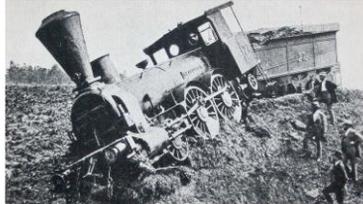


Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

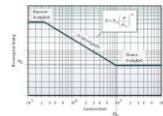


Sommerschule Rostock VHCF
Juni 2014

Dr.-Ing. Klaus F. Stärk
Untersiggenthal/Schweiz



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

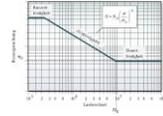


Gliederung

1. 150 Jahre Wöhler
2. Werkstoff und Gefüge
3. LCF-HCF-VHCF-ERW
4. Schädigung und Schädigungsmass
5. Quantitative Thermometrie
6. Energie-Hypothese
7. Extrapolation HCF-VHCF
8. Ausblick



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

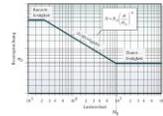


Gliederung

1. 150 Jahre Wöhler
2. Werkstoff und Gefüge
3. LCF-HCF-VHCF-ERW
4. Schädigung und Schädigungsmass
5. Quantitative Thermometrie
6. Energie-Hypothese
7. Extrapolation HCF-VHCF
8. Ausblick



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

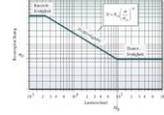


Spektakuläre Schadensfälle führten
fast immer zu
Entwicklungsanstößen und zu
neuen Sicherheitsbetrachtungen

- Timelkam (Radreifen): Ermüdung, HCF, Dauerfestigkeit
- Dampfkessel (Explosionen): Kriechen, LCF-Ermüdung, TÜV
- Liberty-Frachter: Schweißtechnik, Versprödung, Bruchmechanik
- Comet (Fenster): LCF-Ermüdung, Design, Bruchmechanik
- Eschede (Radreifen): Ermüdung, VHCF, Design, Werkstoff
- Formel 1 (Todesfälle): CFK, Design, Sicherheitszelle



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



VHCF very high cycle fatigue

HCF → VHCF > 10¹⁰cy

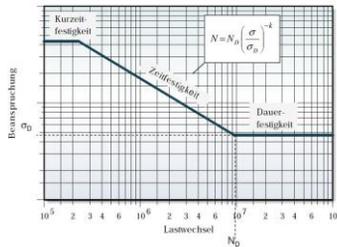
Rotor (Umlaufbiegung): 50Hz, 10¹⁰ cycle= 6.3 Jahre

Rohr (Schwingungen): 100Hz, 10¹⁰ cycle= 3.2 Jahre

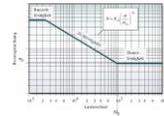
Leitschaufel ("): 350Hz, 10¹⁰ cycle= 0.9 Jahre

Laufschaufel ("): 24x50Hz, 10¹⁰ cycle= 3.1 Monate

das ist
nicht
„ewig“



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



Werkstoff

homogen+isotrop – statistisch – lokal

„Harmoniker“



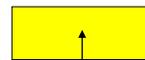
allg. Werkstoffprüfer

„Zweifler“



Statistiker

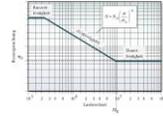
„Exzentriker“



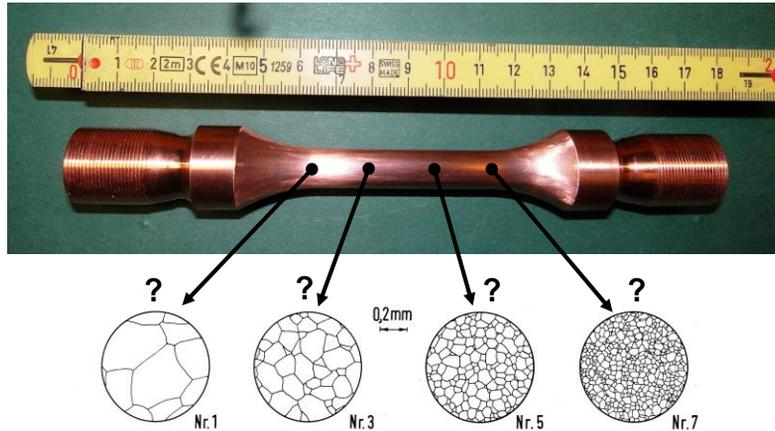
Bruchmechaniker



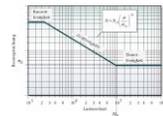
Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



Werkstoff und Gefüge



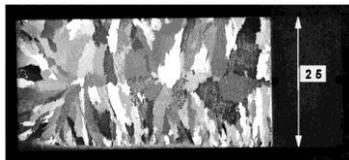
Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



Werkstoff und Gefüge



MarM247cc



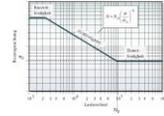
?

OF-Cu

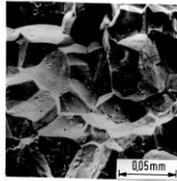




Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

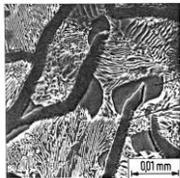


Werkstoff und Gefüge



interkristalliner Bruch
(Spannungsrissskorrosion
12%-Cr-Stahl)

Bruchstruktur eines
12% Cr-Stahles bei
interkristalliner
Spannungsrissskorrosion
(RBM)



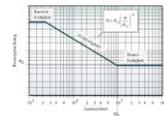
Perlit Gefüge lamellarer
Ferrit Grauguss GG-20
Graphitlamelle

- Gefüge
- Reinheit
- Homogenität

das
„homogene“
Material



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

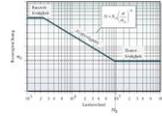


Gliederung

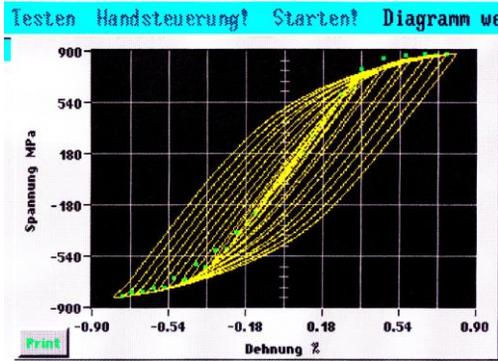
1. 150 Jahre Wöhler
2. Werkstoff und Gefüge
3. LCF-HCF-VHCF-ERW
4. Schädigung und Schädigungsmass
5. Quantitative Thermometrie
6. Energie-Hypothese
7. Extrapolation HCF-VHCF
8. Ausblick



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



Hysterese, Gesamtdehnung, plastische Dehnungsamplitude

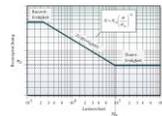


IST
Incremental
Step Test

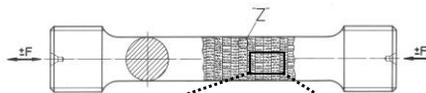
LCF → HCF → VHCF
die
„elastische“
Hysterese



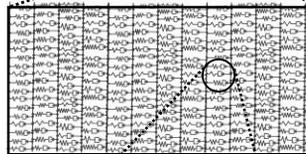
Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



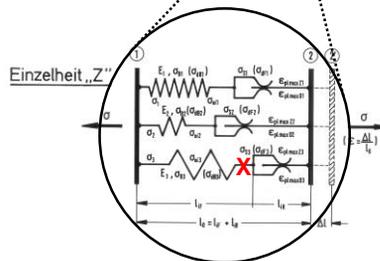
Der
„Harmoniker“



Der
„Statistiker“

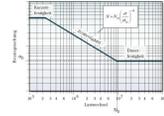


Der
„Exzentriker“

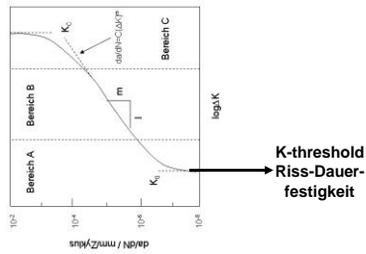
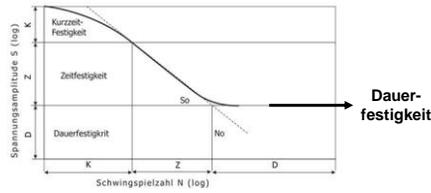




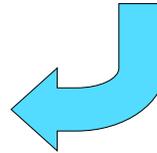
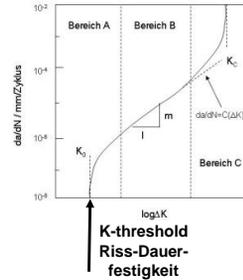
Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



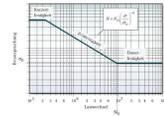
Ermüdung



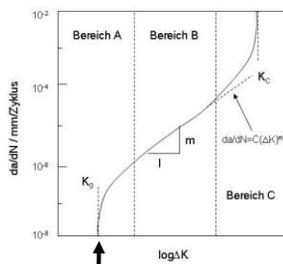
Risswachstum



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



threshold Riss-Stopp
 $da/dN < 10^{-12} \text{ m/cy}$



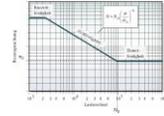
Riss-Dauerfestigkeit



„Oberflächenriss“

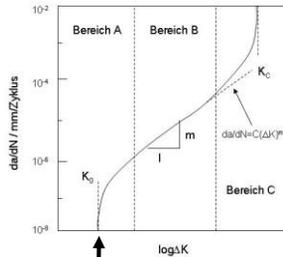


Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

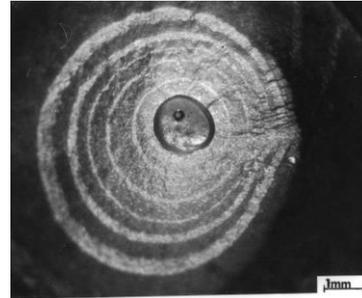


threshold Riss-Stopp

$$da/dN < 10^{-12} \text{ m/cy}$$



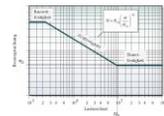
Riss-Dauerfestigkeit



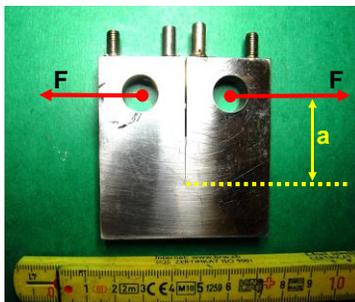
„innenliegender Fehler“
HCF-Blöcke mit beach marks an Schweisspore



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



VHCF very high cycle fatigue



Beispiel:

Werkstoff 12%-Cr-Stahl
Dauerfestigkeit $\sigma_D = 500 \text{ MPa}$
Threshold $\Delta K_{th} = 4.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

→ Innenliegende Fehlstelle (Riss) unter Ermüdung (Abschätzung)

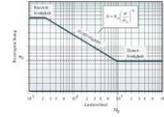
$$\Delta K_{th} = \Delta \sigma_D \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

$$\sqrt{\pi \cdot a} = \Delta K_{th} / \Delta \sigma_D = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

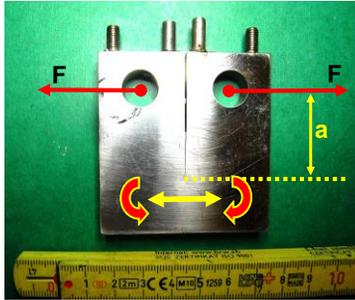
→ Fehlerdurchmesser
 $2a = 16 \mu\text{m}$



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



Riss-Stopp-Kerbfaktor
für threshold $da/dN < 10^{-12}$ m/cy



„Oberflächenriss“
CT-compact tension

Beispiel:

Werkstoff 12%-Cr-Stahl
Dauerfestigkeit $\sigma_D = 500$ MPa
Threshold $\Delta K_{th} = 4.8$ MPa \sqrt{m}

$$\Delta K_{th} = \Delta \sigma_n \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Q \quad \text{threshold}$$

$$\Delta \sigma_n = \Delta \sigma_z + \Delta \sigma_b \quad \text{Nennspannung}$$

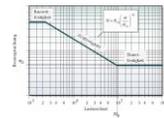
$$\Delta \sigma_n = 4.8 \text{MPa} + 35.9 \text{MPa} = 40.7 \text{MPa}$$

Kerb- bzw. Risswirkungszahl

$$\beta_{Riss} = \Delta \sigma_D / \Delta \sigma_n = 1000 / 40.7 = 24.6$$



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

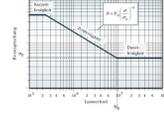


Gliederung

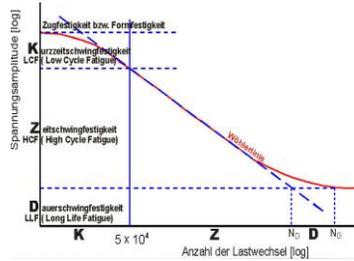
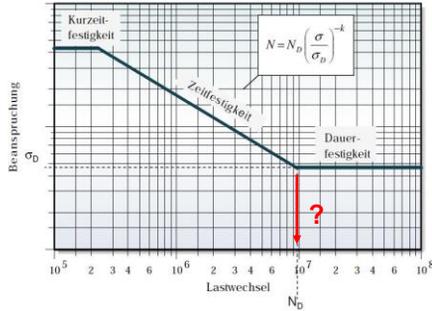
1. 150 Jahre Wöhler
2. Werkstoff und Gefüge
3. LCF-HCF-VHCF-ERW
4. Schädigung und Schädigungsmass
5. Quantitative Thermometrie
6. Energie-Hypothese
7. Extrapolation HCF-VHCF
8. Ausblick



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



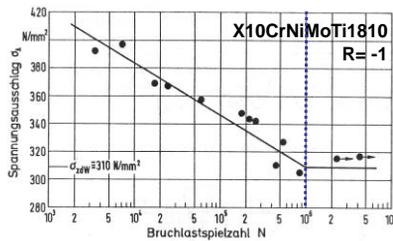
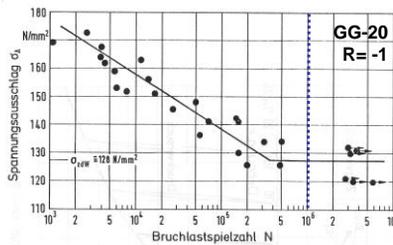
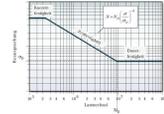
Wöhlerlinie, Dauerfestigkeit?



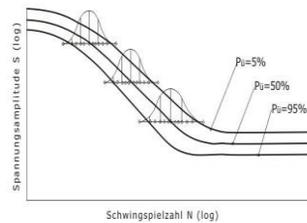
- Gibt es eine Dauerfestigkeit?
- Bei wieviel Lastwechseln ist der Übergang zeit-dauerfest?
- Ist der Übergang werkstoffabhängig?



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



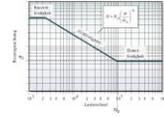
Ermüdungslebensdauer Streuungen Statistik



Ein Mass für die Ermüdungsschädigung?
(σ , ϵ , δ , Ω , λ , E)



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

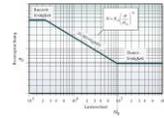


Gliederung

1. 150 Jahre Wöhler
2. Werkstoff und Gefüge
3. LCF-HCF-VHCF-ERW
4. Schädigung und Schädigungsmass
5. Quantitative Thermometrie
6. Energie-Hypothese
7. Extrapolation HCF-VHCF
8. Ausblick

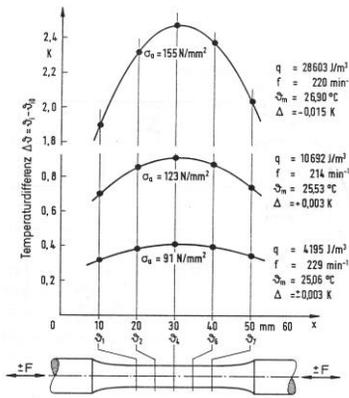


Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



quantitative
Thermometrie

etwas mehr
als nur
Temperatur-
messung



spez.
Wärmemenge q
pro Lastspiel
aus der
Krümmung der
Temperatur-
Parabel

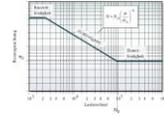
q ist die
irreversible
Verformungs-
energie
pro Zyklus

Auflösung
mit Halbleitern
< 0.001K=1mK





Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



quantitative Thermometrie

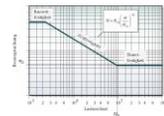
Methodik

- bereits bekannt, bereits versucht?
„gab es schon“, „geht nicht“
- widerspricht physikalischen Gesetzen („kalte Fusion“)
- widerspricht Metallphysik („Hochtemperatur Supraleitung“)
- Streuung, Wiederholbarkeit und Auflösung?
- „neue“ Erkenntnisse?

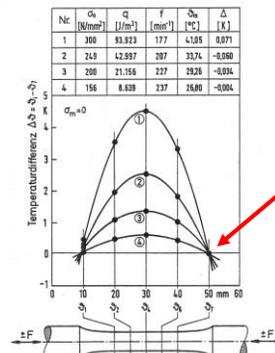
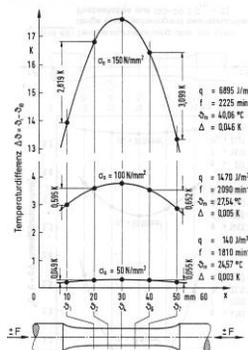
Geht nicht – gibt's nicht!!



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



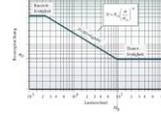
quantitative Thermometrie



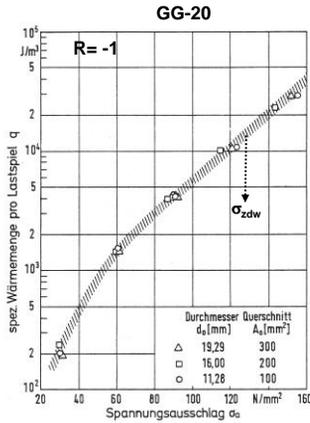
spez. Wärmemenge q pro Lastspiel ist unabhängig von den Randbedingungen!



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

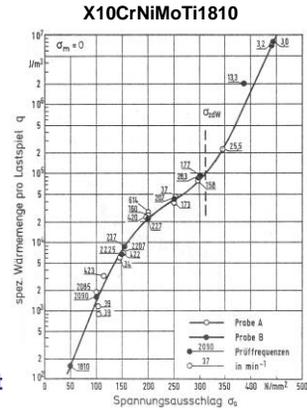


quantitative Thermometrie



unabhängig vom Probendurchmesser!

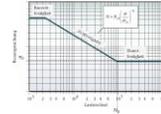
spez. Wärmemenge q pro Lastspiel ist



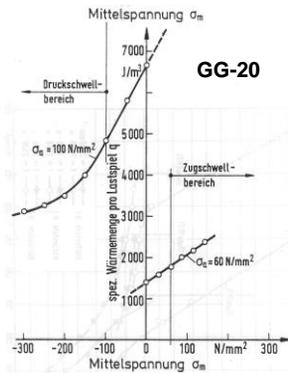
unabhängig von der Prüffrequenz!



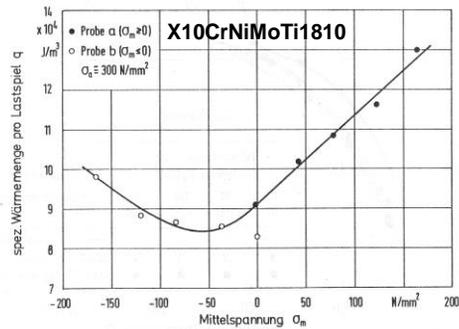
Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



quantitative Thermometrie

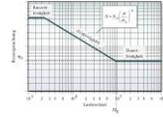


spez. Wärmemenge q pro Lastspiel zeigt den Einfluss von Mittelspannungen!





Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



quantitative Thermometrie

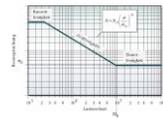
die spezifische Wärmemenge q pro Lastspiel ist

- unabhängig vom Probendurchmesser → Werkstoffkennwert
- unabhängig von der Probenoberfläche (Volumeneffekt)
- unabhängig von der Prüffrequenz → Werkstoffkennwert
→ Hysteresisfläche, Dämpfung, Schädigungsmass?

Die Messauflösung reicht vom Zeitfestigkeitsbereich bis weit unter den VHCF-Bereich (über >7 Dekaden)



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



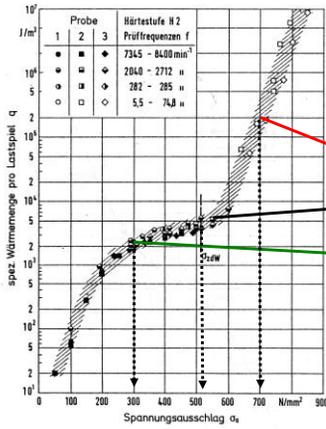
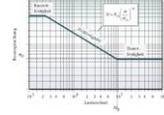
quantitative Thermometrie

die spezifische Wärmemenge q pro Lastspiel ist

- abhängig von der Mittelspannung ✓
 - abhängig von der Spannungsfolge (Reihenfolge) ✓
 - abhängig von plastischen Vorverformungen ✓
 - abhängig von Kriechvorbelastungen ✓
→ s. Einflüsse auf Dauerfestigkeit
- Eignung zur Charakterisierung von Werkstoffzuständen



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



34CrNiMo6 (H2)

Fläche $A = q \approx \Delta\sigma \cdot \Delta\varepsilon$
 Dehnungsschwingbreite
 $\Delta\varepsilon = q/\Delta\sigma$

LCF und Zeitfestigkeit

HCF und Übergangsgebiet

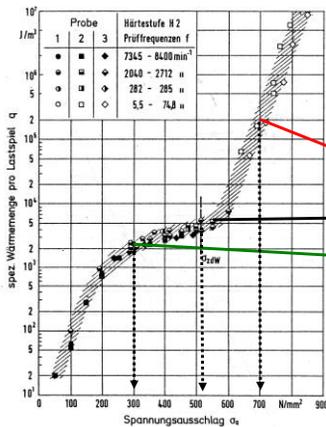
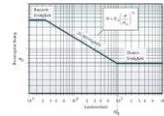
VHCF bis „Unendlich“

quantitative
Thermometrie

6 Dekaden von q (J/m³)



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



34CrNiMo6 (H2)

Fläche $A = q \approx \Delta\sigma \cdot \Delta\varepsilon$

Dehnungsschwingbreite
 $\Delta\varepsilon = q/\Delta\sigma$



$\Delta\varepsilon = 143 \cdot 10^{-6} = 0.1430 \text{ ‰}$ LCF
 (elastisch-plastisch)

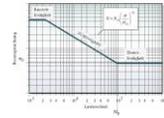
$\Delta\varepsilon = 4.9 \cdot 10^{-6} = 0.0049 \text{ ‰}$ HCF
 (makro-elastisch)

$\Delta\varepsilon = 3.3 \cdot 10^{-6} = 0.0033 \text{ ‰}$ VHCF
 (mikro-elastisch?)

Was ist Schädigung?



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

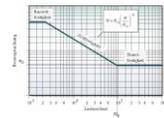


Gliederung

1. 150 Jahre Wöhler
2. Werkstoff und Gefüge
3. LCF-HCF-VHCF-ERW
4. Schädigung und Schädigungsmass
5. Quantitative Thermometrie
6. Energie-Hypothese
7. Extrapolation HCF-VHCF
8. Ausblick



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



quantitative Thermometrie

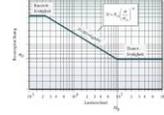
Energie-Hypothese

q = spez. Wärmeentwicklung pro Zyklus
= „3D“-Fläche der Mikrohysterese

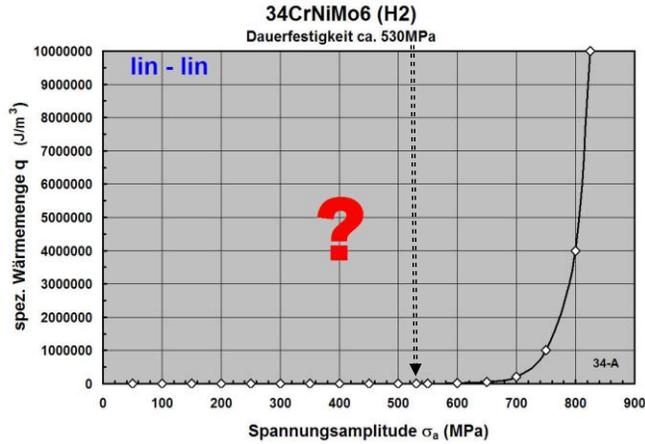
- Ist „ q “ als Schädigungsparameter von LCF bis VHCF geeignet?
- Ist die Wärmeerzeugung unterhalb der HCF-Dauerfestigkeit mit einer Ermüdungsschädigung verbunden?
- Ist die spez. Wärmeentwicklung „ q “ unterhalb der HCF-Dauerfestigkeit identisch mit der Werkstoffdämpfung?
- Kann man mit $Q_{ges} = q \cdot N$ von HCF bis VHCF extrapolieren?



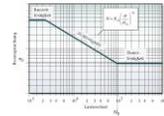
Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



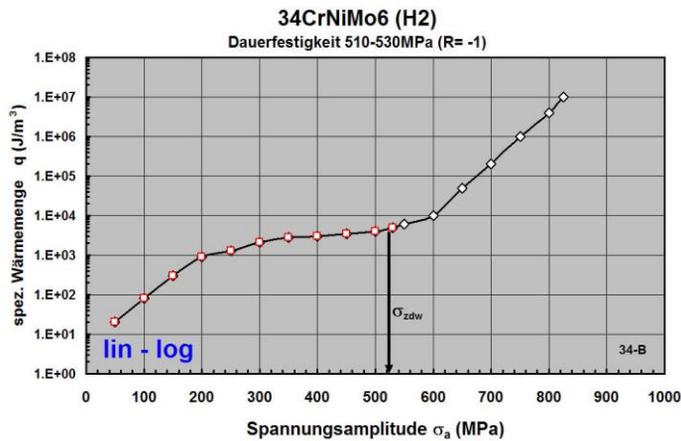
quantitative Thermometrie



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

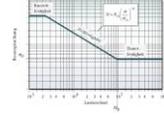


quantitative Thermometrie

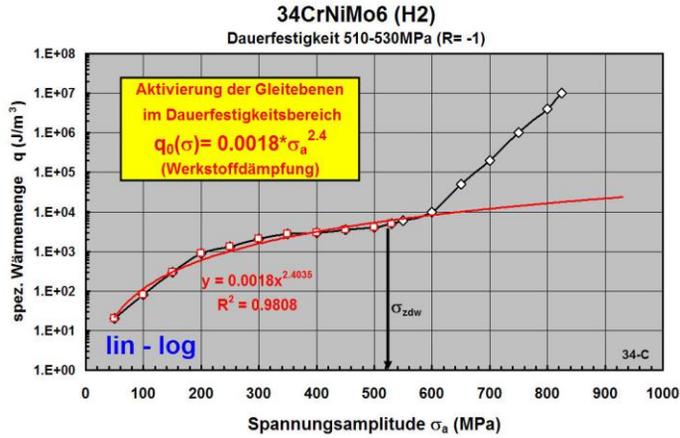




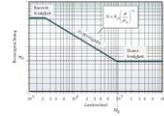
Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



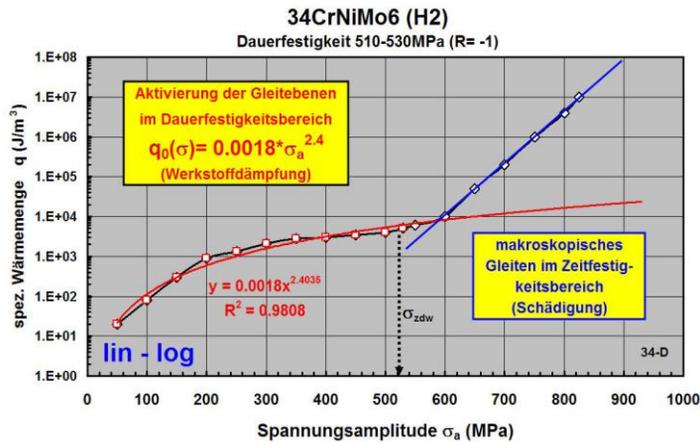
quantitative Thermometrie



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

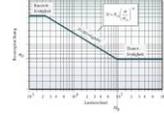


quantitative Thermometrie

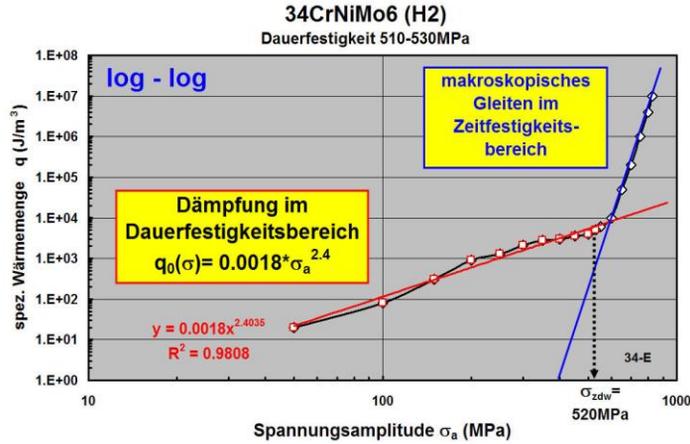




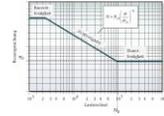
Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



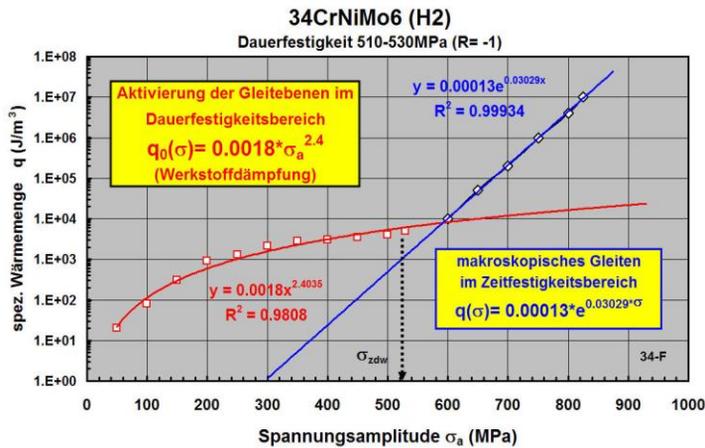
quantitative Thermometrie



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

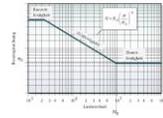


quantitative Thermometrie





Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

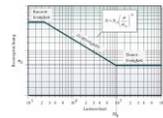


Gliederung

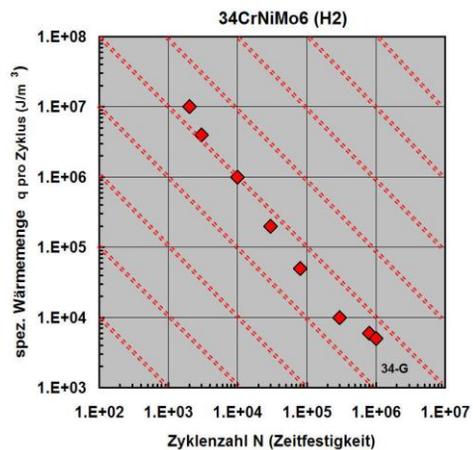
1. 150 Jahre Wöhler
2. Werkstoff und Gefüge
3. LCF-HCF-VHCF-ERW
4. Schädigung und Schädigungsmass
5. Quantitative Thermometrie
6. Energie-Hypothese
7. Extrapolation HCF-VHCF
8. **Ausblick**



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

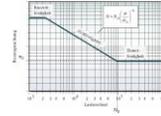


quantitative Thermometrie



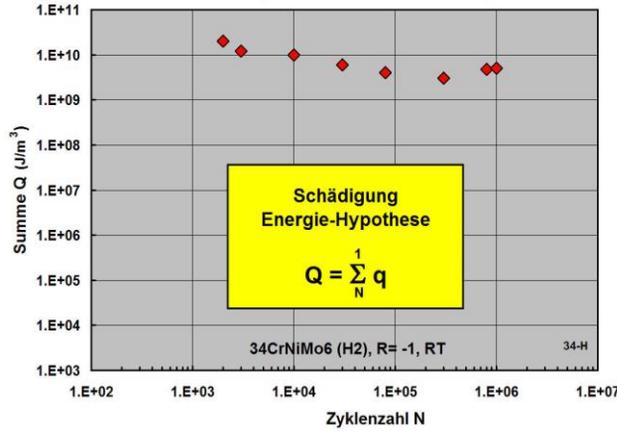


Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

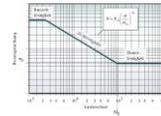


quantitative Thermometrie

Näherung aus Stufenversuch $Q = q \cdot N$

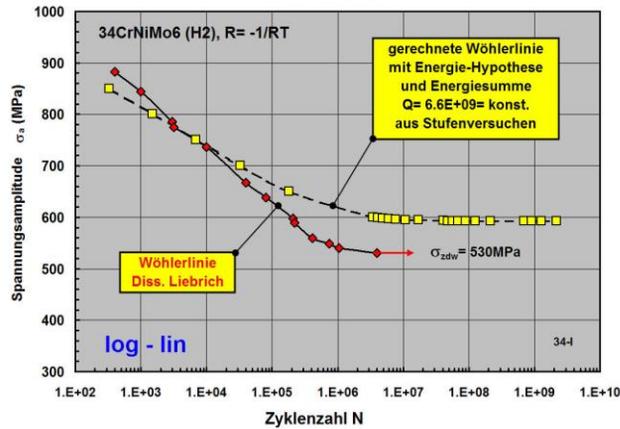


Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



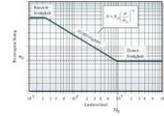
quantitative Thermometrie

Wöhlerlinie

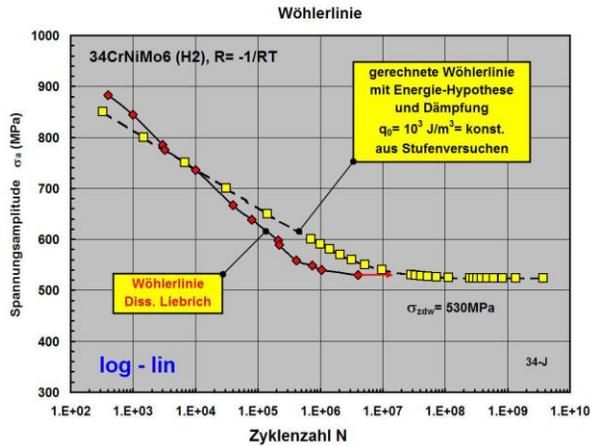




Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



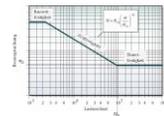
quantitative Thermometrie



10^3 J/m^3
entspricht
etwa der
Energie-
erzeugung
bei 250MPa
Amplitude



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation

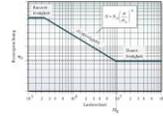


Gliederung

1. 150 Jahre Wöhler
2. Werkstoff und Gefüge
3. LCF-HCF-VHCF-ERW
4. Schädigung und Schädigungsmass
5. Quantitative Thermometrie
6. Energie-Hypothese
7. Extrapolation HCF-VHCF
8. Ausblick



Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



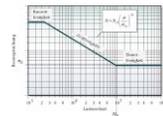
Ausblick

interessante Anwendungen

- Einkristalle, gerichtet erstarrte Legierungen
- Mikro- und nano-kristalline Werkstoffe
- Mikrolegierte Werkstoffe
- SLM-Werkstoffe (selective 3D laser manufacturing)
- CFK (Kohlenstofffaser verstärkte Kunststoffe)
- FE-integrierte Materialdämpfung
- Einfluss des Mehrachsigkeitsgrades (Volumeffekt)
- Reihenfolgeinflüsse (Schädigung)

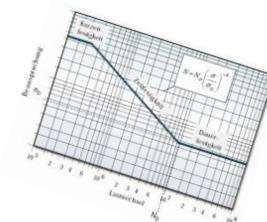


Wöhler und die unendliche Schädigungsakkumulation



Vielen Dank!

Fragen?
Anregungen?
Beiträge?



Nun sind Sie dran !!

Dr.-Ing. Klaus F. Stärk
Untersiggenthal/Schweiz

klaus.staerk@swissonline.ch
www.staerk-erdwaerme.ch