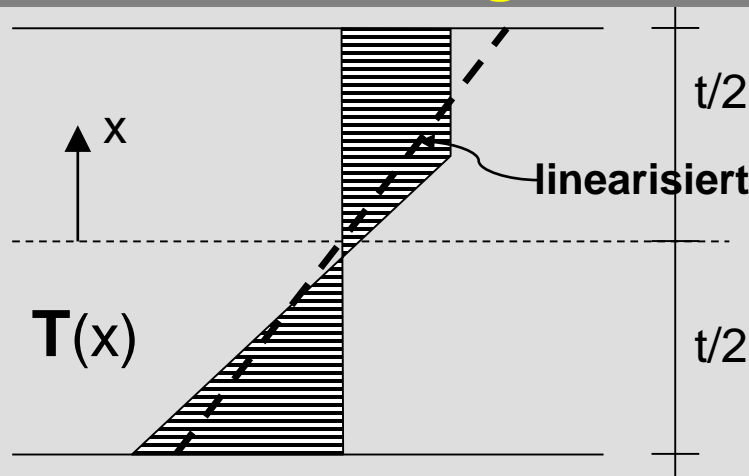


# Fall 3: Begrenzung der Spannungen für allg. BT-Geom. und Belastung

ist der Test B-2 aus dem N-47  
(Test B-1 = Spannungsbegrenzung mit Bree-Diagramm,  
Test B-3 = Dehnungsbegrenzung mit Bree-Diagramm)

wurde im 1.HJ 1995 in KTA 3201.2 aufgenommen

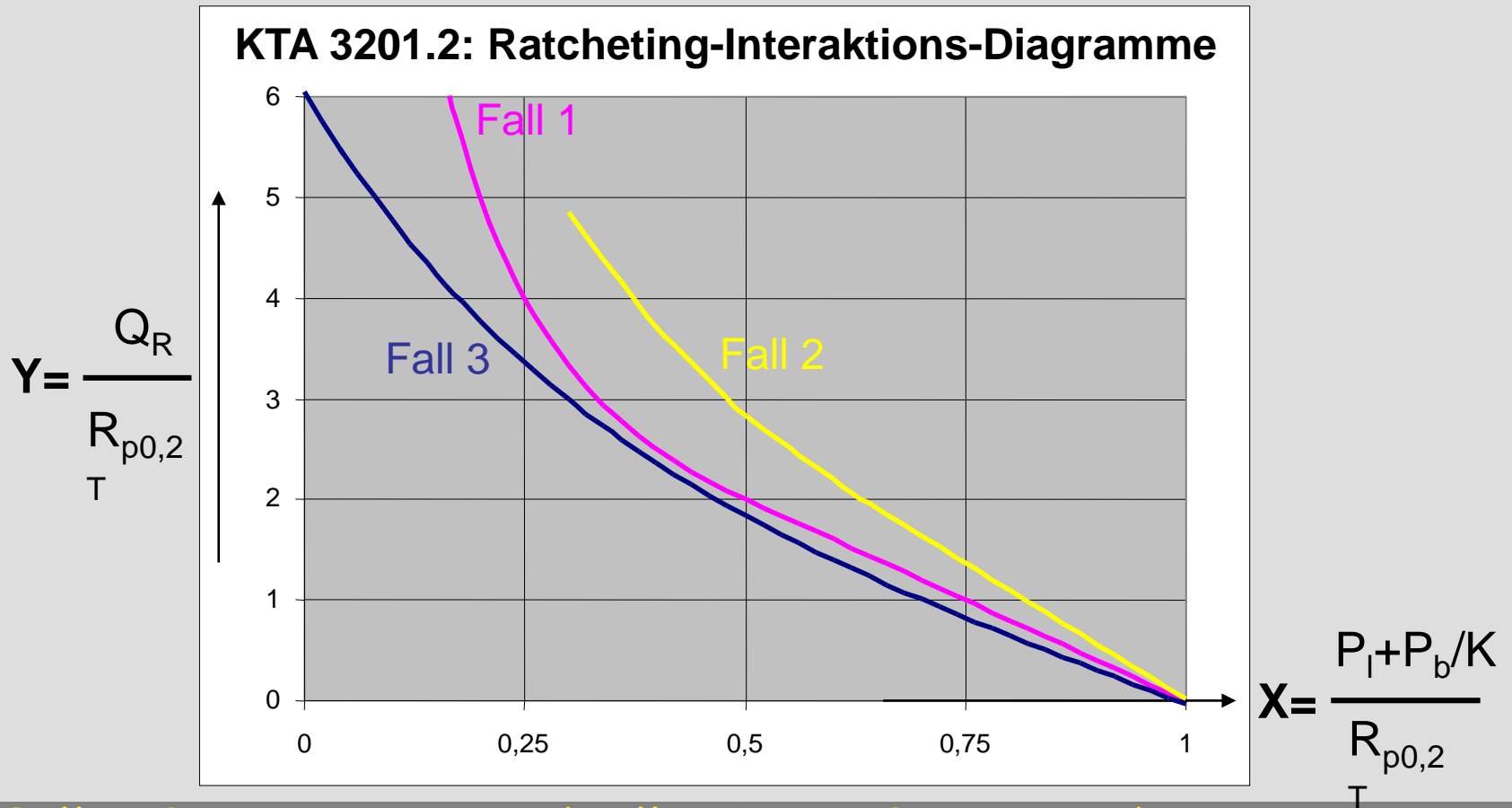
geht zurück auf Sartory (1989):  
analytische Lösung für Bree-Rohr,  
aber thermische **Spitzenspannung** infolge zyklischer  
**bilinear**er Temperaturverteilung über Wanddicke:



## Fall 3: Begrenzung der Spannungen für allg. BT-Geom. und Belastung (2)

- Ergebnis:  
in weiten Parameterbereichen ( $X > 0,3$ ) nur geringfügige Absenkung gegenüber Bree-Diagramm
- erweist sich in **einzelnen** numerischen Vergleichsberechnungen laut Sartory auch als konservativ für manche **anderen Bauteile**:
  - Zylinder mit Wanddicken-Übergang inf. „transient thermal downramp“
  - Übergang Stutzen-Zylinder
  - jedoch sind Details der Geometrie- und Belastungsdaten nicht ohne weiteres zugänglich
- Übertragung von Sartory bzw. N-47 in KTA fehlerhaft, weil bei Sartory und in N-47 keine Beschränkung auf  $S_n > 3S_m$

# Zusammenfassung Begrenzung der Spannungen durch RID



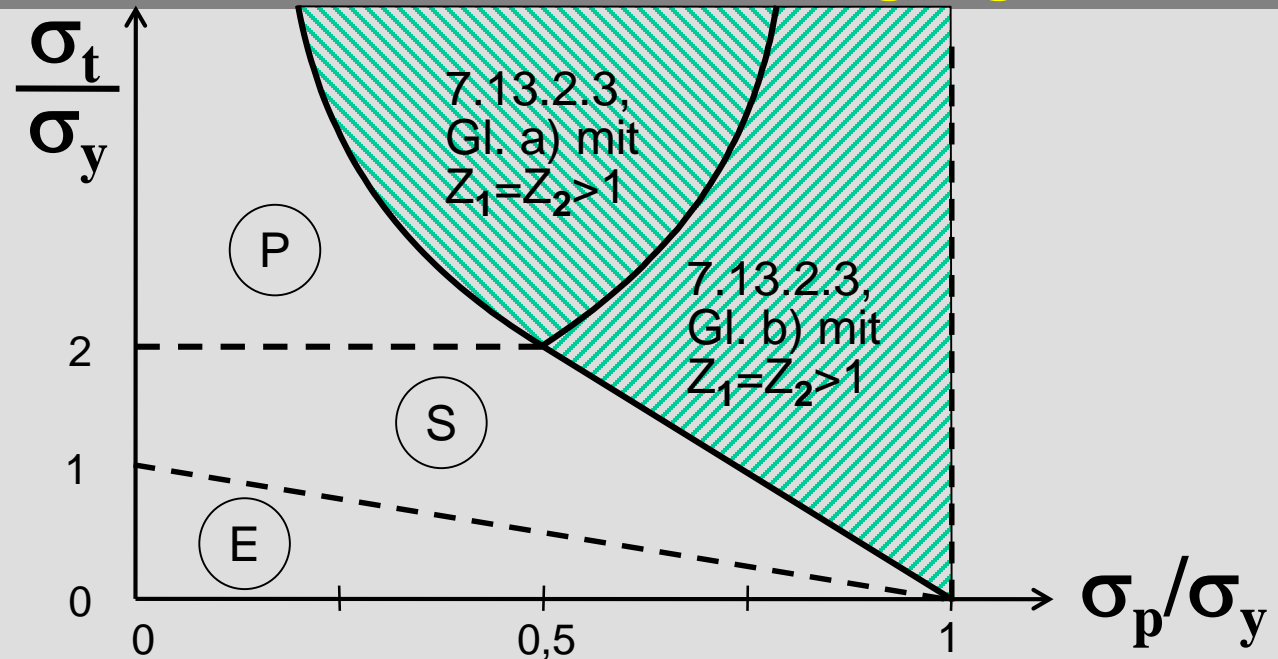
- Fall 1: Bree-Diagramm (Miller 1959, Bree 1967)
- Fall 2: Miller (1959)
- Fall 3: Sartory (1989)

# KTA 3201.2: Begrenzung der Dehnungen

bezieht sich inhaltlich nur auf Fall 1, formal aber auch Fall 2, wobei aber  $\Delta T_2$  vernachlässigt!

gestattet Auslegung im R-Bereich des Bree-Diagrammes: in jedem Zyklus wird dasselbe Dehnungs-Inkrement akkumuliert (da ohne Verfestigung):

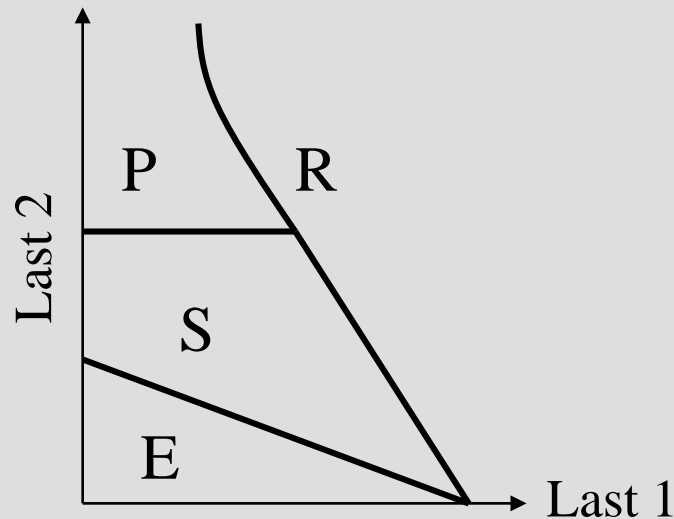
z.B. wenn  $\sigma_y$   
unabhängig von  
Temperatur:



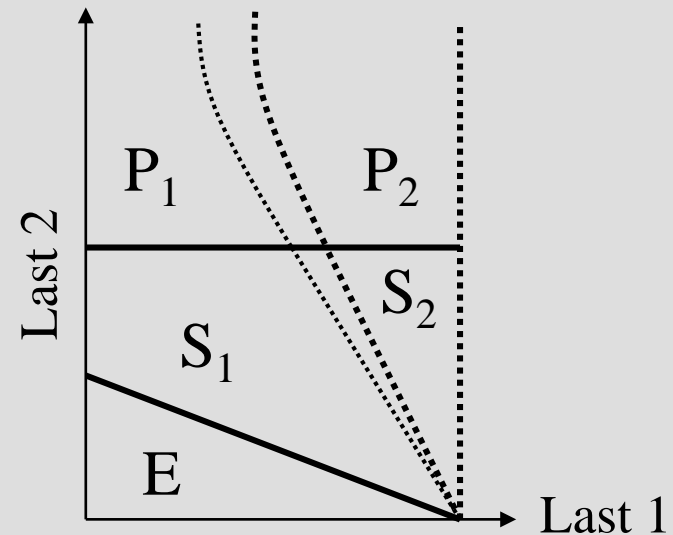
so viele Zyklen zulässig, bis die Dehngrenze erreicht:  
 $\varepsilon \leq 2\%$  (beim allg. Nachweis:  $\varepsilon \leq 5\%$  im GW bzw. 2,5% in SV)

# RID mit Verfestigung

ohne Verfestigung:



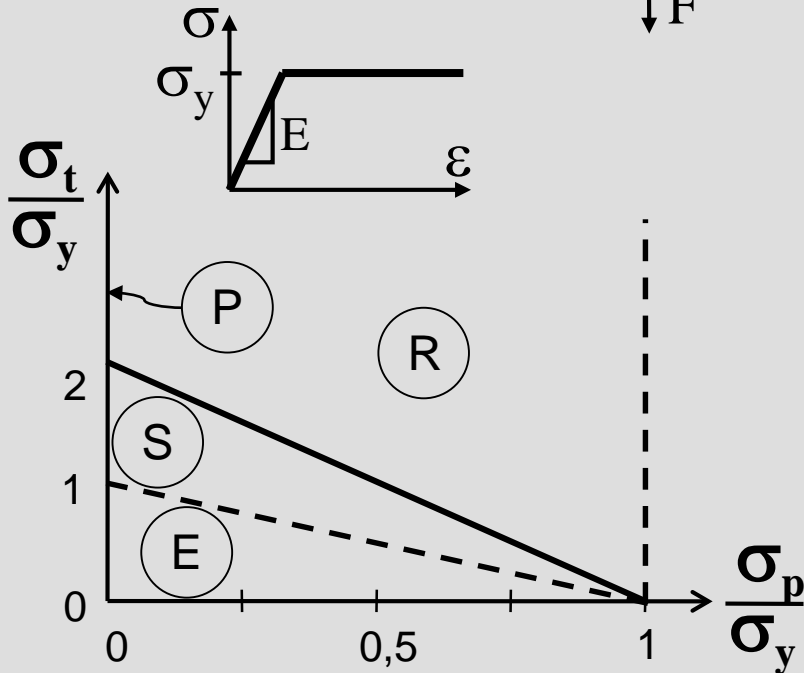
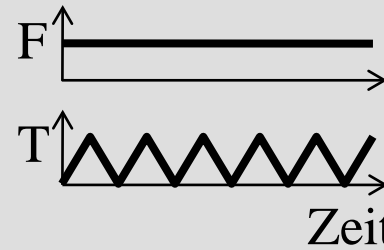
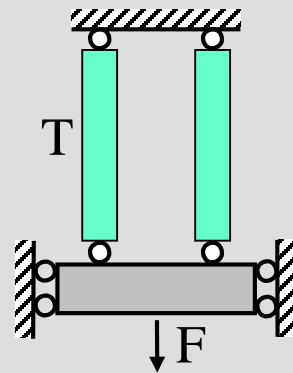
mit Verfestigung:



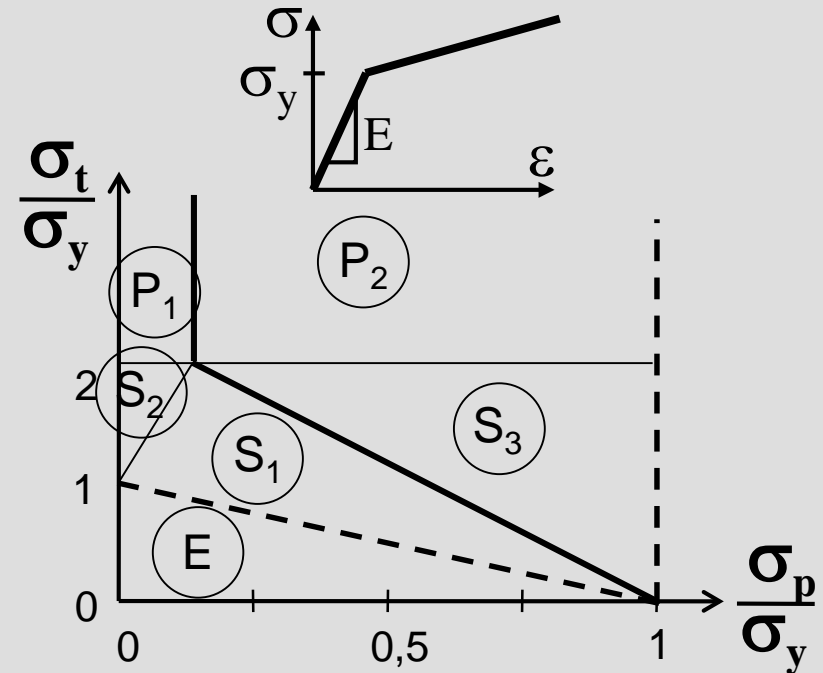
bei lin. kin. Verfestigung:

- Shakedown garantiert (nach vielen Zyklen bei großen akkumulierten Dehnungen):  $S_2, P_2$  statt  $R$
- Grenze zwischen  $S$  und  $P$  a priori bekannt
- post-shakedown quantities erforderlich: in jedem Fall  $\varepsilon_{akk}$  für Ratcheting-Nachweis, in  $P_2$  auch  $\Delta\varepsilon$  (Ke)

# Bsp. 1 für RID anderer Tragwerke: Zweistab

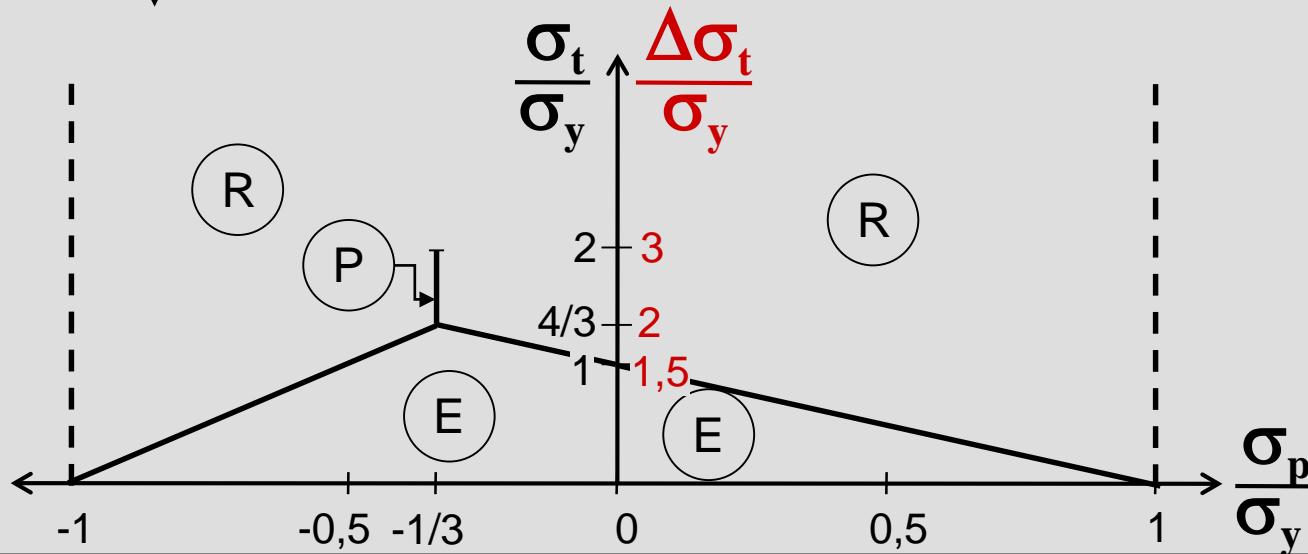
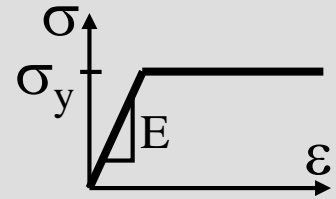
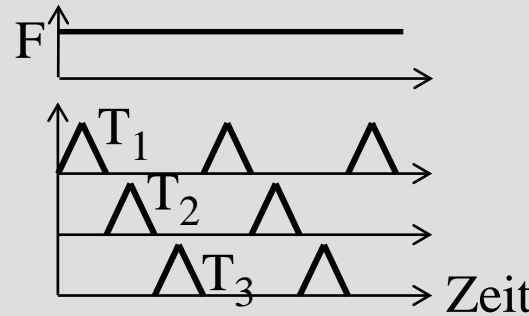
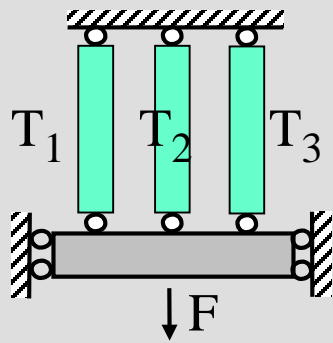


→ Bereich P degeneriert  
 → KTA (Fall 3) nicht konservativ



→ Einfluss auf Dehnungs- und Spannungsbegrenzung

# Bsp. 2 für RID anderer Tragwerke (Dreistab)



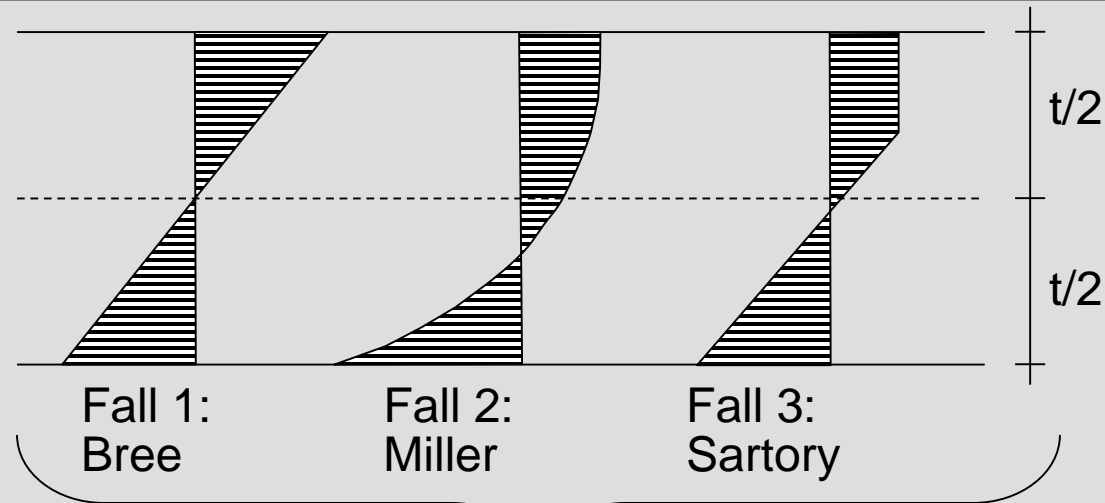
- Bereich S fehlt (und P degeneriert)
- Ratcheting ohne Primärspannung !
- KTA (Fall 3) nicht konservativ
- paarweise Lastfall-Kombinationen nicht konservativ

# Zusammenfassung: Ratcheting-Nachweis in KTA

vereinfachter Ratcheting-Nachweis in KTA basiert auf:

- 1-achsiger Vereinfachung des Bree-Rohres: gerades dünnwandiges Rohr weit entfernt von Störstellen,
- unter konst. Innendruck und zykl. radialen T-Gradienten:

Temperatur-  
verteilungen  
über  
Wanddicke:



alle 3 Fälle gehören zu 1 Familie von BT-Geometrie und Belastungsart

- mit linear elastisch - ideal plastischem Werkstoffgesetz (also ohne Verfestigung)



# Zusammenfassung: Ratcheting-Nachweis in KTA (2)

- Fall 2 falsch aus Literatur übernommen

- dass bei KTA Ratcheting-Nachweise nur erforderlich bei  $S_n > 3 S_m$  steht in Widerspruch zu RID der KTA

- Beschränkung auf paarweise Lastfall-Kombinationen ist problematisch

## Ergebnis:

→ mechanisch schlecht fundiert hinsichtlich „allg. BT-Geometrie und allg. Belastung“

→ spiegelt die maßgebenden Einflussgrößen nicht wider

→ mitunter über- oder un-konservativ

# Inhalts-Übersicht

Teil A: wovon hängt  $K_e$  ab?

Teil B: Geschichte des ASME-Faktors  $K_e$

Teil C: alternative Methoden zur Bestimmung von  $K_e$

---

Teil D: Ratcheting-Nachweis nach KTA

→ Teil E: alternative Methoden für vereinfachte  
Ratcheting-Nachweise

Zusammenfassung

# alternative Möglichkeiten für vereinfachte Ratcheting- Nachweise

das Ratcheting-Verhalten hängt ab von denselben Einflussgrößen wie der Faktor  $K_e$ :

- Bauteilgeometrie
- Belastungsart
- Werkstoffverfestigung
- Belastungsniveau

Erfassung durch mechanisch fundierte Methoden:

- Restspannungs-Verteilungen finden
- inkrementell („exakt“)
- oder direkt (vereinfacht):  
nur Betrachtung des Endzustandes ohne detaillierte  
Verfolgung des Belastungshistogrammes

# direkte Methoden für Ratcheting-Nachweis

einige direkte Methoden liefern „Schranken“ (bounds) auf Basis der **shakedown-Theoreme**:

- kinematischer Satz → obere Schranke (nicht konservativ)
- statischer Satz → untere Schranke (konservativ); seit 1938 (jedoch damals noch ohne Verfestigung)!

andere Methoden liefern Näherungen mit Fehler unbekanntes Vorzeichens („**estimates**“)  
→ z.B. Zarka-Methode

alle → z.B. für RID typischer Auslegungssituationen  
(→ Spannungsbegrenzung)

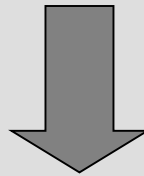
manche → auch zur Abschätzung der „post-shakedown quantities“ (→ Dehnungsbegrenzung, aber auch Dehnungsschwingbreiten, Verformungen, ...)

# Zusammenfassung

- Ke in KTA:  
beruht auf 40 Jahre alten Arbeiten,  
einfache Formel,  
schlecht fundiert: tlw. über- und tlw. unkonservativ
- seither Vorschläge zur Verbesserung der Formeln für Ke  
(Hübel, Roche, Seshadri, ...):  
gut für einige spezielle Tragwerke,  
erhöhter Berechnungsaufwand,  
meist nicht erweiterbar hinsichtlich Ratcheting (außer Zarka)
- vereinfachter Ratcheting-Nachweis in KTA:  
beruht z.T. auf 50 Jahre alten Arbeiten,  
einfache Diagramme und Formeln,  
schlecht fundiert: tlw. über- und tlw. unkonservativ,  
Nachweisführung nur bei  $S_n > 3 S_m$  ist unkonservativ
- heute wären mechanisch gut basierte Verfahren sowohl für Ke  
als auch für vereinfachte Ratcheting-Nachweise anwendbar,  
die alle Einflussgrößen erfassen (individuelle Bauteilgeometrie,  
individuelle Belastung, Verfestigung, ...)

# Schluss

Hintergründe vereinfachter elastisch-plastischer Nachweismethoden in KTA erhellt?



hoffentlich nützlich für Weiterentwicklungen und Anwendungen in Praxis !