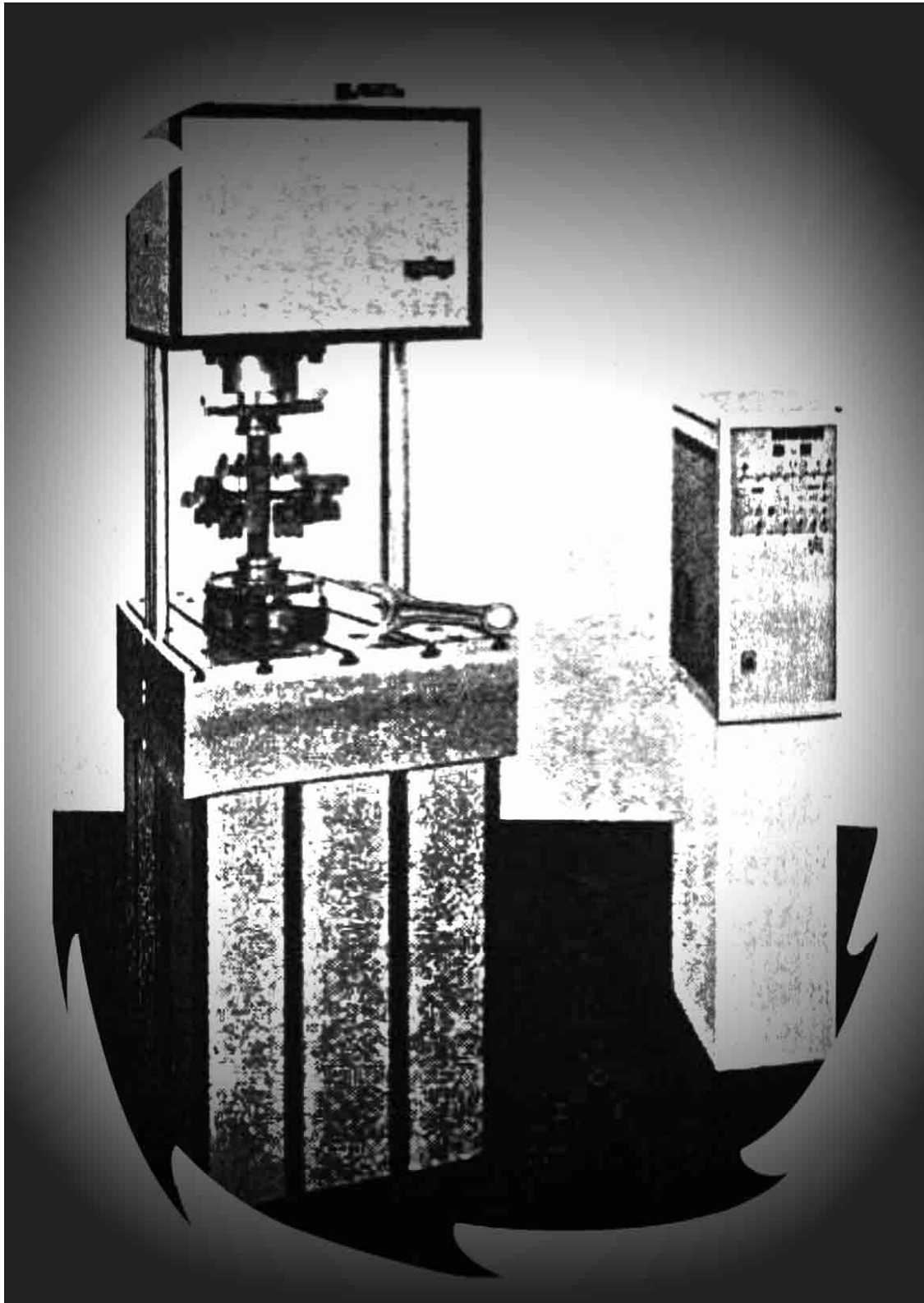
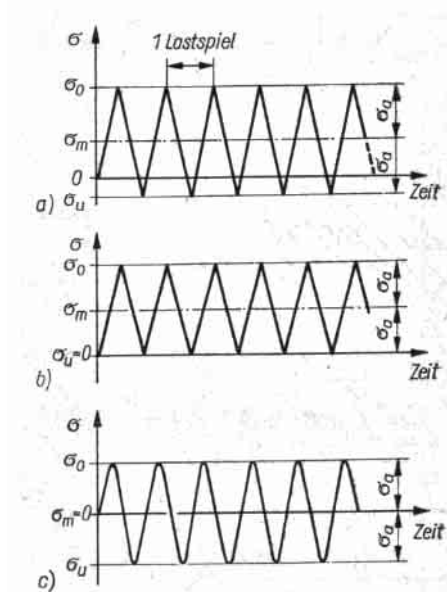


# Protokoll „Zyklische Beanspruchung“



### Frage 1:

Wie sind die Begriffe Oberspannung, Unterspannung, Spannungsaus Schlag, Schwingbreite, Mittelspannung, Spannungs- oder Lastverhältnis definiert?



- $\sigma_o$  = Oberspannung, größter auftretender Spannungswert je Lastspiel
- $\sigma_u$  = Unterspannung, kleinster auftretender Spannungswert je Lastspiel
- Zwischen diesen beiden festen Werten verläuft die Belastung des Werkstückes ab
- Mittelspannung  $\sigma_m = (\sigma_o + \sigma_u) / 2$
- $\sigma_a$  = Spannungsaus Schlag (unter Beachtung der Vorzeichen)  $\sigma_a = \pm (\sigma_o - \sigma_u) / 2$
- $2 \sigma_a$  = Schwingbreite  $2 \sigma_a = \sigma_o - \sigma_u$

### Frage 2:

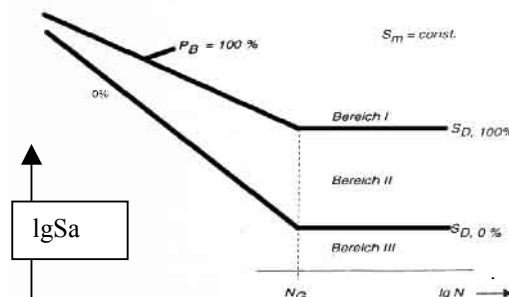
Wie erfolgt die Ermittlung eines Wöhlerkurvendiagrammes?

→ die Abhängigkeit der ertragbaren Schwingspielzahl von der Spannungsamplitude bezeichnet man als Wöhler-Diagramm oder S/N-Diagramm

$$S_a = f(N; S_m; P)$$

- $S_a$  → Spannungsamplitude
- $N$  → bis zum Eintreten des Ausfallkriteriums ertragene Schwingspielzahl
- $S_m$  → Mittelspannung
- $P$  → Ereigniswahrscheinlichkeit

→ der Spannungsaus Schlag und die zugehörige Schwingungsspielzahl werden auf logarithmischen Papier abgetragen



- $N_C$  Grenzwahrscheinlichkeit
- $P_B$  Ausfallwahrscheinlichkeit in %
- $S_a$  Spannungsamplitude
- $S_{DPA}$  Dauerschwingfestigkeit für Ausfallwahrscheinlichkeit PA
- $S_m$  Mittelspannung

→ die Beanspruchung soll so abgestuft sein, dass mindestens eine Probe bei hoher Schwingspielzahl bricht und eine weitere bis zur Grenzschnwingspielzahl durchläuft

Einteilung des Diagramms in folgende Gebiete:

→ niederzyklisches Festigkeitsgebiet, meist bezeichnet als Kurzzeitfestigkeit ( $N < 10^4$ )

→ hochzyklisches Festigkeitsgebiet, Zeitschwingfestigkeitsgebiet ( $10^4 N < 2 \cdot 10^6$  bis  $10^7$  je nach Werkstoff)

→ Dauerschwingfestigkeitsgebiet

Bereich I :

Zeitschwingfestigkeitsgebiet

Alle Proben brechen vor Erreichen der Grenzschnwingspielzahl  $N_G$ , wenn der Versuch genügend lange fortgesetzt wird

Bereich II :

Übergangsbereich zwischen Zeit- und Dauerschwingfestigkeit

Auf jedem Spannungsniveau treten Versager und Durchläufer auf

Bereich III :

Dauerschwingfestigkeitsgebiet

Auch nach beliebig großen Schwingzahlen sind keine Brüche zu verzeichnen

→ aus zahlreichen Versuchen geht hervor; und seine Legierungen

- dass Baustähle Kurventyp I haben dazu noch Titan

- dass kfz-Metalle und deren Legierungen sowie gehärtete Stähle weisen keine echte Dauerschwingfestigkeit auf, gehören zum Wöhler-Typ II, haben keinen zur N-Achse verlaufenden Ast

→ für Praxis wurde empfohlen den Knickpunkt der Wöhler-Kurve für Leichtmetalle und deren Legierungen bei einer Grenzschnwingspielzahl  $N_G = 10^7$  bis  $10^8$  und für Stähle  $2 \cdot 10^6$  bis  $10^7$

→ unter zusätzlicher korrosiver Belastung ist zu erwarten, dass es kein Dauerfestigkeitsgebiet gibt

→ 6 bis 10 vom Werkstoff, von der Gestalt und Verarbeitung her völlig gleiche Proben werden bis zum Bruch zyklisch beansprucht und dabei die jeweiligen Bruchspielzahlen ermittelt

→ für erste Probe meist hohe Belastung, welche rasch Bruch herbeiführt, dann für weitere Proben sinkend, bis trotz vieler Lastwechsel kein Bruch entsteht Durchläufer

→ Messwerte nichtgebrochener Proben werden mit Pfeil nach rechts oder rechts oben gekennzeichnet

gekennzeichnet

→ die Wöhlerkurve mündet nach schnellem Abfall in eine Parallele zur X-Achse ein, das ist Dauerschwingfestigkeit

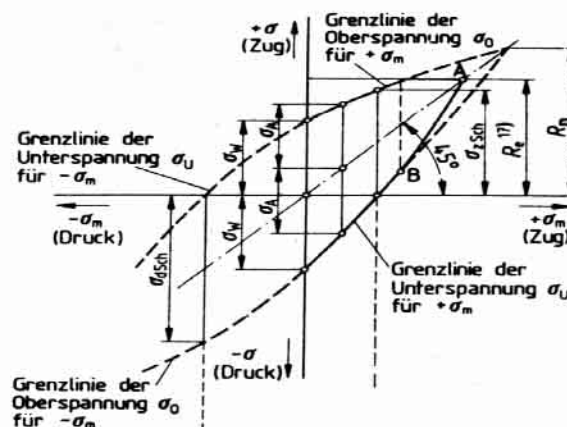
### Frage 3:

In Frage 2 beantwortet

### Frage 4:

Welche Bedeutung hat der als Dauerschwingfestigkeit bezeichnete Spannungswert bei der Dimensionierung von schwingend beanspruchten Bauteilen?

→ zur Dimensionierung von schwingenden Bauteilen werden Dauerschwingfestigkeitsdiagramme herangezogen



→ die im 45° Winkel eingezeichnete Hilfslinie gibt die jeweilige Mittelspannung an

→ die von den Grenzlinien eingeschlossene Fläche gibt für den betreffenden Werkstoff den dauerschwingfesten Bereich an

→ die Dauerschwingfestigkeit wird im Wöhler-Diagramm ermittelt

→ bei den meisten Maschinen und Bauwerken treten zyklische Beanspruchungen auf in Form von Schwingungen

→ Als Schwingung: Kraft-, Momentwechsel, Formänderung

→ Frequenzbereich von  $10^{-5}$  Hz (Temperaturschwankungen) bis  $10^4$  (Resonanzschwingungen)

→ bei Bauteilen die Schwingungen ausgesetzt werden dürfen als Kennwerte kein statisch ermittelten Werte herangezogen werden z.B.: Zugversuch, hier spielen vielmehr Schwingfestigkeit und Anzahl der Lastwechsel bis zum Schwingbruch eine Rolle

### Frage 5:

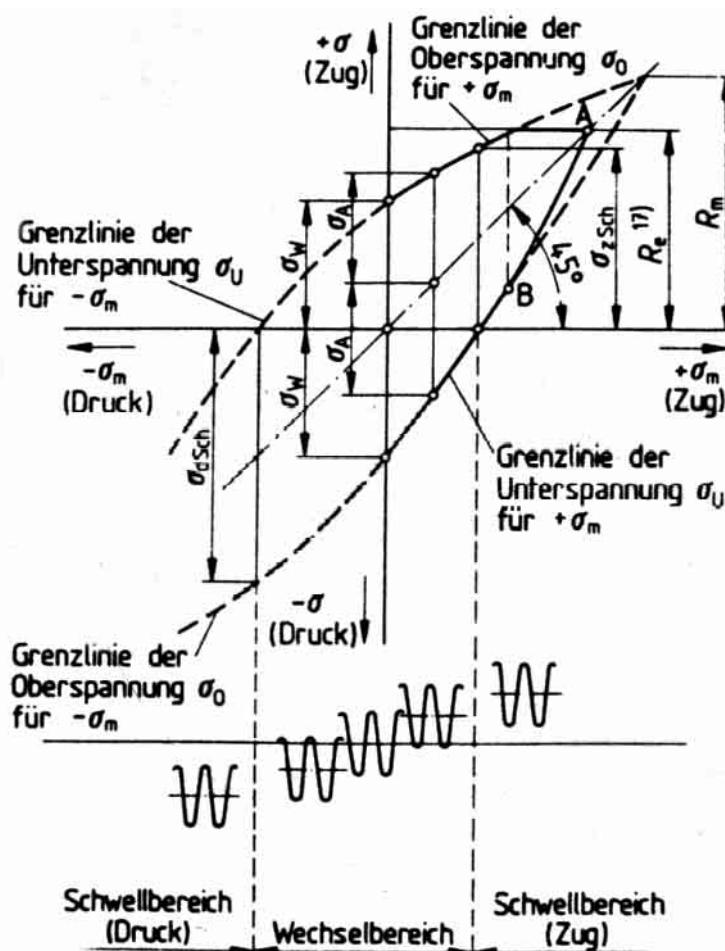
Was versteht man unter dem Dauerschwingfestigkeitsdiagramm nach Smith?

An welchen Stellen im Diagramm können die Dauerschwingfestigkeitswerte für Wechsel- und Schwellbelastung abgelesen werden.

→ mit dem Wöhler-Versuch erhält man nur Wert für Dauerschwingfestigkeit in einem Beanspruchungsbereich

→ das Dauerfestigkeits-Schaubild ermöglicht Zusammenfassung der Wöhler-Versuche in verschiedenen Beanspruchungsbereichen

→ das Dauerfestigkeits-Schaubild nach Smith wird im Maschinenbau häufig verwendet



→ auf der Abszisse Mittelspannung

→ auf der Ordinate Ober- bzw. Unterspannung

→ entstehen zwei Grenzlinien, welche den Bereich der Dauerfestigkeit des Werkstoffes angeben für verschiedene Beanspruchungsfälle

→ die Wechselfestigkeit ( $\sigma_m = 0$ ) wird auf der Ordinate angegeben

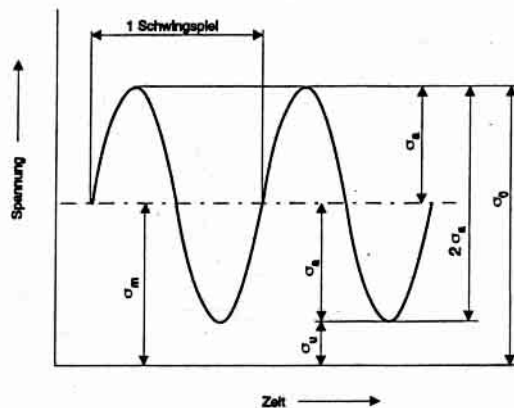
→ Schwellfestigkeit vom Schnittpunkt der Grenzlinien mit der Abszisse nach oben bzw. nach unten aufgetragen

→ mit zunehmender Mittelspannung nähern sich die beiden Grenzlinien d.h. der Spannungsausschlag  $\sigma_A$  wird kleiner

### Frage 6:

Skizzieren Sie den Last- Zeitverlauf eines Einstufenversuches bei Wechsel und Zugschwellspannung!

Mittelspannung  $\sigma_m$ ,  
Spannungsamplitude  $\sigma_a$ ,  
Oberspannung  $\sigma_o$ ,  
Unterspannung  $\sigma_u$ ,  
Schwingbreite  $2\sigma_a$ .



### Frage 7:

Welches Spannungsverhältnis liegt vor, wenn ein Bauteil durch Umlaufbiegung belastet wird?

### Frage 8:

In welchem Bereich liegt der Wert des Spannungsverhältnisses für folgende Bauteile unter den jeweiligen Einsatzbedingungen:  
- Trageseil eines Aufzuges  
- Spiralfeder eines Fahrzeuges

### Frage 9:

Weshalb reicht die Ermittlung von Wöhlerkurven aus Einstufenversuchen zur Dimensionierung zyklisch beanspruchter Bauteile häufig nicht aus? Wann ist die Ermittlung von Lebensdauerlinien unter Randombeanspruchung erforderlich?

- da Wöhlerkurve nur von einem Beanspruchungsbereich gilt
- Randomversuche: Kopplung von servohydraulische Maschinen mit Rechentechnik, was regellose Beanspruchung der Schwingversuche ermöglicht.
- Lebenslinie wenn im Versuch die Belastungen eines Bauteils aus einem Betrieb im Versuch durch Aufzeichnungen auf Magnetband nachgestellt werden

### Frage 10:

Was verstehen Sie unter Werkstoffermüdung?

- auf das Gefüge eines Werkstoffes wird solange ein äußerer Zwang ausgeübt, bis sich das Gefüge an der Spannungskonzentration aufspaltet (Riss) und es später zum Bruch kommt
- Einlagerung von Verunreinigungen mit den Jahren →→ Korrosion

### Frage 11:

Welche Faktoren beeinflussen die Schwingfestigkeit eines Bauteils?

- Kerben im Bauteil (Bohrungen, Gewinde, Drehriefen, Rostnarben ....)
- Eigenspannung
- Form und Größe der Proben:
  - stammt aus verschiedenen Schmelzen (Verformungsgrad Korngröße....)
  - unterschiedliche Abmessungen (Unterschiede im Verformungsgrad)
- Korrosion
  - gleichmäßige Flächenkorrosion
  - Narben- und Lochkorrosion

- Kontakt- und Berührungskorrosion
  - Spaltkorrosion
  - Selektive Korrosion
  - Interkristalline Korrosion
- Temperatur – allgemein nimmt Schwingfestigkeit bei fallender Temperatur zu

**Frage 12:**

*Mit welchen technologischen Maßnahmen bei der Bauteilfertigung kann die später ertragbare Schwingspielzahl eines Bauteils beeinflusst werden?*

- durch Trainieren
- Werkstoff wird erst unter Dauerfestigkeit belastet und dann langsam erhöht
- somit tritt eine Steigerung der Dauerfestigkeit ein
- bei weichen Stählen bis zu 30 %
- Voraussetzung : möglichst lange ( $> 2 \cdot 10^6$  Schwingspiele) und möglichst hohe ( $> 0,85 \sigma_D$ )
- eine Erhöhung bei glatten Proben und Bauteilen wird beobachtet, wenn längere Belastungspause auftreten, kann durch zwischenzeitlich leichte Erwärmung gefördert werden (Drahtseile, Kettenglieder)

**Frage 13:**

*Welchen Einfluss haben Zug- oder Druckeigenspannungen in der Bauteiloberfläche auf die Lebensdauer eines zyklisch belasteten Bauteils?*

- durch Druckeigenspannung und eine erhöhte Streckgrenze in der Randzone lassen sich die Steigerungen der Schwingfestigkeit bis zu 100 % unter besonderen günstigen Umständen auch darüber erzielen
- Zugeigenspannungen sowie eine erniedrigte Streckgrenze im oberflächennahen Bereich setzen die Schwingfestigkeit herab
- wegen Schwierigkeiten bei der Messung der Auswirkungen der Eigenspannungen und der Streckgrenzveränderung kann man nur die Resultate beobachten

**Frage 14:**

*Wie sind Formzahl und Kerbwirkungszahl definiert? In welchem Zusammenhang stehen Formzahl und Kerbwinkelzahl?*

- Formzahl:
  - an Spannungskonzentrationsstellen, an denen Maximalspannungen  $\sigma_{max}$ , die über der Nennspannung  $\sigma_{nenn}$  liegen, auftreten
  - zur Kennzeichnung der Spannungsüberhöhung am Kerbgrund wird bei statischer Beanspruchung die Formzahl  $\alpha_K$ , auch Kerbfaktor genannt
  - $\alpha_K = \sigma_{max} / \sigma_{nenn}$
  - die auf den Querschnitt der Kerbebene bezogene statische Festigkeit wird durch Kerben erhöht, was auf Mehrachsigkeit des Spannungszustandes zurückzuführen ist
  - nur unmittelbar an der Oberfläche des Kerbgrundes, wo die zweite und dritte Hauptspannung gleich Null sind, tritt Verformung und Verfestigung ein, sobald  $\sigma_{max}$  die Streckgrenze  $R_e$  erreicht hat
  - für das Eintreten der plastischen Verformung ist nicht mehr die Maximalspannung sondern die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  verantwortlich
  - die Maximalspannung kann deshalb größer als  $R_e$  sein ohne das plastische Verformung kommt
  - bei zyklischer Beanspruchung sind die Spannungsamplituden größer als die Streckgrenze
  - analog zur statischen Beanspruchung kann die Lebensdauer gekerbter Proben größer als die glatter Proben sein
  - im Gebiet der Zeit- und Dauerfestigkeit haben jedoch gekerbte Proben eine geringere Festigkeit
- Kerbwirkungszahl
  - der Einfluss der Kerben bei zyklischer Beanspruchung wird durch die Kerbwirkungszahl beschrieben
  - ist das Verhältnis der Schwingfestigkeiten glatter zu gekerbter Proben
  - $\beta_K = \sigma_N / \sigma_{NK}$
  - $\sigma_N$  → Schwingfestigkeit (Zeit- oder Dauerfestigkeit) glatter Proben
  - $\sigma_{NK}$  → Schwingfestigkeit gekerbter Proben
  - die Kerbwirkungszahl kann also im Bereich der Kurzzeitfestigkeit  $<1$  sein, in den Bereichen der Zeitfestigkeit und der Dauerfestigkeit ist sie  $>1$

- die Formzahl kann berechnet werden, bezeichnet aber nur die Kerbgeometrie ohne Berücksichtigung des Werkstoffaufbaus und -zustandes
- die Kerbwirkungszahl kann nicht berechnet werden sondern nur aufwändig experimentell bestimmt
- die Kerbwirkungszahl ist stets kleiner als die Formzahl

**Frage 15:**

Ordnen Sie die Werkstoffe S 235(ST 37), E360(ST 70) und C100W1 nach ihrer Kerbempfindlichkeit!

- C 100 W 1 = unlegierter Kaltarbeitsstahl
- E 360
- S 235

**Frage 16:**

Was verstehen Sie unter dem zyklischen Spannungsintensitätsfaktor?

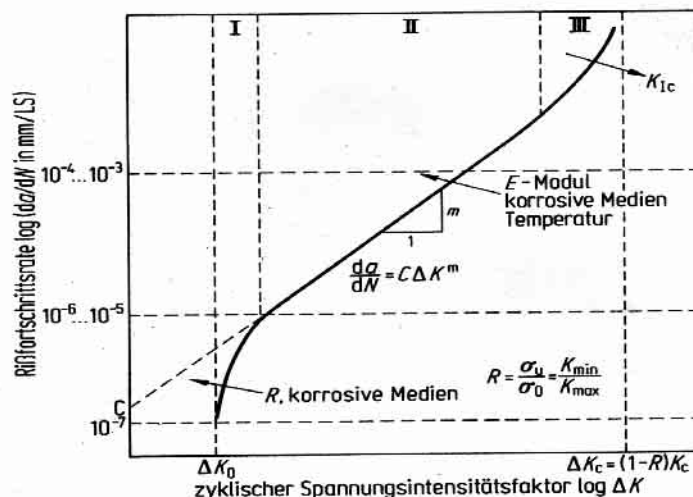
- für statische Beanspruchung
- Alle Gleichungen zur Berechnung von  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  sowie  $\tau_{xy}$  (Schubspannung) weisen aus, dass die örtlichen Spannungen in der Nähe eines Anrisses von dem Produkt aus der Nennspannung und der Quadratwurzel der Anrisslänge  $2a$  abhängen. Dieses Produkt wird Spannungsintensitätsfaktor  $K$  genannt. Für eine unendlich ausgedehnte Platte mit einem durchgehenden scharfen Innenriss gilt:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad \sigma = \text{auf den gesamten Querschnitt einschließlich der Rissfläche bezogene Nennspannung}$$

Der Spannungsintensitätsfaktor  $K$  hängt von den Proben- bzw. Bauteilabmessungen und der Rissgeometrie ab. Für nicht unendlich große Proben muss deshalb zur Berechnung von  $K$  ein dimensionsloser Korrekturfaktor  $Y = f(a/W)$  eingeführt werden:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} * Y \quad W = \text{Probenbreite}$$

- der Lebensdaueranteil der unterkritischen Rissausbreitungsphase kann auch mit dem Spannungsintensitätsfaktor  $K_i$  abgeschätzt werden
- dabei ist zu berücksichtigen dass der Wert mit Risslänge zunimmt
- der Rissfortschritt  $\Delta a$  pro Lastwechsel lässt sich in Abhängigkeit des zyklischen Spannungsintensitätsfaktor  $\Delta K$  ( $\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \Delta \sigma * \sqrt{\pi a f}$ ) darstellen
- siehe Grafik: m Bereich I beginnt das unterkritische Risswachstum erst nach überschreiten des Schwellwertes  $\Delta K_0$ , der deutlich von dem Spannungsverhältnis  $R = \sigma_a / \sigma_0$ , d.h. der Mittelspannung beeinflusst wird
- mit zunehmendem  $R$ -Wert nimmt der  $\Delta K_0$ -Wert ab, unterhalb dieses Wertes breitet sich der makroskopische Ermüdungsriss nicht weiter aus
- im Bereich II findet ein kontinuierliches Risswachstum statt
- dieser Bereich kann mit der Paris-Gleichung beschrieben werden  $da/dN = C(\Delta K)^m$



- die Konstanten  $C$  und  $m$  hängen vom Werkstoff, der Beanspruchung und der Temperatur ab

→ durch Integration der Gleichung in den Grenzen  $a_0$  (Anfangsriszlänge) und  $a_c$  (kritische Riszlänge) bzw.  $a_{zul}$  (zulässige Riszlänge), kann man die Bruchlastspielzahl  $N_B$  bzw. die zulässige Lastspielzahl  $N_{ZUL}$  berechnen

→ diese sind erforderlich, um einen Riss von  $a_0$  auf  $a_c$  bzw.  $a_{zul}$  wachsen zu lassen

$$N_{B/zul} = \frac{1}{\left(\frac{m-2}{2}\right) C \cdot f^m \cdot \pi^{\frac{m}{2}} \cdot (\Delta\sigma)^m} \cdot \left[ \frac{1}{a_0^{\frac{m-2}{2}}} - \frac{1}{a_{c/zul}^{\frac{m-2}{2}}} \right]$$

→ im Bereich III läuft der Rissfortschritt beschleunigt ab und geht für  $\Delta K = K_c = (1-R)K_c$  in den Bruch über

→ erweiterte Rissfortschrittskonzepte berücksichtigen den Einfluss der Mittelspannungen, Eigenspannungen und die Wirkung variabler Spannungsamplituden

**Frage 17:**

*Was versteht man unter dem Schwellwert für Ermüdungsrissausbreitung?*

-mit zunehmendem R-Wert nimmt der  $\Delta K_0$ -Wert ab, unterhalb dieses Wertes breitet sich der makroskopische Ermüdungsriss nicht weiter aus

**Frage 18:**

*Welche Aussage lässt sich aus dem Vergleich von zyklischem Spannungsintensitätsfaktor und Schwellwert für die Ermüdungsrissausbreitung ableiten?*

**Frage 19:**

*Was versteht man unter der Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors?*

**Frage 20:**

*Skizzieren Sie den prinzipiellen Verlauf der Risswachstumsgeschwindigkeit  $da/dN$  in Abhängigkeit von der Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors  $\Delta K$ ! Welche Faktoren beeinflussen die Lage der Kurve?*

→ Antwort: Frage 16

**Frage 21:**

*Geben Sie die Paris-Erdogan-Gleichung an und erläutern Sie die darin enthaltenen Größen!*

→ Antwort: Frage 16

**Frage 22:**

*Wie kann die Abschätzung der Restlebensdauer eines anrissbehafteten Bauteils erfolgen?*