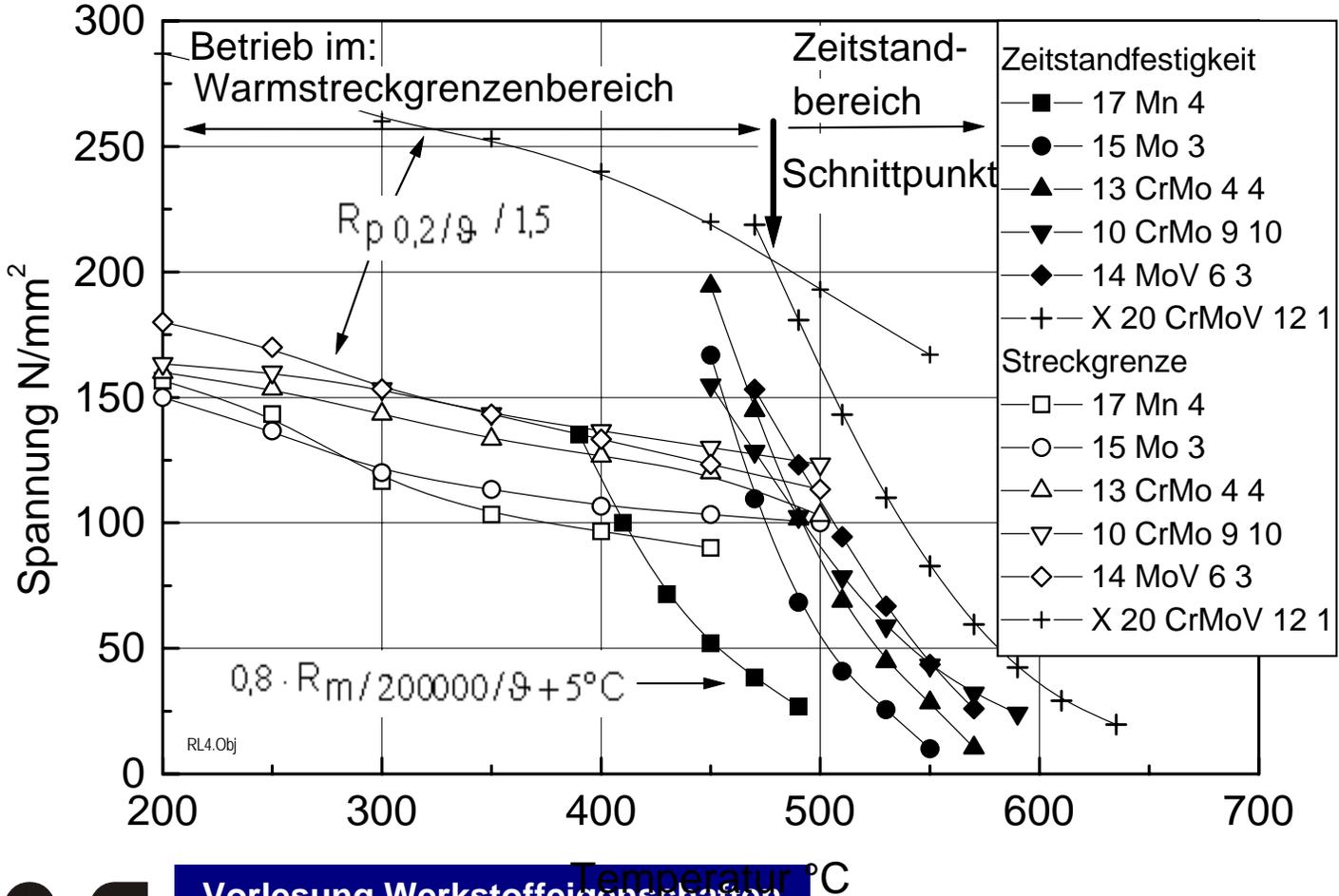


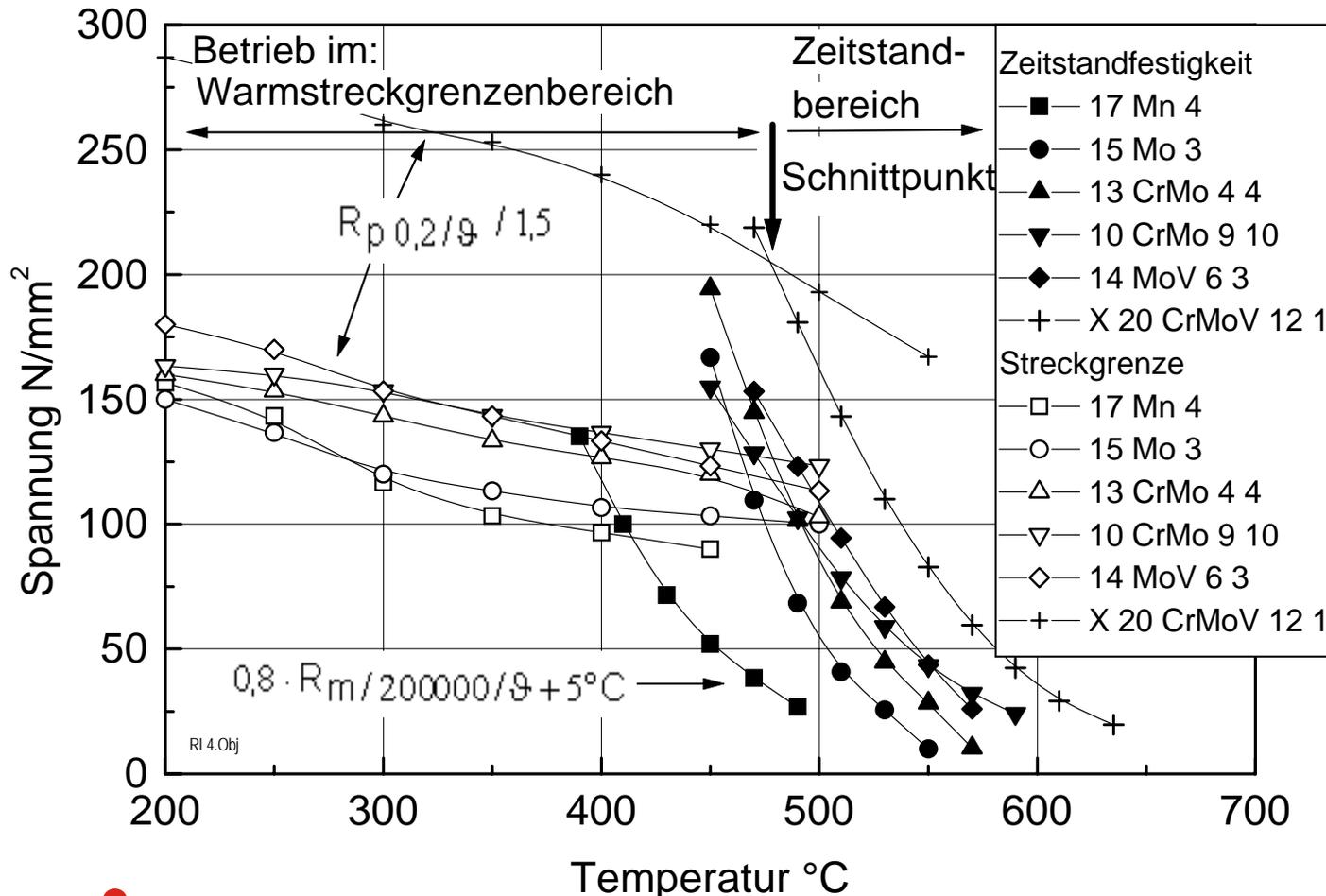
# Verständnisfragen

Wie wird der Schnittpunkt definiert, der festlegt, ob die Auslegung des Bauteils nach der Streckgrenze bzw. nach der Zeitstandfestigkeit erfolgt ?

**Streckgrenzenauslegung erfolgt mit zeitunabhängige Festigkeitskennwerten**  
**Die Auslegung im Bereich der Zeitstandfestigkeit erfolgt mit zeitabhängigen Festigkeitskennwerten**



Ist die Grenztemperatur für den Schnittpunkt der Auslegung des Bauteils nach der Streckgrenze bzw. nach der Zeitstandfestigkeit von der Stahlsorte (chemische Zusammensetzung), von den gewählten Sicherheitsbeiwerten oder von der gewählten Bruchzeit des Zeitstandfestigkeitskennwertes (z. B.  $10^2$  h,  $10^5$  h) abhängig ?



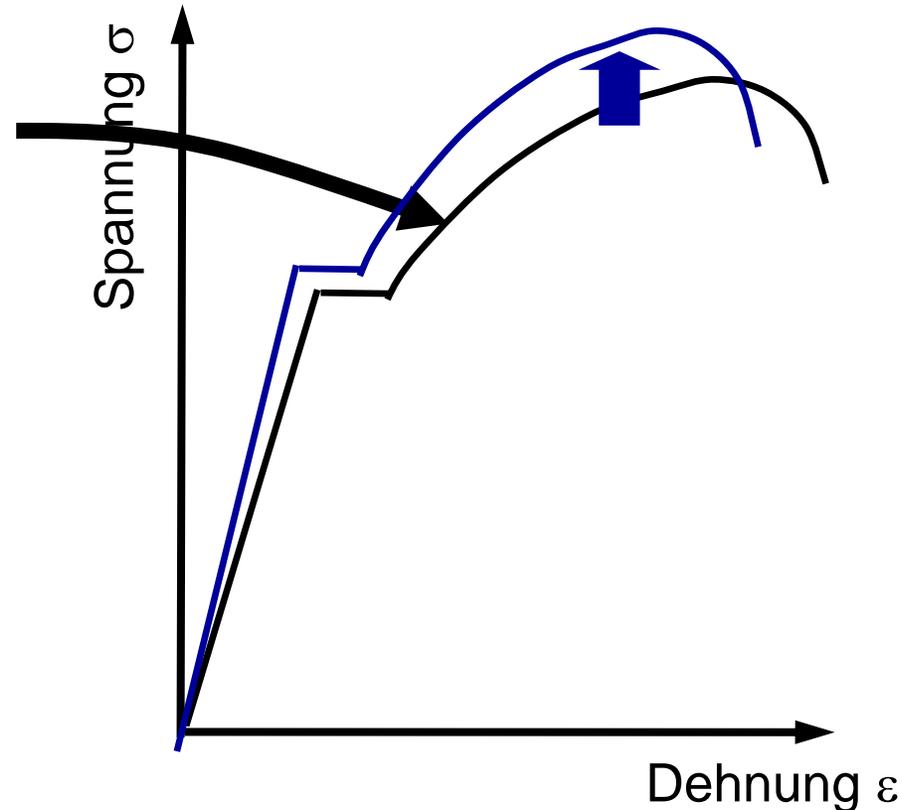
Welche Mechanismen zur Festigkeitssteigerung gibt es? Bei welchen Beanspruchungsbedingungen sind sie wirksam?

## Zeitunabhängige Verformung und Festigkeit - Fließen

### 1. Verformungsverfestigung (Kaltverfestigung)

Im Zuge der Herstellung  
bzw. WBH:

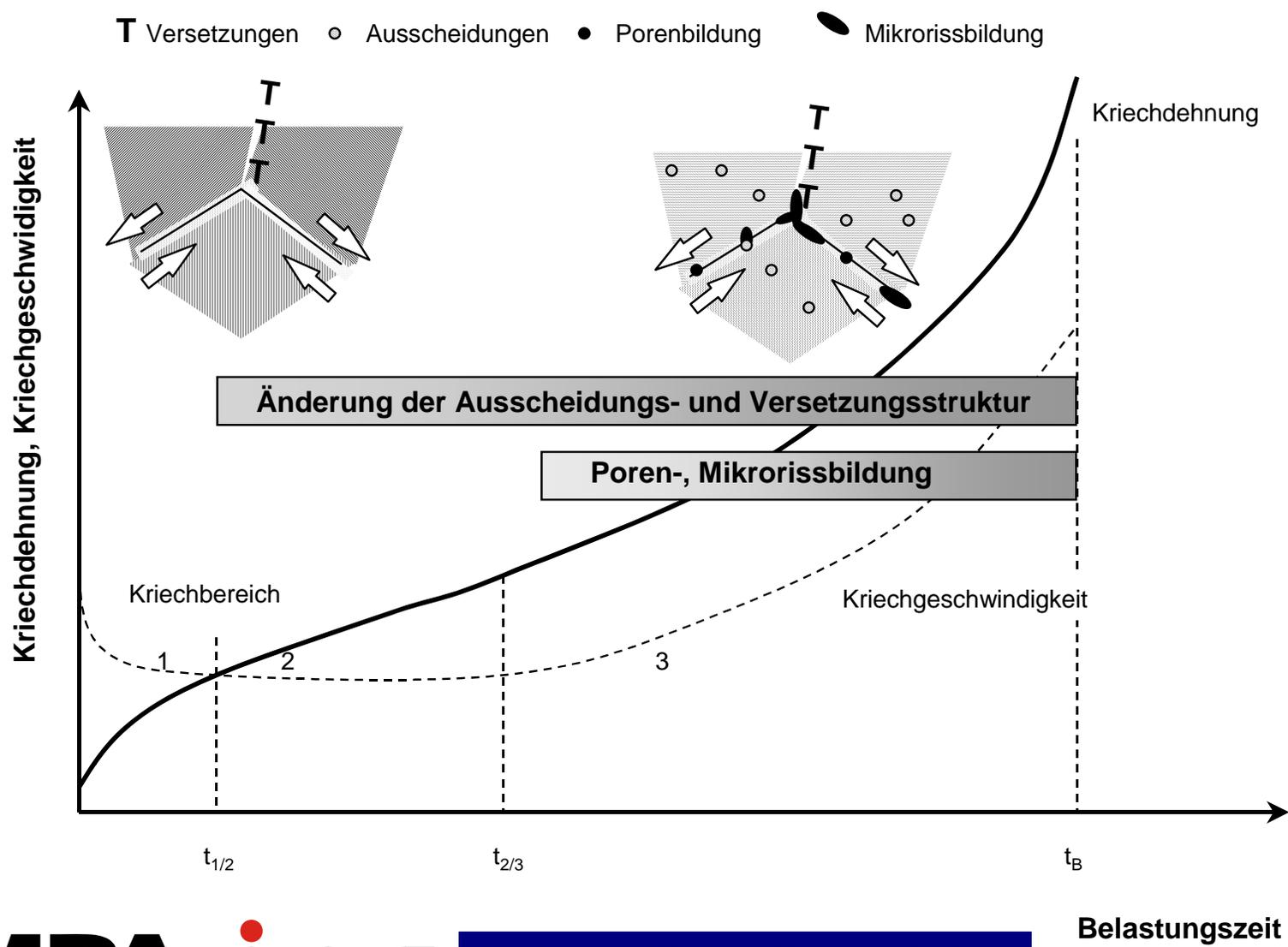
- Feinkornhärtung
- Mischkristallhärtung
- Teilchenhärtung



**Im Hochtemperaturbereich in dem Kriechen der maßgebende  
Versagensmechanismus ist, nicht bzw. nur eingeschränkt wirksam !**

**Warum? - Versagensmechanismus, Diffusionsvorgänge, thermische  
Stabilität**

Beschreiben Sie die Phasen einer typische Zeit – Verformungskurve eines einachsigen Zeitstandversuchs in Bezug auf die Verformungsgeschwindigkeit.



Welche drei Mechanismen bewirken die Verformung im Kriechbereich ?

Bewegung von Versetzungen in einem Kristallgitter,  
Gleitungen längs Korngrenzen,  
Diffusion von Leerstellen

Was ist Erschöpfung ? Ist diese mit der Schädigung durch Kriechporen gleichzusetzen ?

**Wichtige technische Größe für die Überwachung von Bauteilen**

Das Verhältnis zwischen aktueller Lebenszeit  $t$  und der Versagenszeit  $t_B$  wird als Erschöpfung bzw. bezogene Lebensdauer  $e_z = t/t_B$  bezeichnet. Ein linearer Zusammenhang zwischen der Schädigung, d. h. Porenentwicklung und der Erschöpfung besteht nicht.

**Kann sinngemäß auch für Ermüdung angewendet werden**

Bei welchem Erschöpfungsverhältnis tritt im technischen Sinne relevante Kriechschädigung durch Poren auf ?

Warmfeste niedriglegierte Stähle:bzw. Stählen, die im Temperaturbereich eingesetzt werden, in dem zeitabhängige Verformungsvorgänge ablaufen (Schnittpunkt Streckgrenze/Zeitstandfestigkeit siehe vorn)

$e = 50\%$  entspricht etwa 1% Kriechdehnung

Achtung bei 9-12% Cr-Stählen mit martensitischer Gefügeausbildung können Kriechporen erst bei  $e > 50\%$ ,  $> 1\%$  Kriechdehnung auftreten. Auch bei geringer Anzahl von Kriechporen kann eine deutliche Kriechschädigung vorliegen.

Folgende Einflussgrößen sind in diesem Zusammenhang zu beachten::

Beanspruchung,  
Temperatur,  
Verarbeitung

Welche Werkstoffe zeigen mehr Neigung zur Kriechporenbildung:

- a) Stähle mit einer großen Brucheinschnürung im Standardzugversuch?
- b) Stähle mit einer großen Bruchdehnung im Zeitstandversuch?
- c) Stähle mit geringer Brucheinschnürung im Zeitstandversuch?

Zu a:

die Bruchdehnung im Zugversuch hat keinen werkstoffkundlichen Bezug zum Kriechverhalten

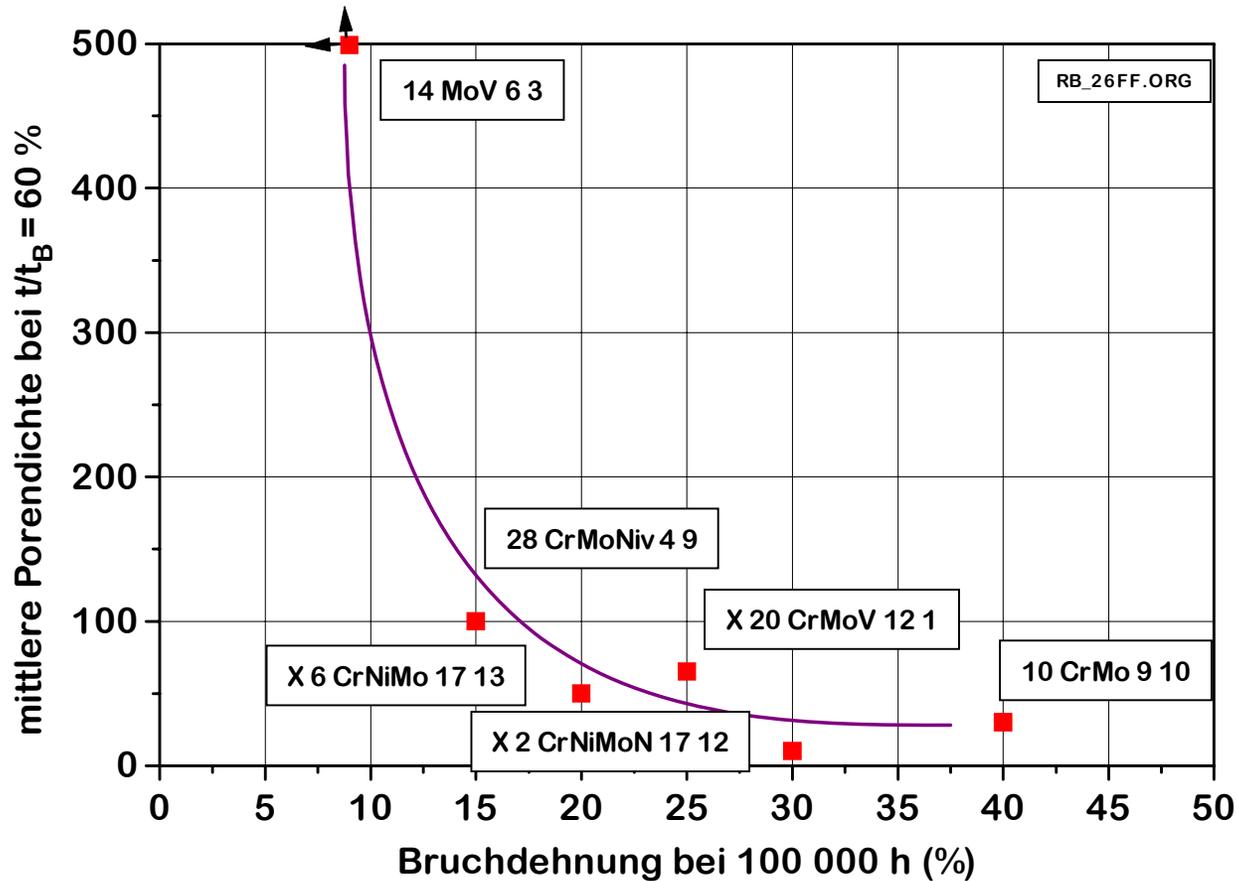
Zu b:

Hohe Kriechverformung bedeutet, die Matrix bzw. das Korn verformt sich, es erfolgen nur geringe Gleitvorgänge an den Korngrenzen, d.h. es liegt kein Grund vor, dass sich ausgeprägt Kriechporen bilden

Zu c:

Geringe Kriechverformung bedeutet, dass das Korn wenig Verformung zeigt und der Anteil der Gleitvorgänge zwischen den Körnern groß ist, damit sind die Voraussetzungen für Kriechporenbildung gegeben

In welchem Zusammenhang steht die Verformungsfähigkeit im Zeitstandversuch mit dem Korngrenzengleiten?



Wo liegt die potentielle Versagensstelle einer Schweißverbindung (geringfügig geringere Festigkeit/Kriechverformungsfähigkeit von Schweißgut gegenüber dem Grundwerkstoff angenommen) im Zeitstandbereich:

a) ferritischer Werkstoff, einachsiger Zug quer zur Naht ?

Bei langzeitiger Beanspruchung (niedere Spannung): WEZ

b) ferritischer Werkstoff, einachsiger Zug längs zur Naht ?

Bei langzeitiger Beanspruchung (niedere Spannung): zunächst in WEZ, wird jedoch von GW und SG aufgefangen, danach SG

c) ferritischer Werkstoff, Rundnaht eines innendruckbeanspruchten Rohres ?

Wie b

d) ferritischer Werkstoff, Längsnaht eines innendruckbeanspruchten Rohres ?

WEZ

e) austenitischer Werkstoff, einachsiger Zug quer zur Naht ?

SG

# Wie wirkt sich der Wärmeausdehnungskoeffizient bei Mischnähten auf das Versagensverhalten unter Zeitstandbeanspruchung bzw. bei An- und Abfahrten aus ?

Mischnaht = Verbindung aus ungleichen Stählen / Werkstoffen:

Hochlegierter Stahl mit niedriglegiertem Stahl

Austenitischer Stahl (= weiß) mit ferritischem Stahl (=schwarz)

Ni-Legierung mit Stahl

Zwei gleiche Stähle mit nicht artgleicher Schweißgut

Je „ungleicher“ die Verbindung umso größere Unterschiede treten bei der Wärmeausdehnung auf.

Diese führen bereits im Zuge des Schweißens zu behinderten Wärmedehnungen, d.h. Spannungen. Dadurch können verstärkt Schweißfehler entstehen (Heißrisse).

An der Grenze zwischen den unterschiedlichen Partnern (Fusionslinie) ergeben sich metallurgische Änderungen, da wegen den Konzentrationsunterschieden Diffusionen auftreten (z. B. Kohlenstoff). Dadurch können weiche oder harte Zonen direkt im Bereich der Fusionslinie entstehen, die eine geringere Zeitstandfestigkeit haben.

Bei An- und Abfahrten treten jedesmal behinderte Wärmdehnungen auf, die Spannungen proportional zum vorliegenden  $\Delta T$  erzeugen. Damit liegt bei wiederholten Anfahrten eine Ermüdungsbeanspruchung vor, die bereits ohne Last (z. B. Druck) zum Anriss führen kann.

Das größte  $\Delta T$  stellt sich bei der Wärmebehandlung (Anlassen) nach dem Schweißen ein.

Warum fördert eine mehrachsige Beanspruchung die Bildung von Kriechporen ?

Herabsetzung der Kriechverformungsfähigkeit des Werkstoffs  
Mehr Korngrenzen erfahren eine senkrechte Beanspruchung

Welche Faktoren schränken die Anwendung von Kriech-Schädigungsmodelle ein?  
:

**Empirisch Schädigungsmodelle, die auf einem Zusammenhang mit der Spannung und Dehnung (Shammas, Kachanov):**

- ⇒ **Beschreiben die Vorgänge in einachsigen Proben recht gut**
- ⇒ **Grenzwert  $D=1$  sind theoretischer Natur, Versagen im Bauteil tritt früher auf**
- ⇒ **Berücksichtigen nicht die Mehrachsigkeit der Belastung**

**Mikrostrukturelle Modelle:**

**Änderungen können über die Beeinflussung der Kriechrate theoretisch erfasst werden. Hierzu sind aufwändige TEM Untersuchungen erforderlich. Die Quantifizierung von mikrostrukturellen Parametern (Anzahl von Teilchen im Volumen nicht möglich bzw. sehr unsicher.**

**Die Übertragung auf Bauteile ist problematisch (Mehrachsigkeit, statistische Absicherung, thermische Effekte)**

Beschreiben Sie den Unterschied der Schädigung durch Kriechen bzw. Ermüden anhand der Erscheinungsform eines Risses (Zugbeanspruchung) bzw. des Bruches bei einem im Zugversuch spröden bzw. duktilen Werkstoff:

Makroskopisches Erscheinungsbild - Unterschiede zwischen Gewaltbruch und Ermüdungsbruch

	Gewaltbruch	Dauerbruch
Bruchart	Verformungsbruch	verformungsarmer Bruch
Bruchrichtung	in Richtung der größten Schubspannung	senkrecht zur größten Normalspannung
Bruchstelle	an Stellen geringster Widerstandsfähigkeit	meist an Kerbstellen
Bruchfläche	körnig, samtig	glatt, u.U. Rastlinien

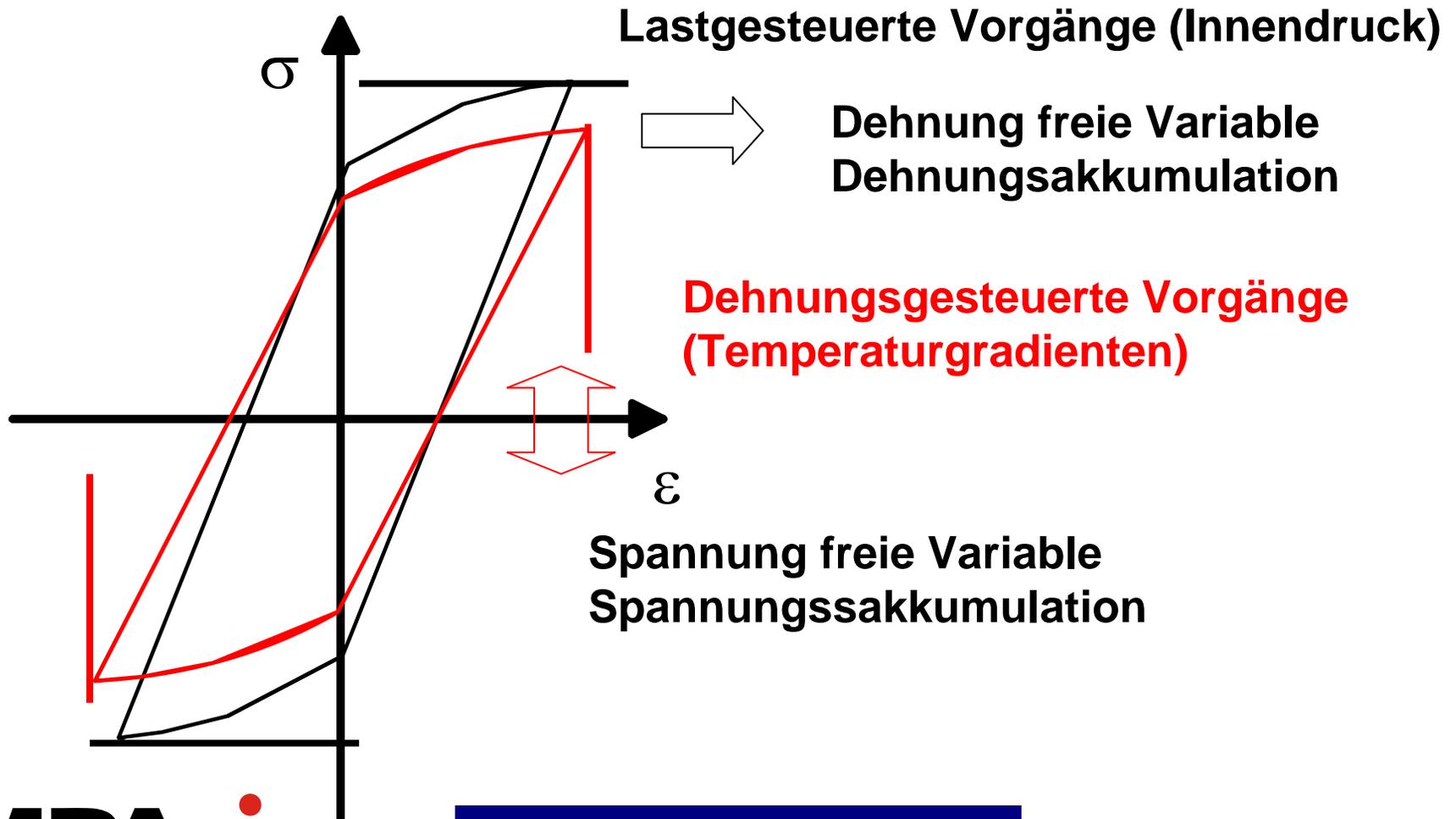
Kriechbruch nur bei erhöhten Temperaturen – Oxidation der Oberfläche

Metallografisches Erscheinungsbild Unterschiede zwischen Gewaltbruch/ Ermüdungsbruch und Kriechbruch:

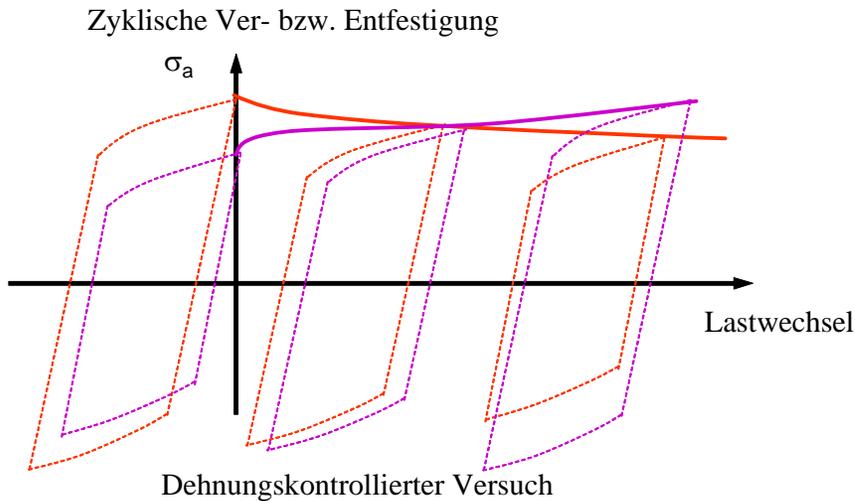
Kriechen: Interkristalliner Rissverlauf, interkristalline Mikrorisse und Poren vor der Rissspitze bzw. im Umkreis des Bruches

Ermüdung /Gewaltbruch: transkristalliner Rissverlauf, keine Schädigung vor der Rissspitze

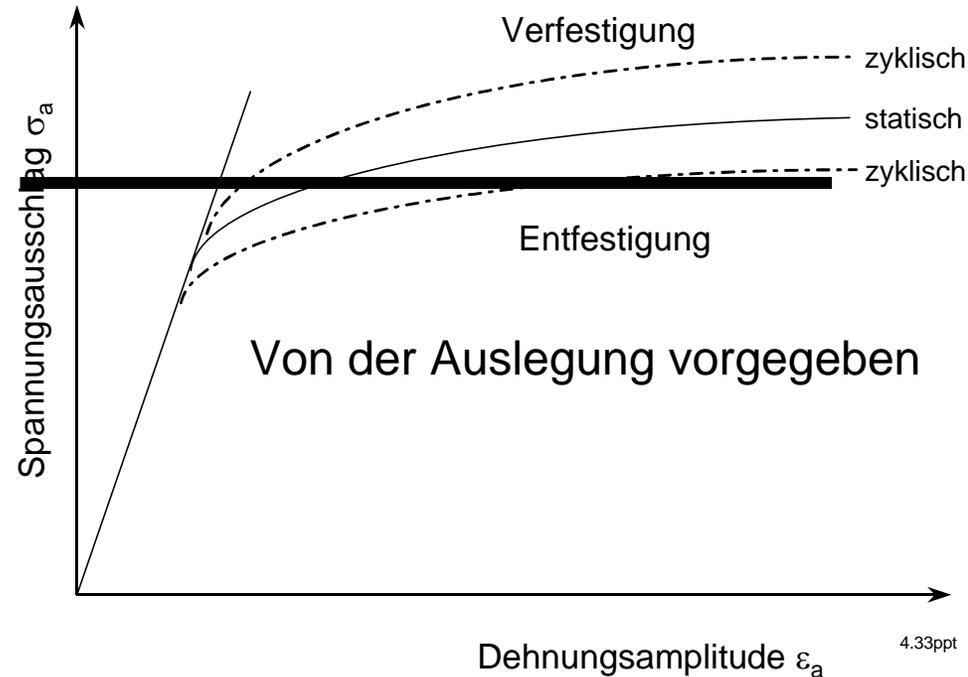
# Gegenüberstellung Dehnungs- und Spannungskontrollierter Versuch



Vergleichen Sie die statische Fließkurve mit der zyklischen Fließkurve eines zyklisch entfestigenden bzw. verfestigenden Werkstoff. Welche ist für den Betrieb einer Turbine im Hinblick auf den Abstand zwischen Schaufeloberkante und Gehäuse kritischer ?



Entfestigendes Verhalten:  
Dehnamplitude wird größer



4.33ppt

Welchen Einfluss hat

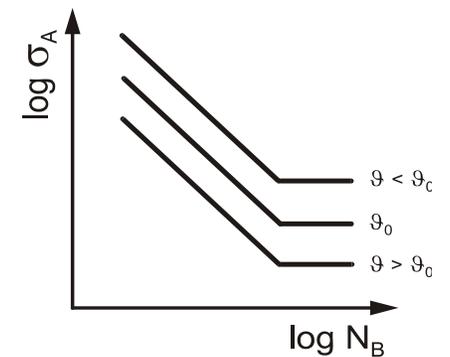
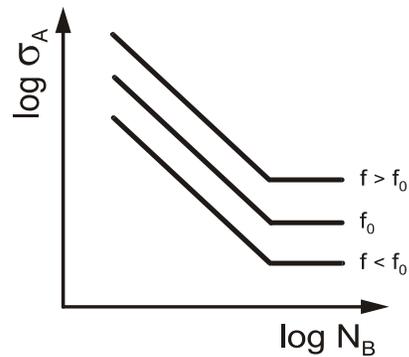
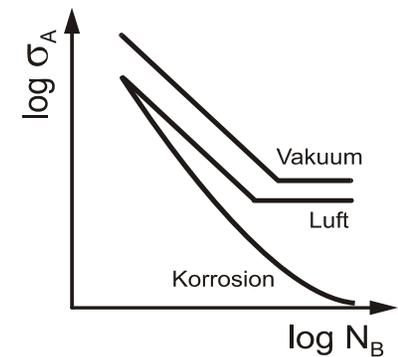
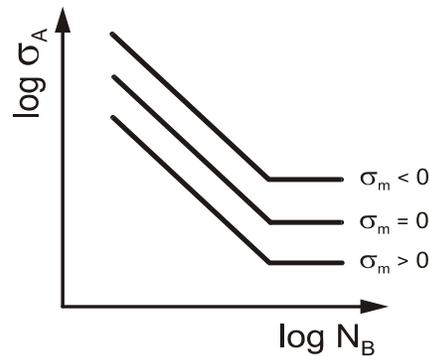
a) die Mittelspannung

b) die Umgebung (Vakuum, Luft, Korrosion)

c) die Frequenz

d) die Temperatur

auf die Ermüdungsanrisskennlinie ?



Welche Effekte ergeben sich aus der Ermüdungsbeanspruchung auf das Betriebs- und Versagensverhalten von Bauteilen?

**Zu- bzw. Abnahme der Festigkeitswerte infolge zyklischer Ver- bzw. Entfestigung.**  
Ist vor allem bei Entfestigung bei der Auslegung dyn. beanspruchter Bauteile zu berücksichtigen, da die Streckgrenze durch die betriebliche Ermüdungsbeanspruchung herabgesetzt werden kann.

**Änderung der  $A_V$ -T-Kurve infolge zyklischer Ver- bzw. Entfestigung**

***Änderung der  $A_V$ -T-Kurve infolge thermischer Alterung***

Beeinflusst die kritische Rissgröße ab der Rissinitiierung erfolgt.  
Ist der Ausgangswert der Kerbschlagzähigkeit gering, kann im Zusammenhang mit der betrieblichen Beanspruchung eine Unterschreitung der Anforderungswerte erfolgen.

Betrieb des Bauteils erfolgt i. allg. in der Hochlagentemperatur, Verschiebung der Übergangstemperatur ist während des Anfahrens kritisch

**Änderung der Zeitstandfestigkeit infolge zyklischer Ver- bzw. Entfestigung**

Praktisch keine Bedeutung, wenn das Bauteil im Langzeitbereich betrieben wird, in dem sich die beschriebenen Effekt nicht auswirken

Warum bezeichnet man eine Schweißverbindung auch als metallurgische Kerbe ?

Gefügeänderung durch Wärmeeinbringung beim Schweißen

Gefüge- bzw. Phasengrenzen (Austenit – Ferrit) - Ausdehnungsverhalten

Steifigkeits-Festigkeits-Verformungssprünge durch unterschiedliche Gefügestände

Eigenspannungen

Wie wirkt sich die Einführung einer Haltezeit bei maximalem Dehnungsausschlag aus im dehnungskontrollierten Ermüdungsversuch aus:

Hystereseschleife:

a) die bleibende Dehnung wird größer, da während der Haltezeit eine elastisch-plastische Umlagerung stattfindet

b) die bleibende Dehnung wird kleiner, da während der Haltezeit eine Relaxation stattfindet

Anrisslastspielzahl:

c) die Anrisslastspielzahl wird größer, da die Spannungsspitze während der Haltezeit wegrelaxiert

d) die Anrisslastspielzahl wird kleiner, da die Probe während der Haltezeit einer höheren Spannung (im Vergleich zum Versuch ohne Haltezeit) und über die Wechsel einer größeren plastischen Schwingbreite ausgesetzt ist.

a) Ja

b) Nein, Relaxation **ist** eine zeitabhängige elastisch-plastische Umlagerung

c) Nein, wird die Fläche Spannung über Zeit aufintegriert ist diese bei Versuchen mit Haltezeiten größer als bei Versuchen ohne Haltezeiten

d) Ja, siehe auch oben

Was ist die lineare Schadensakkumulationsregel?

Lineare Aufakkumulation von Einzelschädigungen (Lastspiele, Zeitintervalle unter Kriechbeanspruchung) zu einer Gesamtssumme

**Überlagerung Kriechen und Ermüden:  
Lineare Schadensakkumulation**

$$e = e_w + e_z = \sum_i e_{w,i} + \sum_k e_{z,k}$$

**Spannungs-  
berechnung**

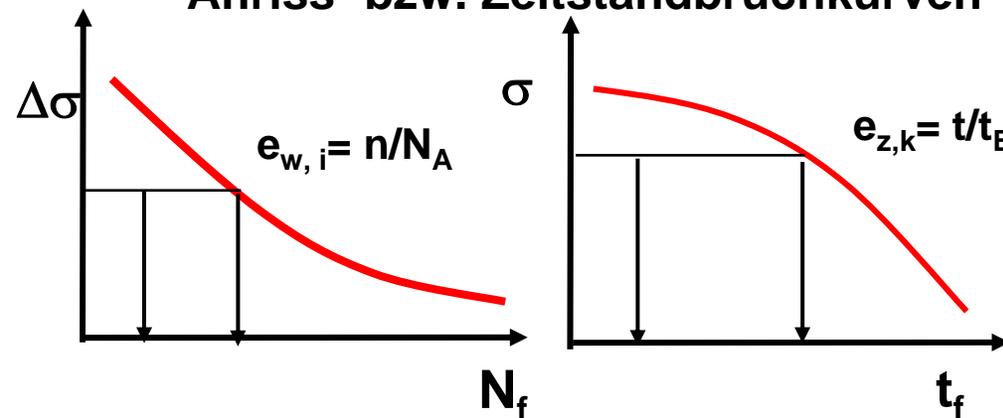
$\sigma, \Delta\sigma$



**Berechnung  
Wechselerschöpfung  $e_w$   
Zeitstanderschöpfung  $e_z$**



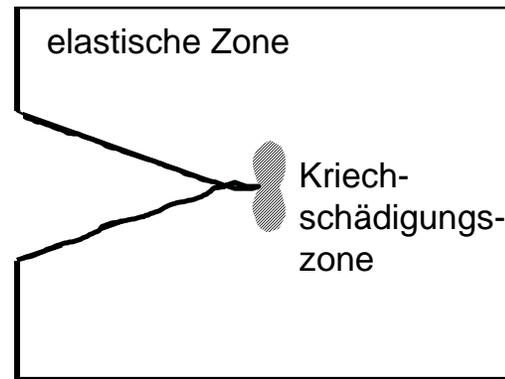
**Anriss- bzw. Zeitstandbruchkurven**



Welche Randbedingungen gelten für die Anwendung des K-Konzeptes bzw. des C\*-Konzeptes zur Beschreibung des Kriechrischwachstums:

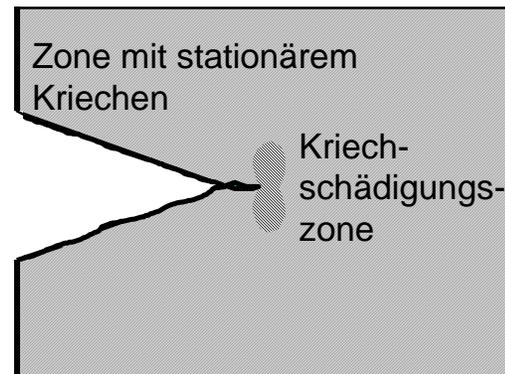
- a) das Bauteil verhält sich im Ligament hinter der Rissspitze überwiegend linear-elastisch,
- b) die Kriechschädigungszone ist begrenzt auf einen kleinen Bereich vor der Rissspitze,
- c) die Kriechschädigungszone ist in einen Bereich eingebettet, der stationär kriecht.

a, b



Das Bauteil verhält sich überwiegend linear-elastisch. Das Kriechrißverhalten kann durch den Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$  beschrieben werden

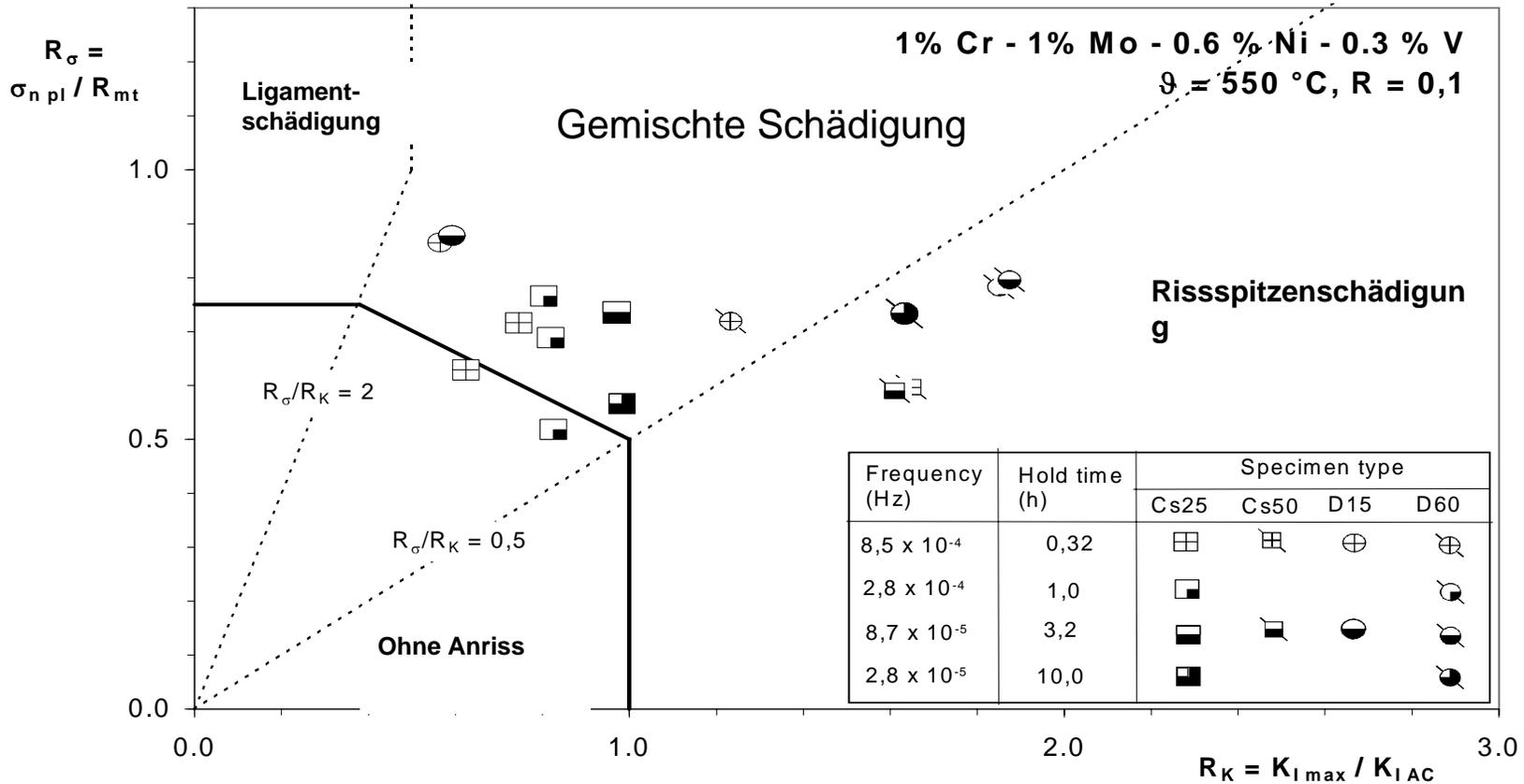
c



Im Bauteilquerschnitt dominiert stationäres Kriechen. Das Kriechrißverhalten kann durch das vom J-Integral abgeleitete C\*-Integral beschrieben werden.

# Was beschreibt das 2K-Diagramm?

Beschreibt in Abhängigkeit von der Beanspruchung vor der Rissspitze bzw. im Ligament (Fernfeld) ob ein Anriss auftreten kann.



Welche Anforderungen müssen Werkstoffe, die für hochbeanspruchte Hochtemperaturbauteile eingesetzt werden, erfüllen?

**Hohe Zeitstandfestigkeit bei hohen Temperaturen,**

**Vorsicht:**

**Normwerte beziehen sich immer auf Metalltemperatur  
Mediumtemperatur ist nicht Metalltemperatur**

**Martensitische Stähle bis 610°C – 100 MPa/100000 h**

Normwerte sind immer Mittelwerte  
(des Streubandes)

Festigkeits- kennwerte $K$ gemäß TRD über Werkstoffe	Sicherheitsbeiwert $S$	
	bei innerem Überdruck	bei äußerem Überdruck
$\check{\sigma}_B$ bei 20 °C	2,4	2,4
$\check{\sigma}_{S/\beta}$ bzw. $\check{\sigma}_{0,2/\beta}$	1,5	1,8
$\check{\sigma}_{B/200000h/\beta}$ *)	1,0**)	1,2

\*) Falls für einen Werkstoff  $\check{\sigma}_{B/200000h/\beta} = 0,8 \cdot \check{\sigma}_{B/100000h/\beta}$  nicht bekannt ist sowie bei Seeschiffskesseln, kann mit  $\check{\sigma}_{B/100000h/\beta}$  gerechnet werden; dabei ist  $S = 1,5$  für inneren Überdruck und  $S = 1,8$  für äußeren Überdruck einzusetzen.

\*\*\*) Die Anwendung setzt die Berücksichtigung der TRD 508 voraus.

Welche Anforderungen müssen Werkstoffe, die für hochbeanspruchte Hochtemperaturbauteile eingesetzt werden, erfüllen?

## Zusammenhang Berechnungstemperatur (Bauteilwandtemperatur) und Mediumtemperatur

Tafel 4. Bezugstemperaturen und Temperaturzuschläge

Aggregatzustand	Bezugstemperatur	Temperaturzuschläge			
		Unbeheizte Bauteile**)	Beheizte Bauteile**)		
			Beheizung überwiegend durch Strahlung*)	Berührung	gegen Strahlung abgedeckt
Wasser- bzw. Wasserdampfgemisch	Sättigungstemperatur beim zulässigen Betriebsüberdruck $p_1$ bzw. beim zulässigen Gesamtüberdruck $p_2$	0 °C	50 °C, bei Sammlern***) (30 + 3 $s_\theta$ ) °C mindestens 50 °C	(15 + 2 $s_\theta$ ) °C, jedoch höchstens 50 °C	20 °C
Heißdampf	Heißdampf	15 °C * siehe auch Abschnitt 8.5	50 °C	35 °C	20 °C

\*) Schottenüberhitzer werden wie Berührungsüberhitzer behandelt.  
 \*\*) Definition der Beheizungsarten siehe Vereinbarung 1988/1  
 \*\*\*) Definition Sammler siehe TRD 203 Abschnitt 1.3

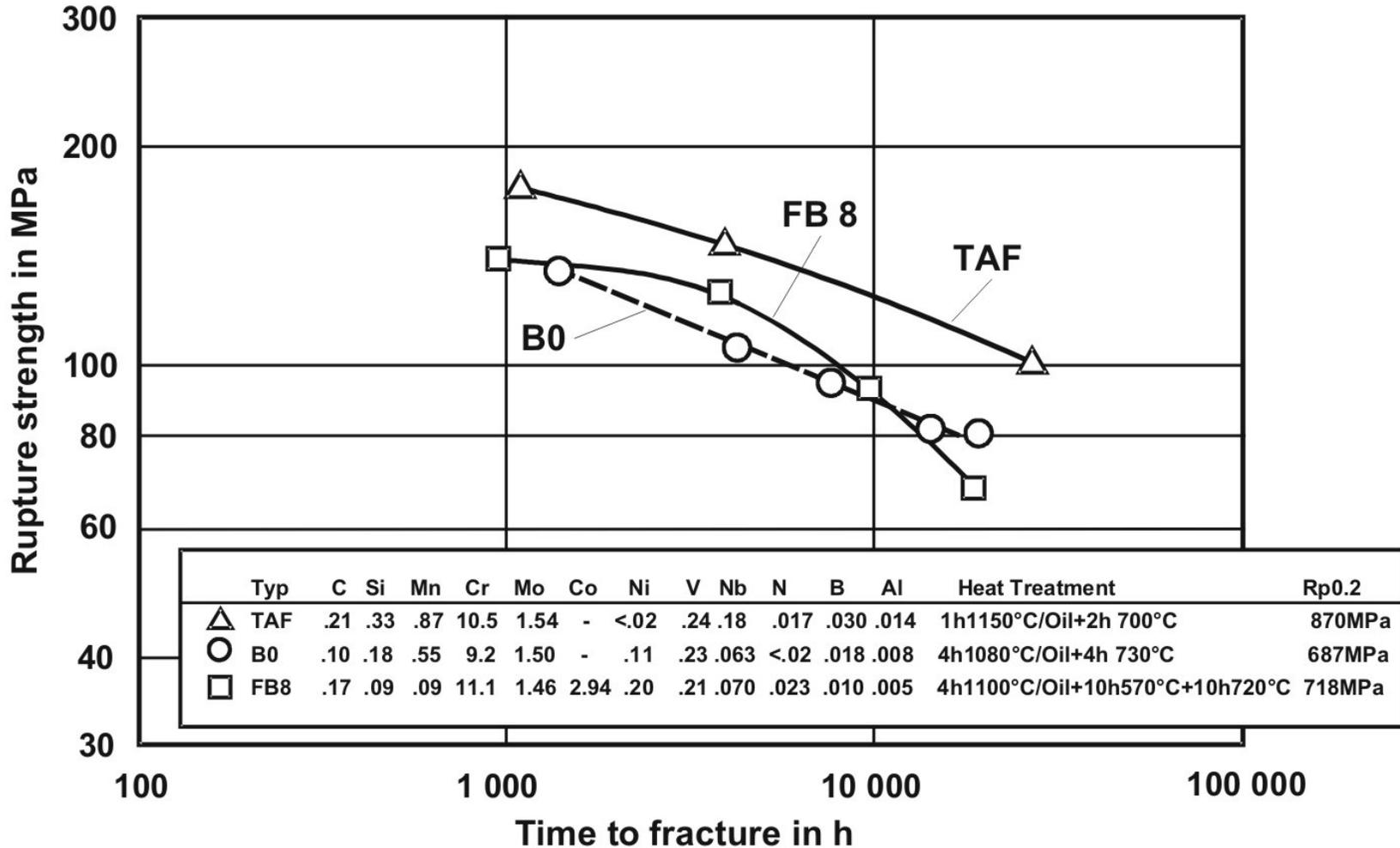
\* Bei unbeheizten heißdampf führenden Bauteilen kann 5 °C (Meßtoleranz) verwendet werden, wenn sichergestellt ist, dass die Auslegungsheißdampf temperatur nicht überschritten wird

Welche Anforderungen müssen Werkstoffe, die für hochbeanspruchte Hochtemperaturbauteile eingesetzt werden, erfüllen?

- **hohe Zeitstandfestigkeit bei hohen Temperaturen,**
- **hohe Streckgrenze und Zugfestigkeit,**
- **ausreichende Verformungsfähigkeit und Zähigkeit in allen**
- **Temperaturbereichen,**
- **gute Verarbeitbarkeit (Schweißen, Umformen),**
- **hohe Wärmeleitfähigkeit, geringer Wärmeausdehnungskoeffizient,**
- **gute Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit.**

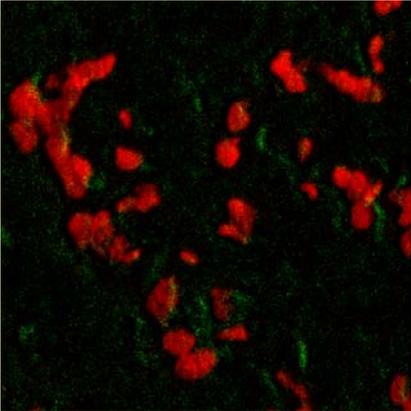
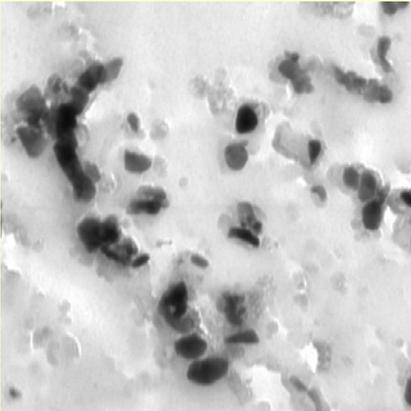
Warum ist eine hohe Gefügestabilität eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz eines Stahls im Hochtemperaturbereich ?

Test Temperature 650°C

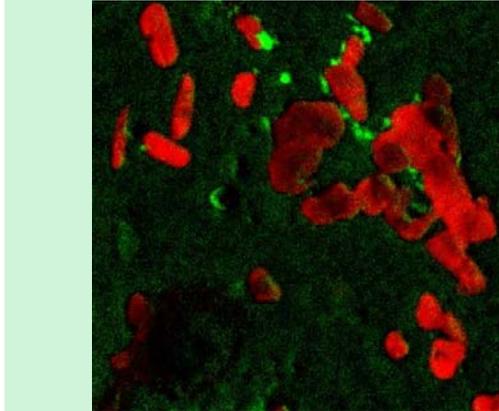
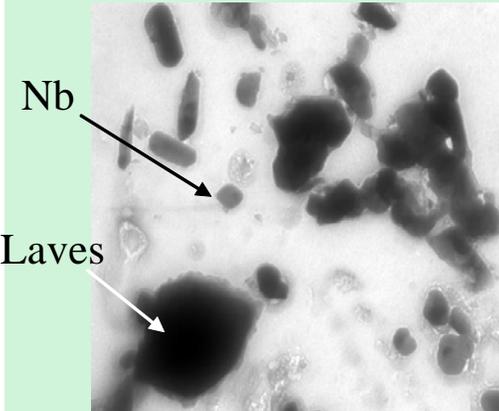


Warum ist eine hohe Gefügestabilität eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz eines Stahls im Hochtemperaturbereich ?

TAF AZ

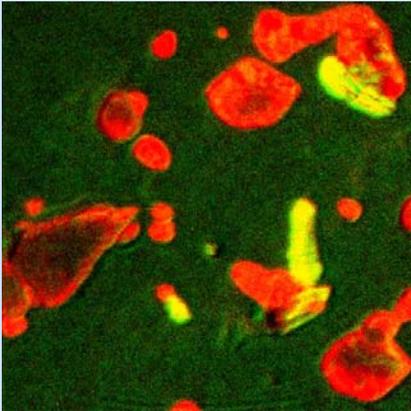
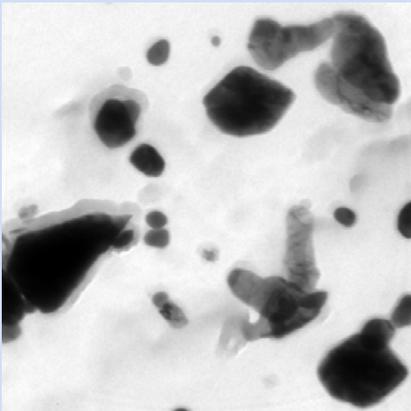


TAF /650 °C/100 MPa/26700 h

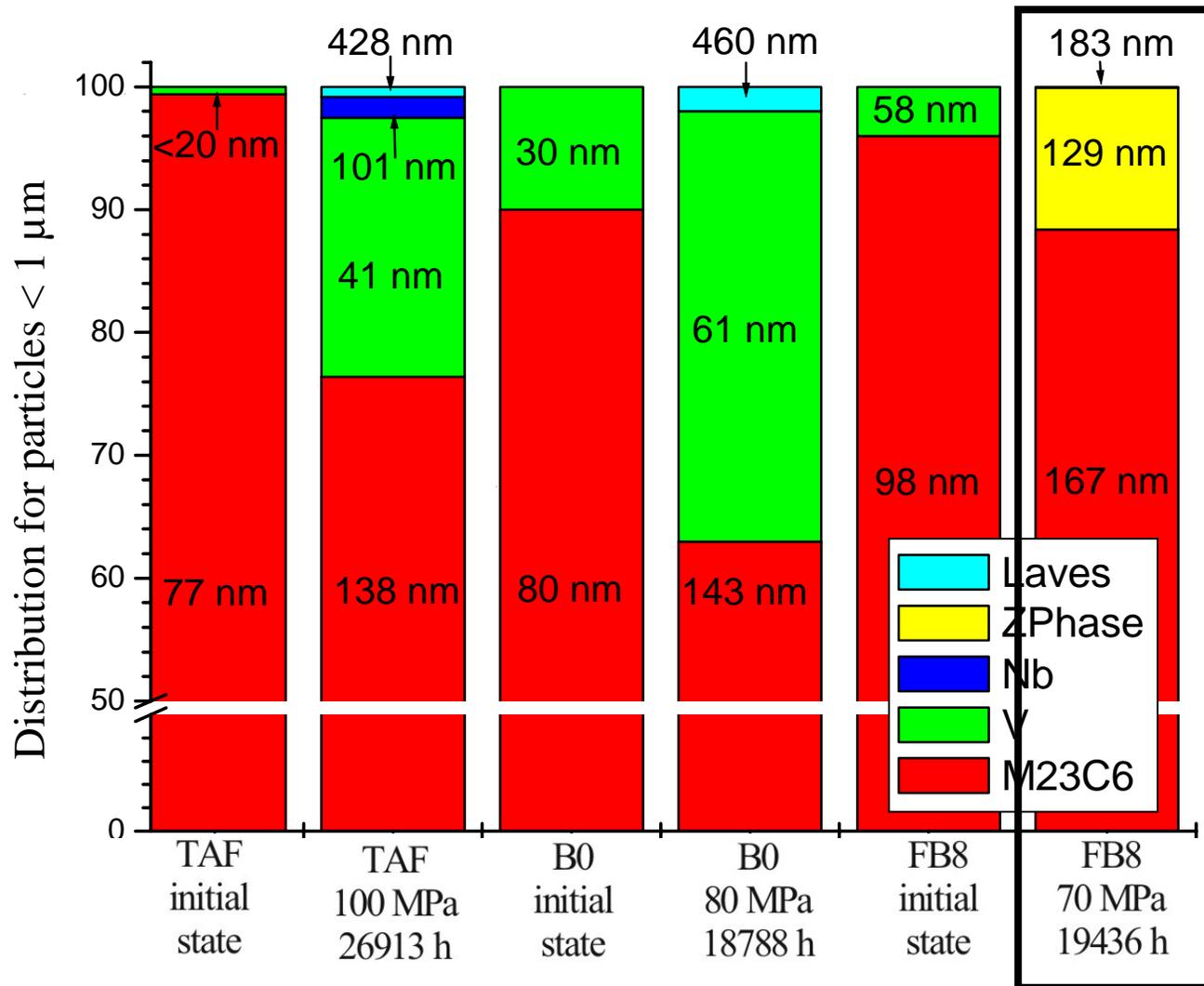


Geringere Stabilität:  
Z-Phase (gelb); MX (grün) weg  
Grobe Teilchen

FB8 /650 °C/80 MPa/18800 h



Warum ist eine hohe Gefügestabilität eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz eines Stahls im Hochtemperaturbereich ?



Warum sollte ein leistungsfähiger warmfester Stahl möglichst auch nach sehr langen Bruchzeiten noch hohe Kriechbruchverformungswerte aufweisen ?

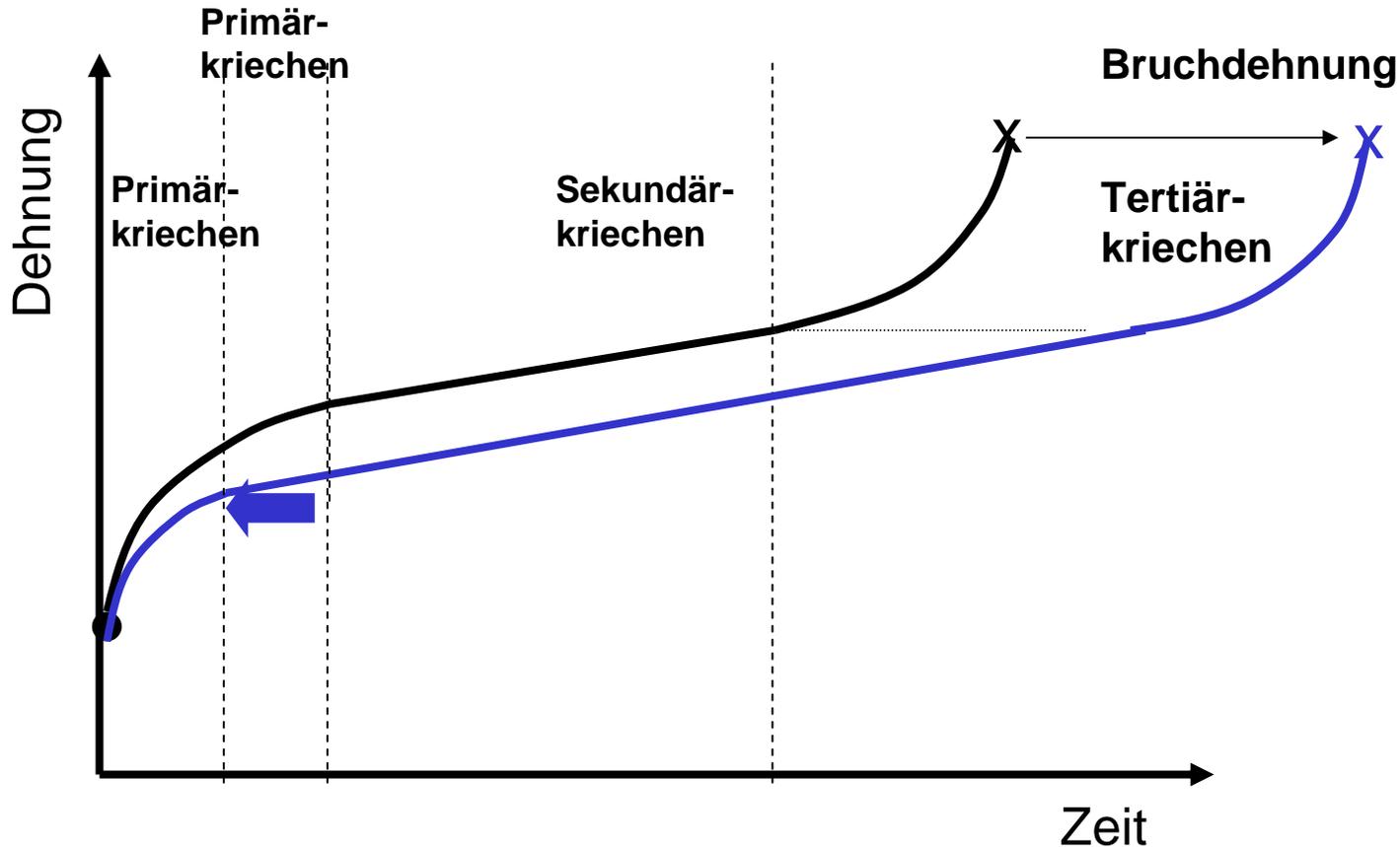
Erhöhte Fehlertoleranz, kritische Fehlergröße für Kriechrischwachstum nimmt nicht ab

Spannungsspitzen können durch Kriechumlagerungen abgebaut werden

Mehrachsigenzustand dadurch weniger kritisch

Warum ist eine geringe Primärkriechdehnung in Verbindung mit einem möglichst schnellen Erreichen der minimalen Kriechgeschwindigkeit maßgebend für die Langzeitstandfestigkeit eines Stahls ?

## Optimierung des Kriechverhaltens



Was ist die Bedeutung der  
der **Verfestigung** über die **Bildung von Austausch-Mischkristallen**  
der **feindispersen Ausscheidung von  $M_{23}C_6$**  bzw. **Sonderkarbiden**  
im Hinblick auf die **Zeitstandfestigkeit** ?

**Steigerung der Kurzzeitfestigkeit (Zugfestigkeit), wirkt sich im Kriechbereich wenig  
auf die langzeitige Kriechfestigkeit aus**

**Behinderung von Versetzungsbewegungen, steigert die Zeitstandfestigkeit**

Welche Werkstoffe sind moderne Neuentwicklungen:

13CrMo44  
10CrMo910  
X20CrMoV121  
9Cr1NoVNb (P91)  
7CrMoVTiB10 10  
X10CrMoNb9-10

<b>Stahl</b>	<b>Legierungstyp/Gefüge</b>	<b>Alter</b>
13CrMo44 (13CrMo4-5)	Niedriglegiert /ferritisch-perlitisch	>40 Jahre
10CrMo910	Niedriglegiert /bainitisch	>40 Jahre
7CrMoVTiB10 10	Niedriglegiert /bainitisch	>5Jahre
X20CrMoV121	hochlegiert /martensitisch	>40Jahre
9Cr1NoVNb (P91), X10CrMoNb9-10	hochlegiert /martensitisch	>5Jahre

Wenn Temperatur und Innendruck steigen, kann man auch die Wandstärke erhöhen um die Spannung herabzusetzen. Warum ist dies i. allg. unzweckmäßig ?

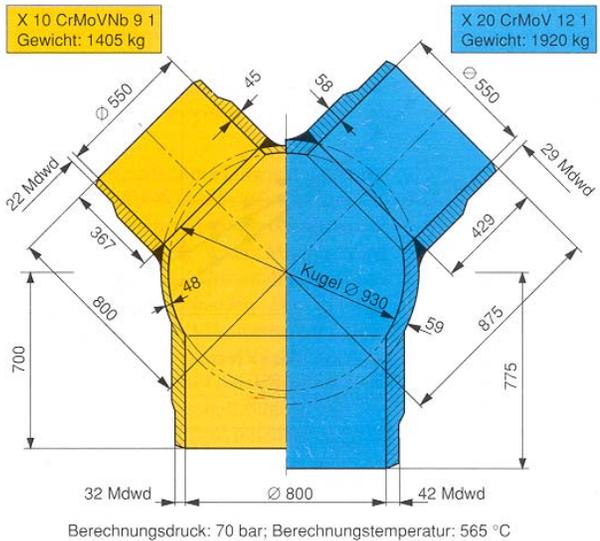


Bild 8. HZÜ-Kugelformstück X 10 CrMoVNb 9 1 für das VKR-Kraftwerk Schkopau im Vergleich zu X 20 CrMoV 12 1.

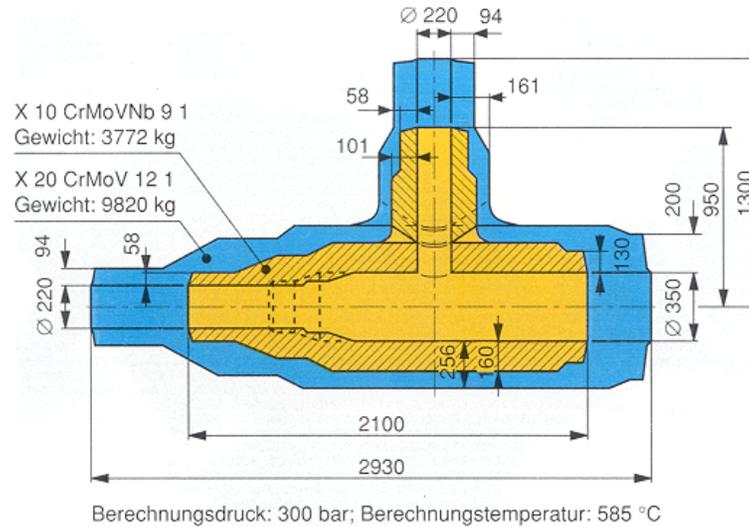


Bild 9. Dampfsiebgehäuse aus X 10 CrMoVNb 9 1/X 20 CrMoV 12 1.

- Größere Temperaturgradienten – Wärmespannungen
- Geringere thermische Flexibilität des Bauteils (Anfahrsgeschwindigkeit muss begrenzt werden)
- Größeres Gewicht, höhere Materialkosten, z. B. verstärkte Aufhängungen
- QS-Probleme

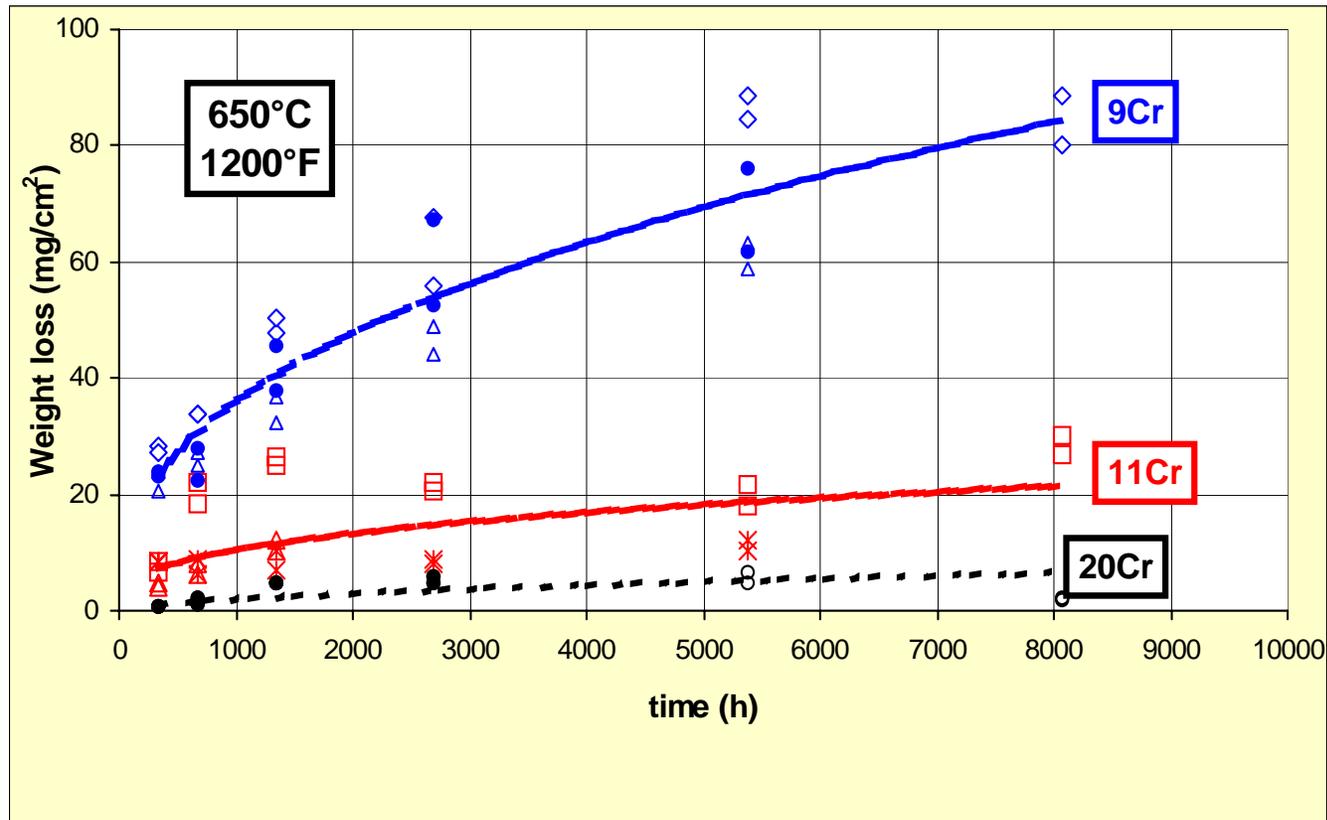
Wo liegt die Grenztemperatur (maximale Einsatztemperatur) für **ferritische** Stähle für Rohrleitungen im Kraftwerksbau ? Auf welche Werkstoffe muss dann übergegangen werden ?

Aktuell bei ca 610-620°

Wegen Langzeitkriechfestigkeit (Abfall der Langzeitstandfestigkeit wegen thermodyn. Instabilität von kriechfestigkeitsbestimmenden Ausscheidungen

Zusätzlich bei dünnwandigen beheizten Rohren Probleme mit Oxidationsbeständigkeit

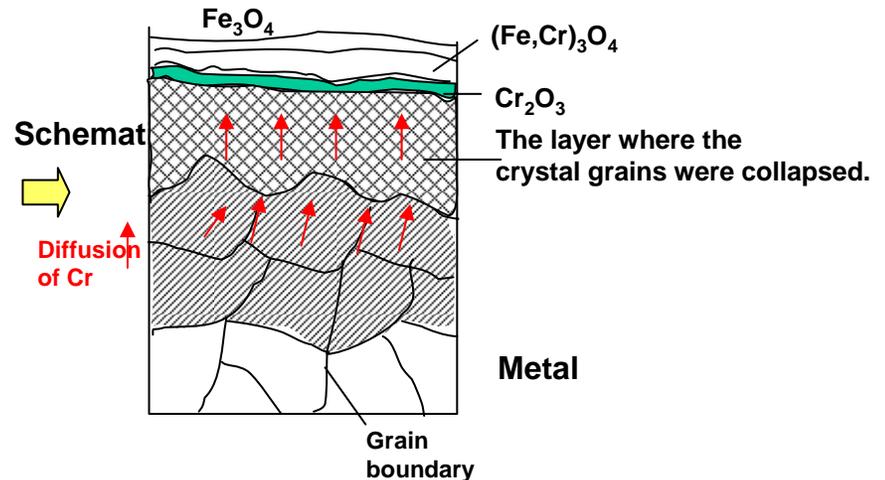
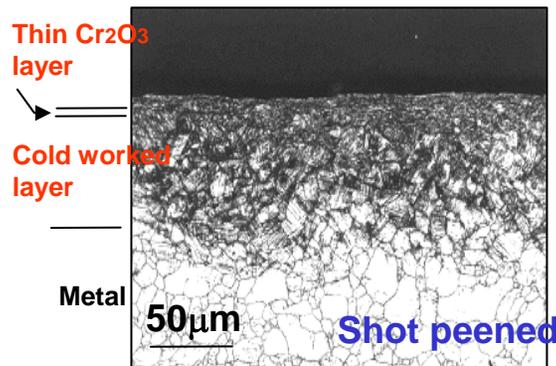
Weist ein 9%Cr-Stahl bei 610°C ausreichende Oxidationsbeständigkeit in Wasserdampf auf?



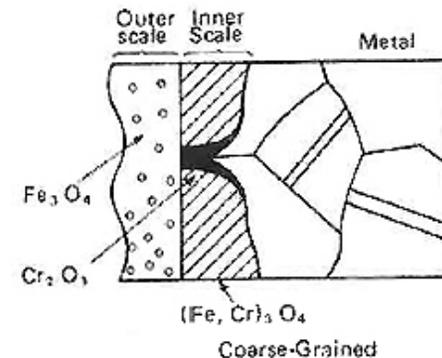
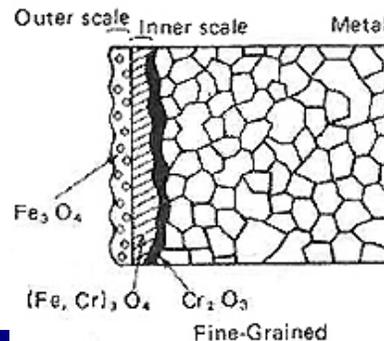
Wie kann man bei austenitischen Stählen die Oxidationsbeständigkeit in Wasserdampf erhöhen?

1. High Cr – Content > 24% e.g. HR3C, DMV 310N, Sanicro 25

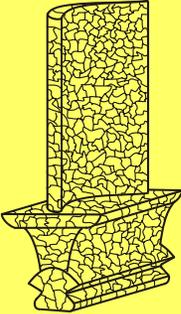
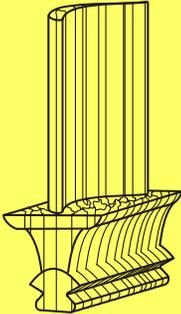
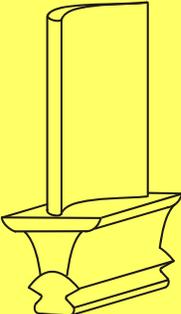
2. Shot Peening e.g. Super 304H



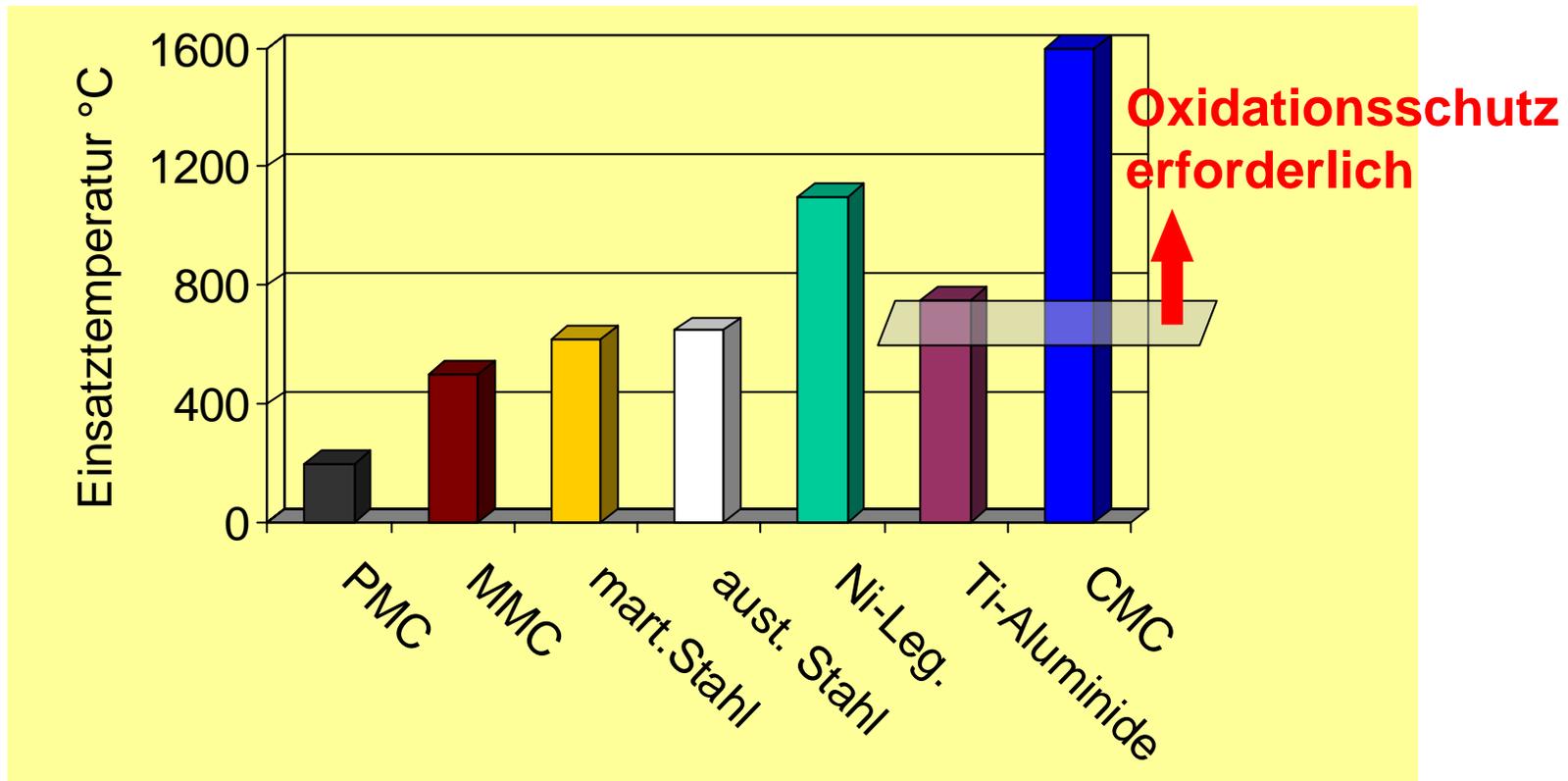
3. Fine Grain e.g. TP347H FG



Was bedeutet der Zusatz DS bei einer Nickellegierung?

Werkstoff		IN 738 LC	IN 792 DS	CMSX-4
Verfahren		CC (conventionally casted, polykristallin)	DS (directionally solidified, stengelkristallin)	SC (single crystal, einkristallin)
Volumenanteil $\gamma'$		45 %	60 %	70 %
Verbesserung bzgl. IN 738 LC	Kriechen	Referenz	$\Delta T = 50 \text{ K}$	$\Delta T = 100 \text{ K}$
	TMF ( $N_A$ )	Referenz	Faktor 7	Faktor 10
				

Welcher Werkstoff weist die höchste Temperaturanwendung auf: Titan-, Nickellegierungen, ferritischer Stahl, austenitischer Stahl, CMC, MMC?



Erklären Sie den prinzipiellen Aufbau einer Wärmedämmschicht und den Zweck der einzelnen Bestandteile

## Wärmedämmschichten WDS (nicht maßstäblich)

### Material



**Niedrige Wärmeleitfähigkeit  $1,5 - 2,2 \text{ Wm}^{-1}$   
Ausdehnungskoeffizient  $10 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$**

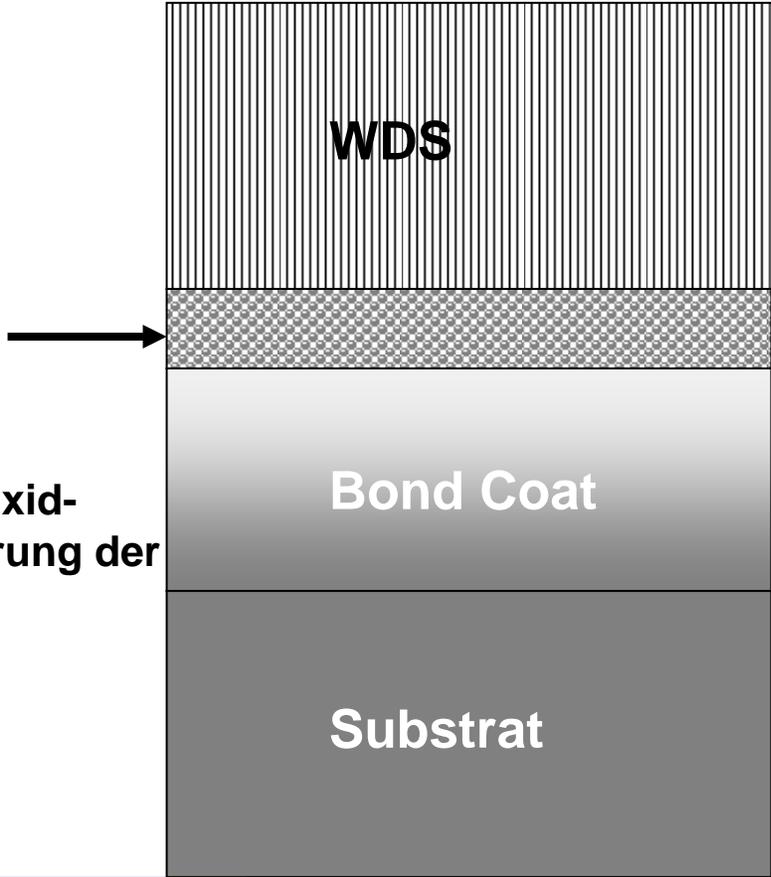
**Thermisch gewachsenes Oxid (TGO)  
(entsteht während des Betriebs)  
*MCrAlY, PtAl***

**Haftvermittler: Ausbildung einer dichten Al-Oxid-  
schicht zum Schutz des Substrats, Verbesserung der  
Haftung der WDS auf dem Substrat**

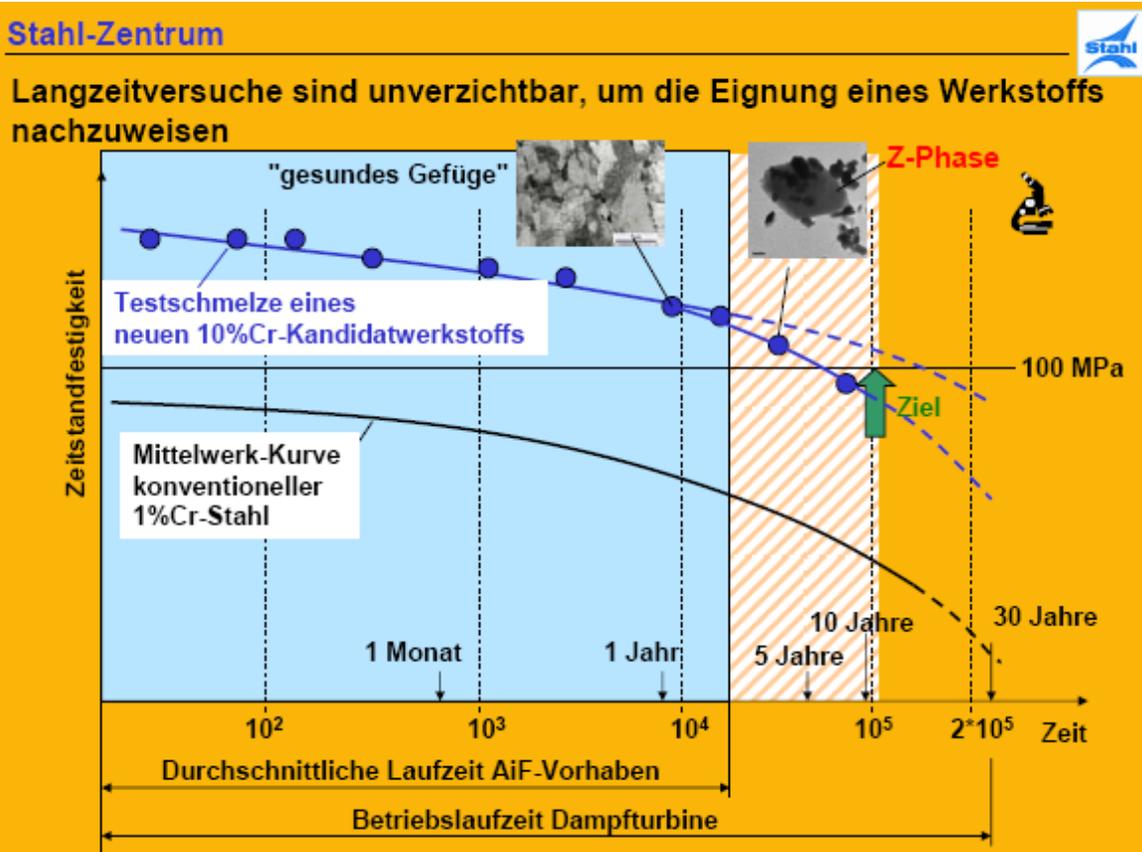
***Ni-Basis*superlegierung**

**Ausdehnungskoeffizient  $14 - 16 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$**

### WDS-System



Warum sollte die Extrapolation auf der Grundlage eines Stoffgesetzes - über die experimentellen Grundlagen hinaus, z. B. auf längere Zeiten, größere Dehnungen oder kleinere Spannungen – vorsichtig gehandhabt werden ?



Extrapolation kann werkstoffliche Änderungen nicht vorhersagen

Log Darstellungen geben die Belegung einer Kurve mit Punkten irreführend wieder

Nie mehr als Faktor 3 in der Zeit extrapolieren

Was ist bei Anwendung von Kriechgesetzen zu beachten, wenn keine konstante Spannungen vorliegen? Erklären Sie die hierbei anzuwendenden Verfestigungsregeln.

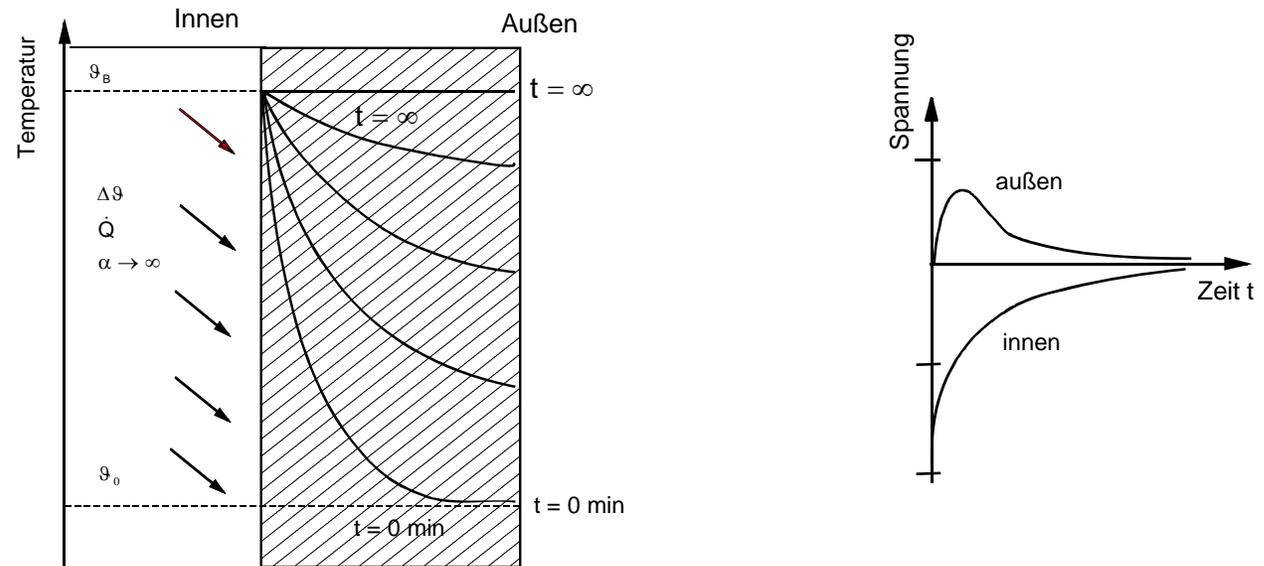
**Zeitstandversuche werden mit konstanter Last durchgeführt:  
Bei Querschnittsänderung ändert sich auch die Spannung  
⇒ Einfluß auf Dehnungsverlauf**

**Bei Spannungswechsel stellt sich ein anderes Kriechen ein, da bereits eine Vorverformung (Versetzungsdichte, Subkorngröße) vorliegt**

**Berücksichtigung über:  
Zeitverfestigungsregel  
Dehnungsverfestigungsregel  
Lebensdaueranteilregel**

Welche Spannungssituation stellt sich an der Oberfläche eines Bauteils ein, wenn heißer Dampf mit einem steilen Druckanstieg auf eine kalte Oberfläche auftrifft?

Druckspannung infolge behinderter Wärmedehnung – Thermoschock:  
Wenn örtliche die Streckgrenze überschritten wird, ergibt sich zusätzlich eine Eigenspannung



Führt bei Wiederholung nach Erreichen einer kritischen Lastspielzahl zum örtlichen Ermüdungs-Anriss

Was passiert während des Temperatureausgleichs, wenn die Spannungsspitze beim Anfahren:

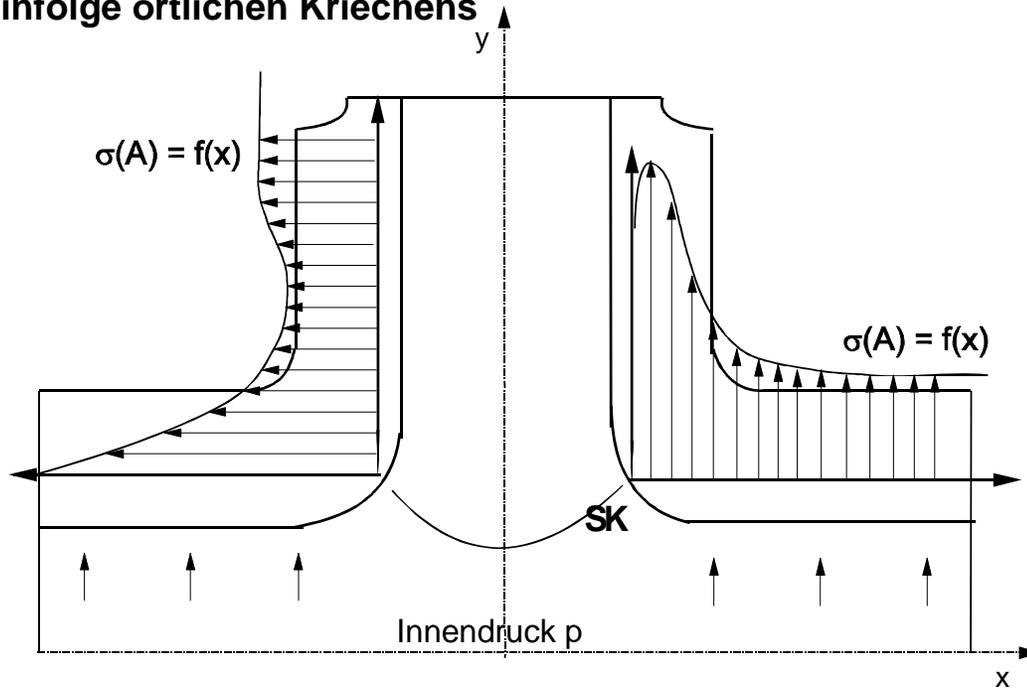
die (Warm)Streckgrenze nicht überschritten wird  
keine Kriechvorgänge stattgefunden haben ?

Die Vorgänge sind rein elastisch, die Hysterese enthält keine plastischen Anteile  
Theoretisch liegt die Beanspruchung im Bereich der Dauerfestigkeit

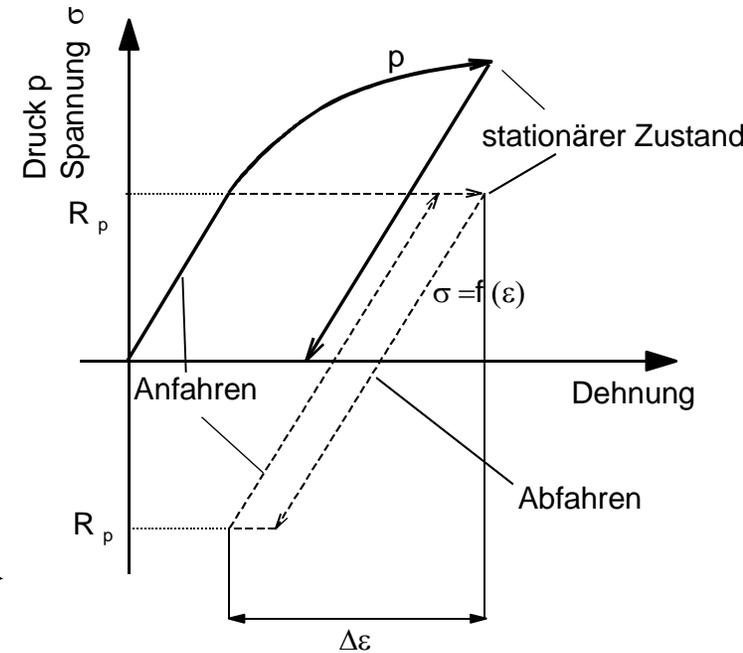
Was passiert während des Temperatureausgleichs, wenn die Spannungsspitze beim Anfahren

die (Warm)Streckgrenze überschritten wurde  
Kriechvorgänge stattgefunden haben?

Statisch mit Umlagerung  
infolge örtlichen Kriechens

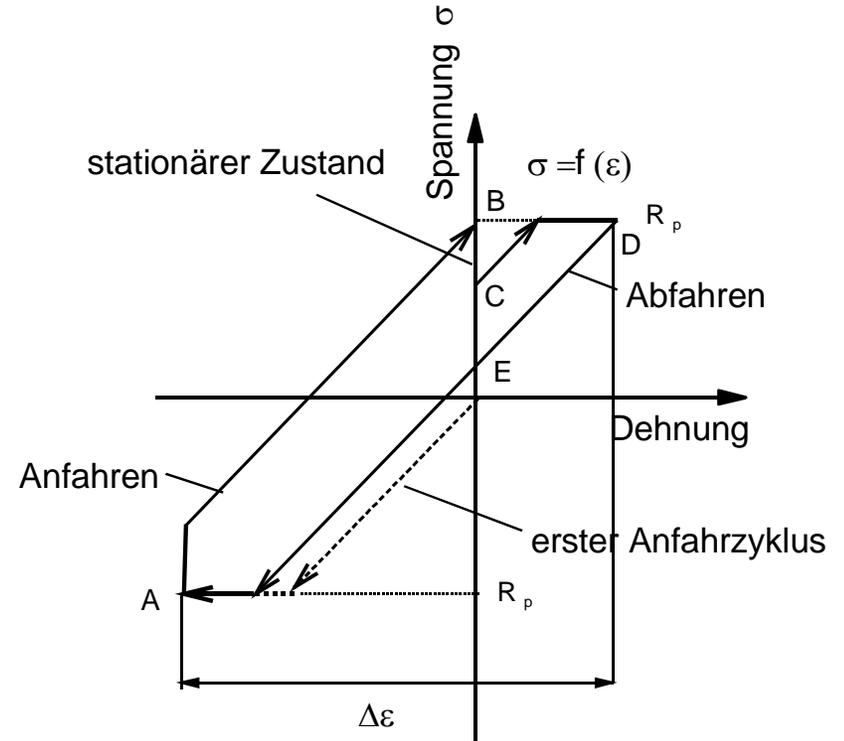
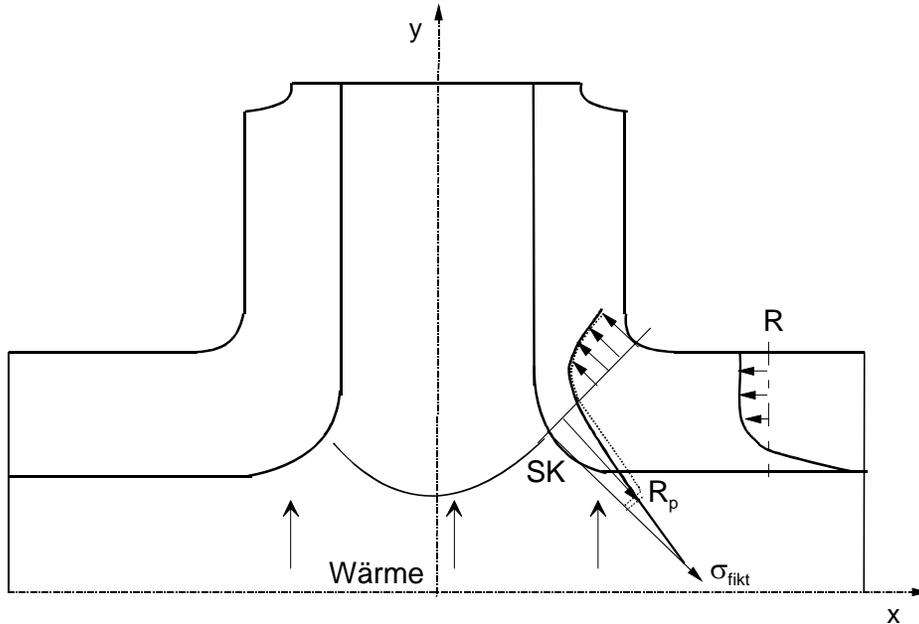


Wechselbeanspruchung  
teilplastisch, ohne Umlagerung

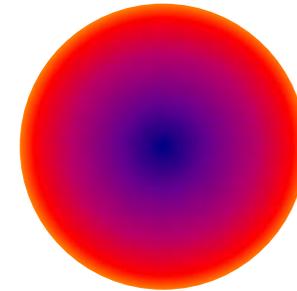
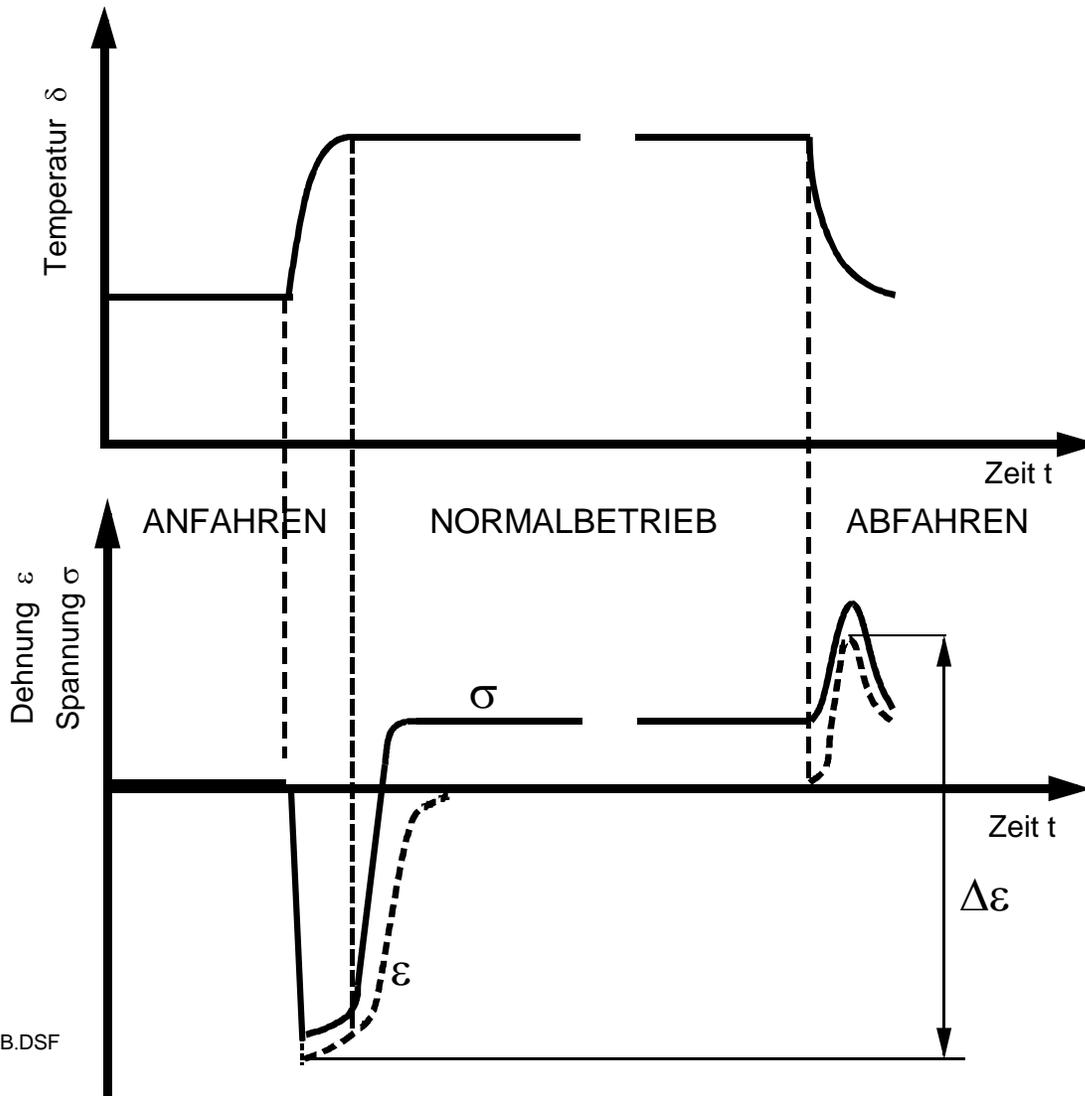


Was passiert während des Temperatureausgleichs, wenn die Spannungsspitze beim Anfahren

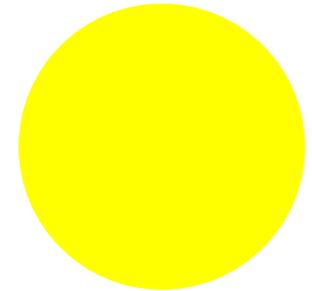
die (Warm)Streckgrenze überschritten wurde  
Kriechvorgänge stattgefunden haben?



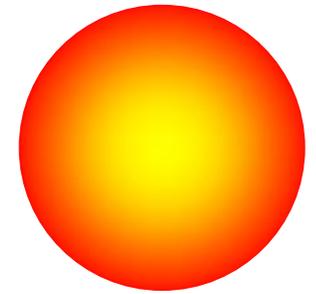
Wie kehren sich die Verhältnisse beim Abfahren um, d.h. wenn die Oberfläche abkühlt?



Behinderte  
Wärmedehnung  
Oberfläche



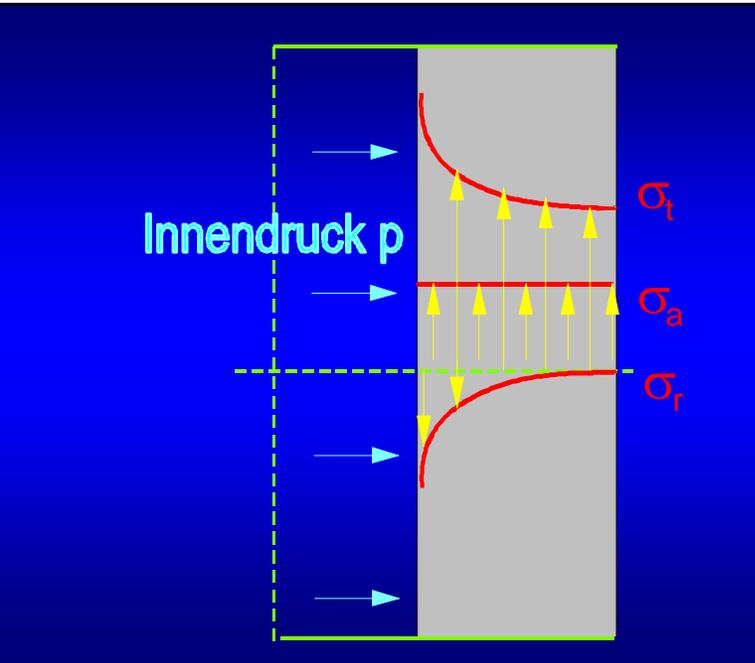
Ausgleich



Behinderte  
Wärmedehnung  
Zentrum

8\_2B.DSF

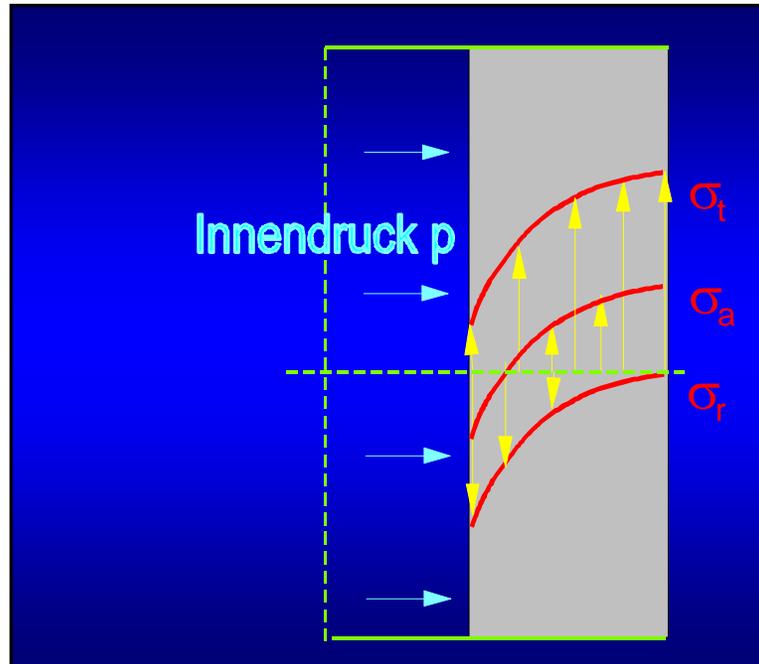
Skizzieren Sie die Spannungsverteilung in der Wand eines Druckbehälters unter Innendruck bei Raumtemperatur.



Elastische  
Spannungs-  
verteilung

Was passiert, wenn der Behälter im Kriechbereich eingesetzt wird. Welche Spannungsverteilung in der Wand stellt sich nach Spannungsumlagerung ein. Wo liegen nun die kritischen Stellen im Hinblick auf Kriechschädigung ?

Achtung:  
Spannungsverteilung wird von der Geometrie, Werkstoff, Belastung und Temperatur beeinflusst!



Nach Umlagerung  
infolge Kriechens

Was ist das Kennzeichen einer Thermoschockbeanspruchung:

- a) steiler Gradient der Temperaturverteilung über der Bauteilwand
- b) Hohe Temperaturdifferenzen  $\Delta T$
- c) Rissfelder mit transkristallinem Rissverlauf und begrenzter Tiefe .

a bis c trifft zu

