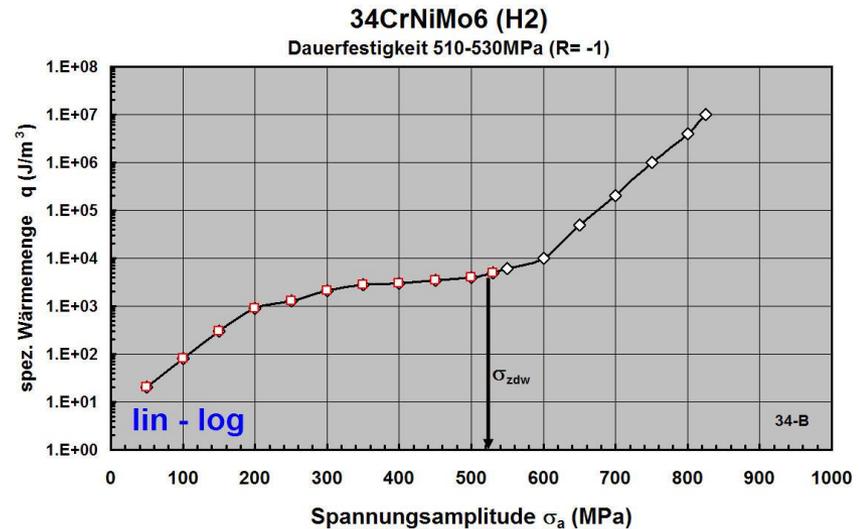
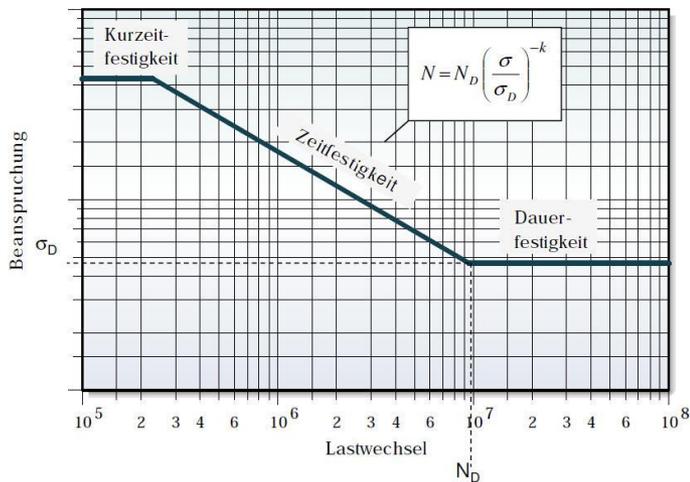


Quantitative Thermometrie

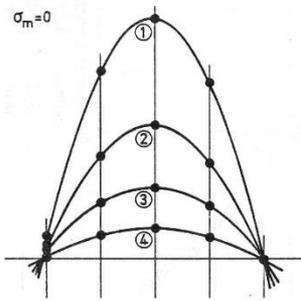
Dämpfung und Schädigung



Uni Saarbrücken 14. März 2019

Experimentelle Methodik der
Werkstoffwissenschaften

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

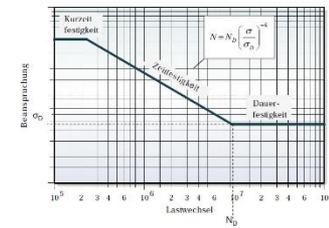
$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

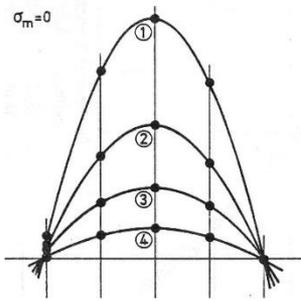
Dämpfung und Schädigung

Gliederung

1. Werkstoff und Gefüge
2. Ermüdung LCF-HCF-VHCF
3. Quantitative Thermometrie
4. Energie-Hypothese (Schädigung und Schädigungsmass)
5. Messtechnik
6. Ausblick
7. Ihre Fragen, meine Fragen
8. Upgrade



$\sigma_m = 0$

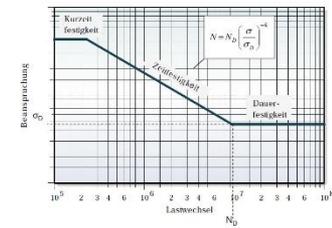


Quantitative Thermometrie

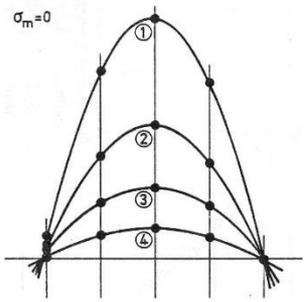
Dämpfung und Schädigung

Gliederung

1. Werkstoff und Gefüge
2. Ermüdung LCF-HCF-VHCF
3. Quantitative Thermometrie
4. Energie-Hypothese (Schädigung und Schädigungsmass)
5. Messtechnik
6. Ausblick
7. Ihre Fragen, meine Fragen
8. Upgrade

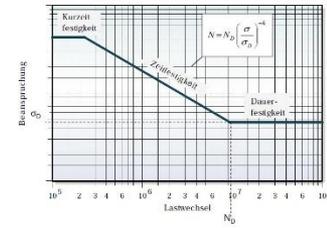


$\sigma_m = 0$



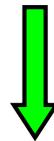
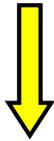
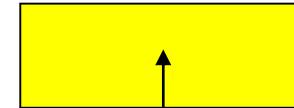
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung



Werkstoff

homogen+isotrop – statistisch – lokal



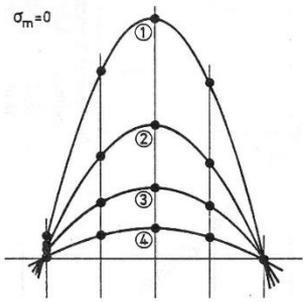
allg. Werkstoffprüfung

Statistik

Bruchmechanik

s. Anhang upgrade

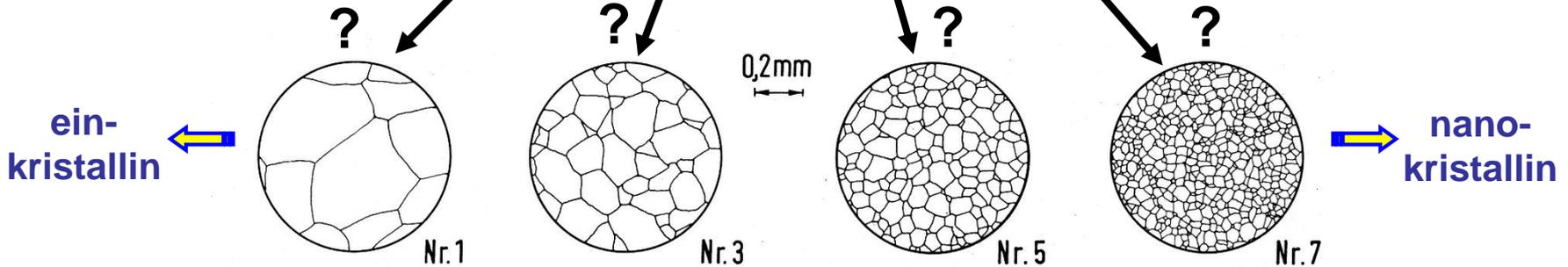
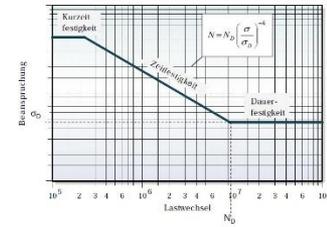
$\sigma_m = 0$



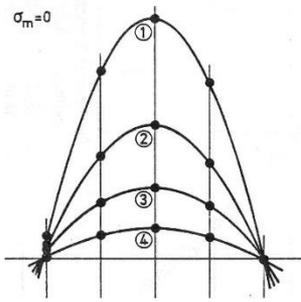
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

Werkstoff und Gefüge



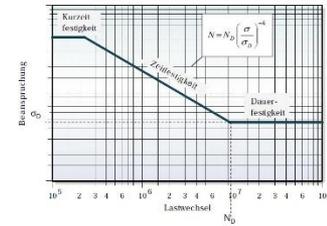
$\sigma_m = 0$



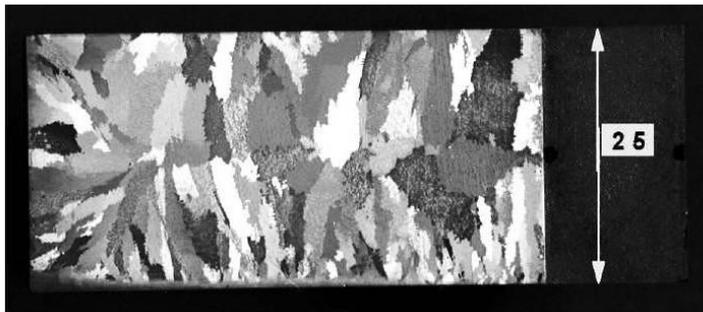
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

Werkstoff und Gefüge



MarM247cc



HT-Gasturbinenschaufel

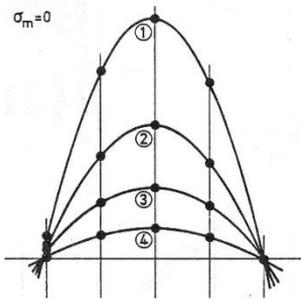
OF-Cu



oxygen-free Kupfer

?

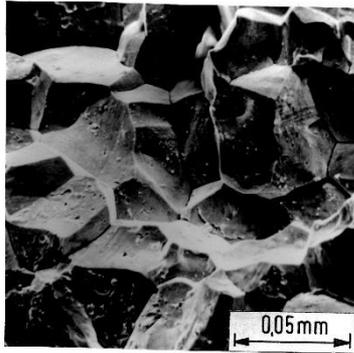
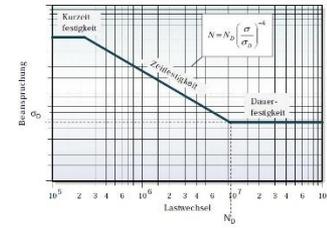
$\sigma_m = 0$



Quantitative Thermometrie

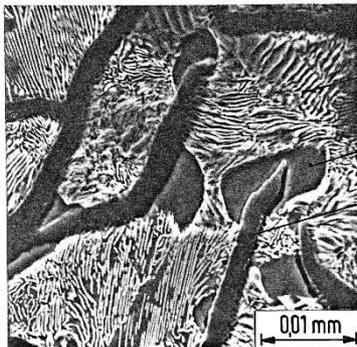
Dämpfung und Schädigung

Werkstoff und Gefüge



Bruchstruktur eines 12% Cr-Stahles bei interkristalliner Spannungsrisskorrosion (REM)

interkristalliner Bruch
(Spannungsrisskorrosion
12%-Cr-Stahl)



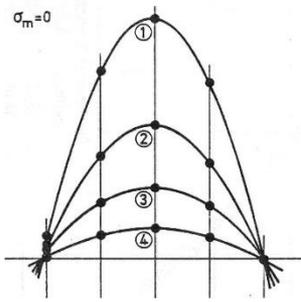
Gefüge lamellarer
Grauguss GG-20

das „homogene“
Material

- Gefüge
- Reinheit
- Homogenität
- Isotropie

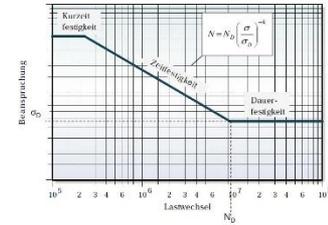


$\sigma_m = 0$

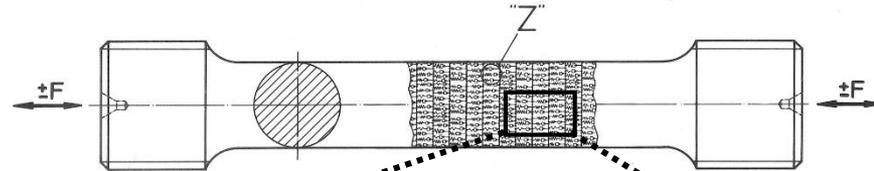


Quantitative Thermometrie

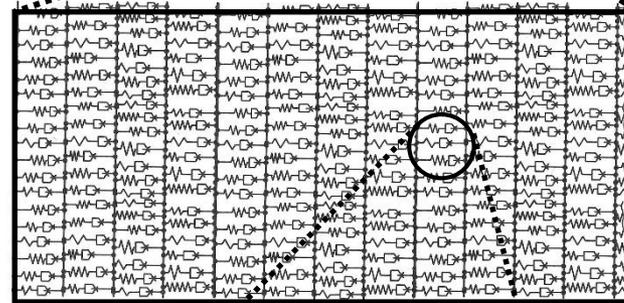
Dämpfung und Schädigung



homogen und isotrop

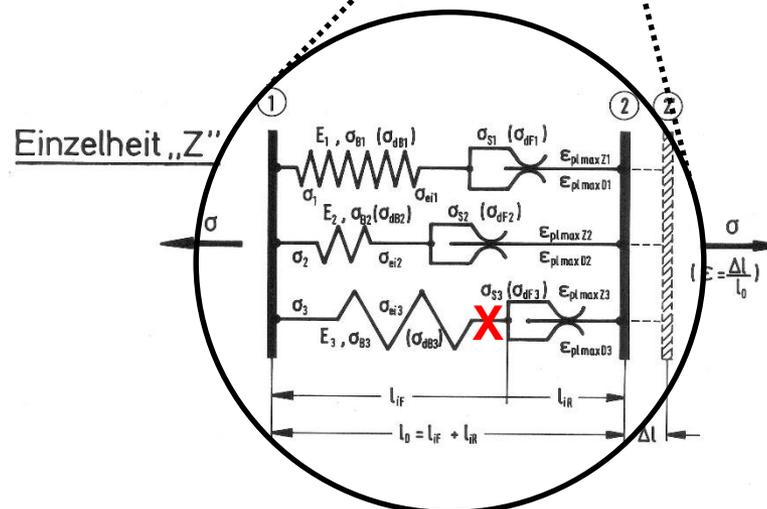


Inhomogenes Gefüge

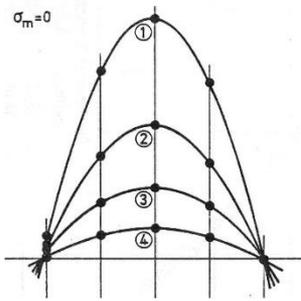


Statistische Werkstoff-Simulation 1976 auf CDC

Fehlstelle und Bruchmechanik



$\sigma_m = 0$

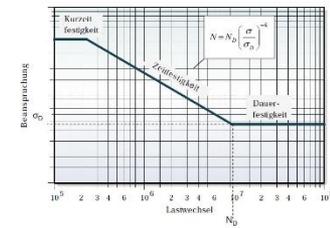


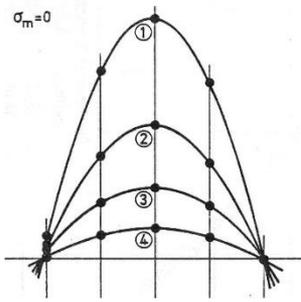
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

Gliederung

1. Werkstoff und Gefüge
2. Ermüdung LCF-HCF-VHCF
3. Quantitative Thermometrie
4. Energie-Hypothese (Schädigung und Schädigungsmass)
5. Messtechnik
6. Ausblick
7. Ihre Fragen, meine Fragen
8. Upgrade

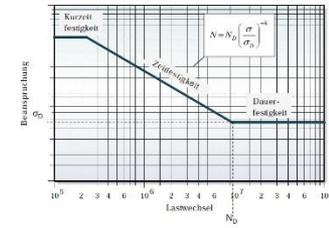


$\sigma_m = 0$ 

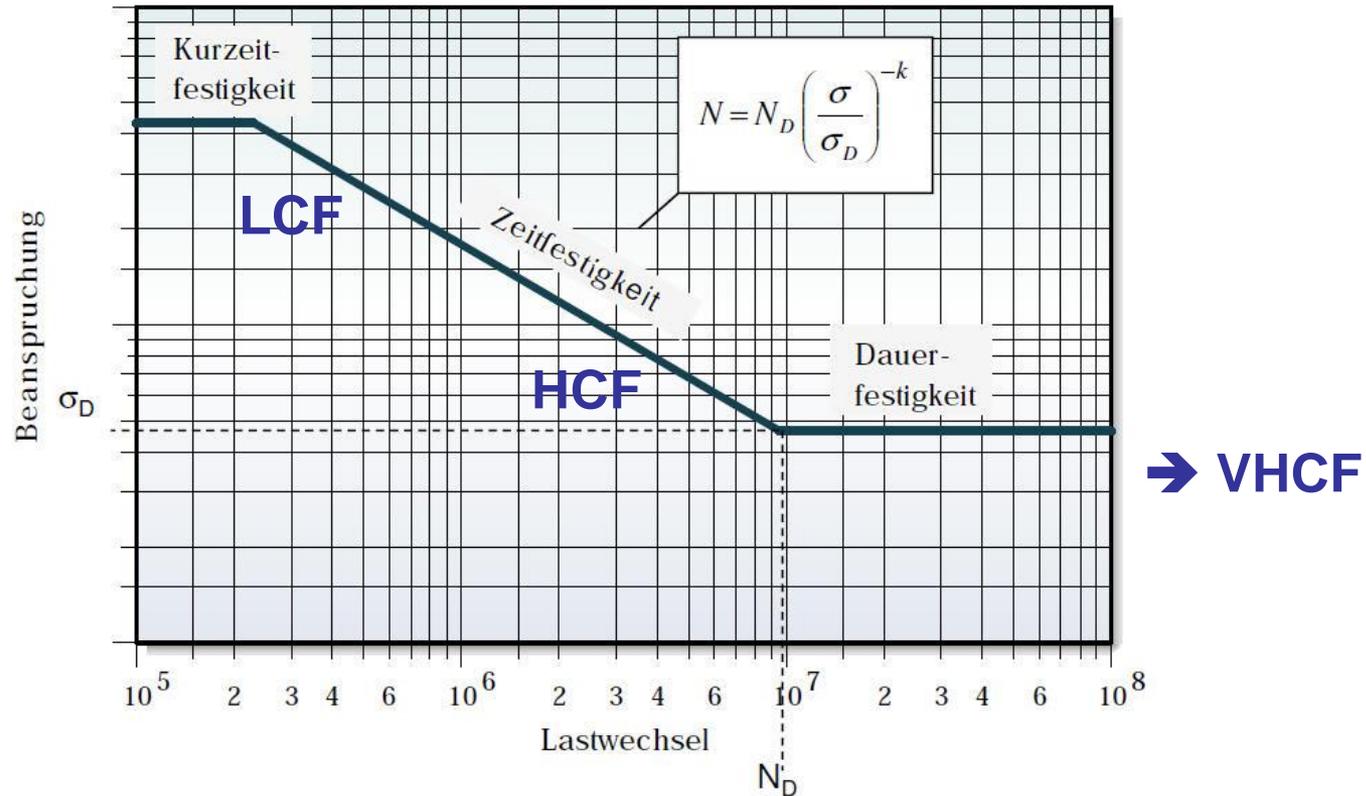
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

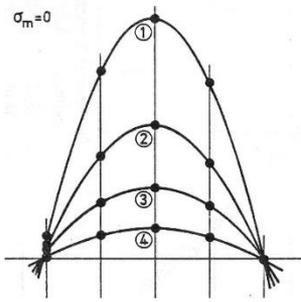
LCF \rightarrow HCF \rightarrow VHCF $> 10^{10}$ cy



Die Wöhler-Linie

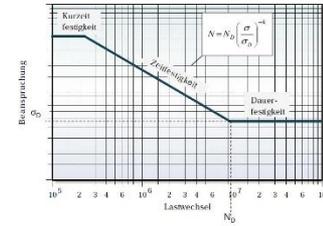


$\sigma_m = 0$

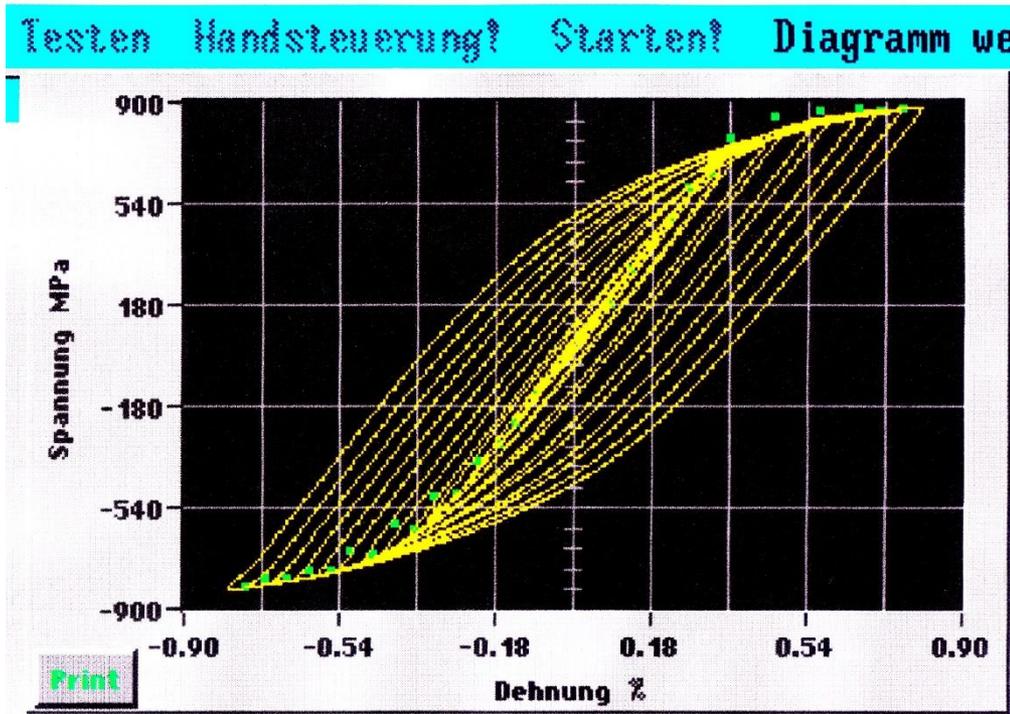


Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

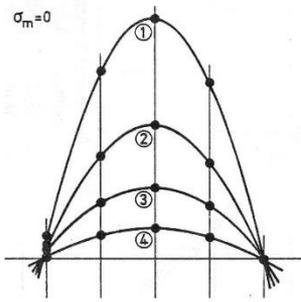


Hysterese, Gesamtdehnung, plastische Dehnungsamplitude



IST
Incremental
Step Test

LCF → HCF → VHCF
 die „elastische“
 Hysterese

$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

VHCF very high cycle fatigue im Gasturbinenbau

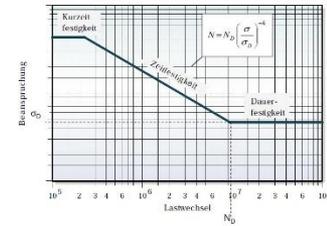
HCF → VHCF $> 10^{10}$ cy

Rotor (Umlaufbiegung): 50 Hz, 10^{10} cycle = 6.3 Jahre

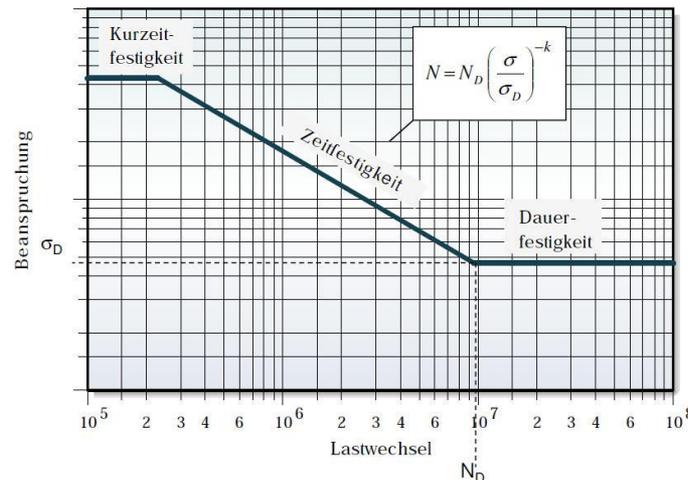
Rohr (Schwingungen): 100 Hz, 10^{10} cycle = 3.2 Jahre

Leitschaufel ("): 350 Hz, 10^{10} cycle = 0.9 Jahre

Laufschaufel ("): 24x50 Hz, 10^{10} cycle = 3.1 Monate

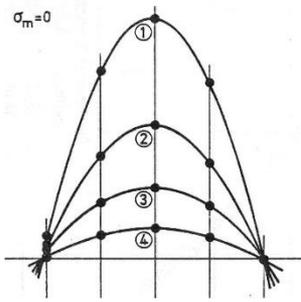


das ist
nicht
„ewig“



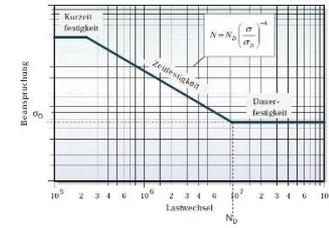
→ VHCF $> 10^{10}$

$\sigma_m = 0$

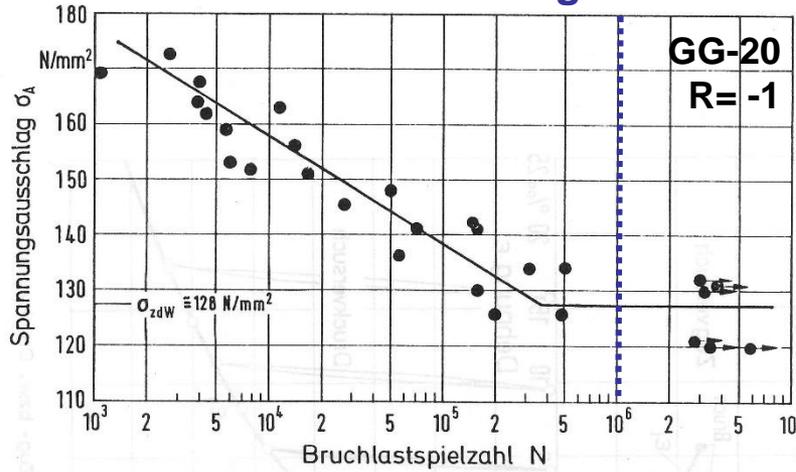


Quantitative Thermometrie

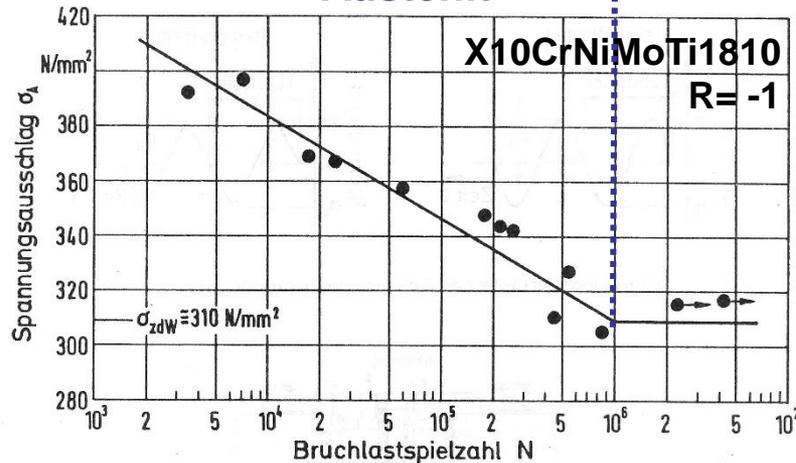
Dämpfung und Schädigung



Lamellarer Grauguss



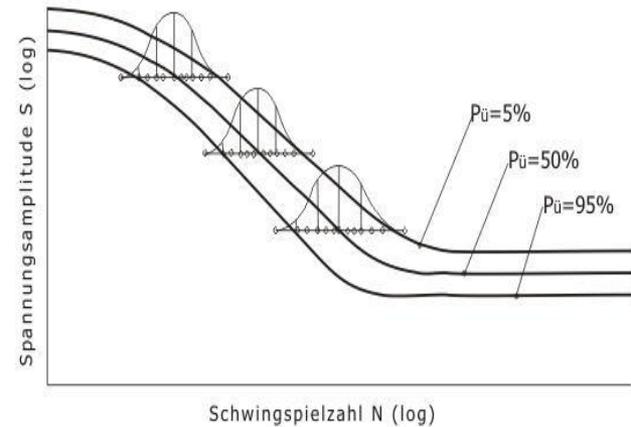
Austenit



Ermüdungslebensdauer

Streuungen

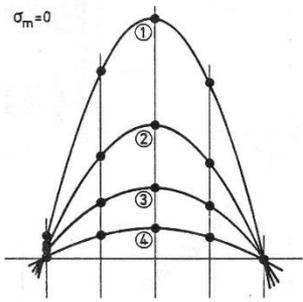
Statistik



Ein Mass für die Ermüdungsschädigung?

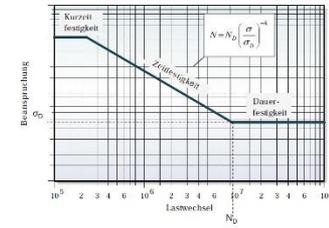
(σ , ϵ , δ , Ω , λ , E)

$\sigma_m = 0$



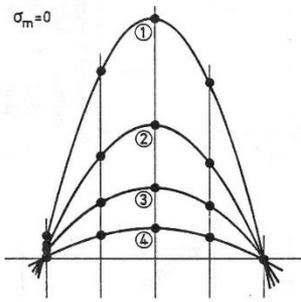
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung



Gliederung

1. Werkstoff und Gefüge
2. Ermüdung LCF-HCF-VHCF
3. Quantitative Thermometrie
4. Energie-Hypothese (Schädigung und Schädigungsmass)
5. Messtechnik
6. Ausblick
7. Ihre Fragen, meine Fragen
8. Upgrade

$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

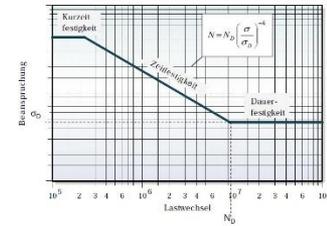
Dämpfung und Schädigung

Die quantitative Thermometrie

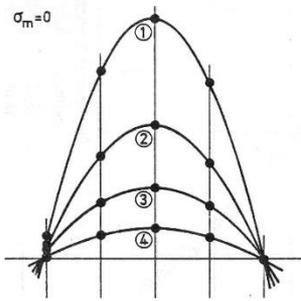
Methodik

- bereits bekannt, bereits versucht?
„gab es schon“, „geht nicht“
- widerspricht physikalischen Gesetzen?
- widerspricht Metallphysik?
- Streuung, Wiederholbarkeit und Auflösung?
- neue Erkenntnisse?
- neue oder verbesserte Messtechnik?

Geht nicht – gibt's nicht !!

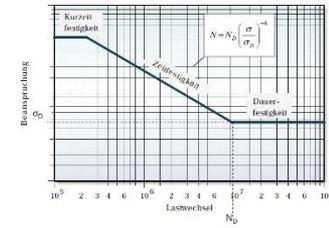


$\sigma_m = 0$



Quantitative Thermometrie

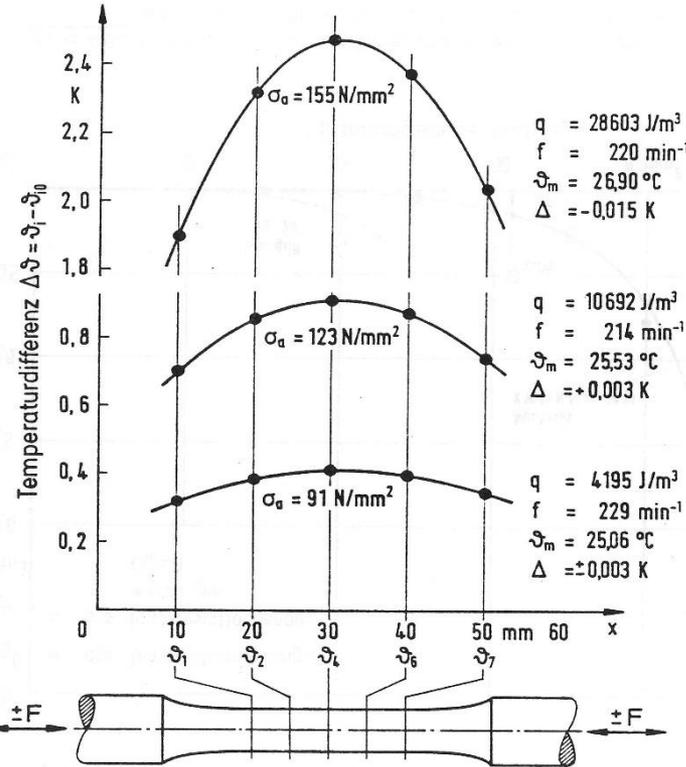
Dämpfung und Schädigung



quantitative Thermometrie

(Herleitung s. Diss.)

etwas mehr als nur Temperatur- messung



spez. Wärmemenge q
pro Lastspiel aus der

Krümmung

der Temperatur-Parabel

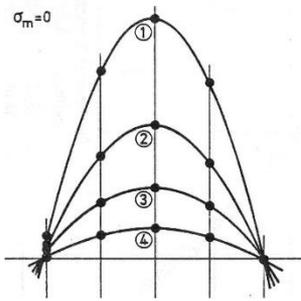
(Minimum 3 Temperaturen)

Auflösung
mit NTC-
Halbleitern

< 0.001 K = 1 mK

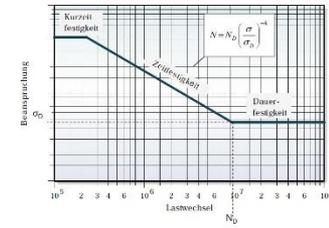


Homogene
Spannung über
dem Querschnitt
und der Messlänge



Quantitative Thermometrie

was braucht's dazu?



Temperaturparabel

$$\vartheta(x) = -\dot{q}/2\lambda * x^2 + a*x + b$$

(asym.)

spez. Wärmemenge q
pro Lastspiel aus der

$$q = \frac{2\lambda * [(\vartheta_2 - \vartheta_1) * (x_7 - x_6) + (\vartheta_6 - \vartheta_7) * (x_2 - x_1)]}{f * (x_2 - x_1) * (x_6 - x_7) * (x_1 - x_6 + x_2 - x_7)}$$

(Stärk)
3.13

Krümmung

der Temperatur-Parabel

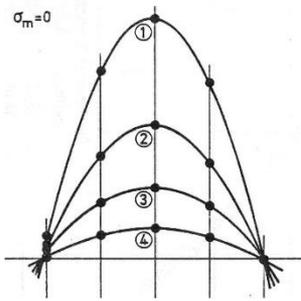
$$q = \frac{2\lambda * [(\vartheta_1 - \vartheta_7) * (x_1 - x_4) + (\vartheta_4 - \vartheta_1) * (x_1 - x_7)]}{f * (x_1 - x_4) * (x_4 - x_7) * (x_1 - x_7)}$$

(Weiblen)
4.35

nur Differenzen !

**q ist die
irreversible
Verformungs-
energie
pro Zyklus**

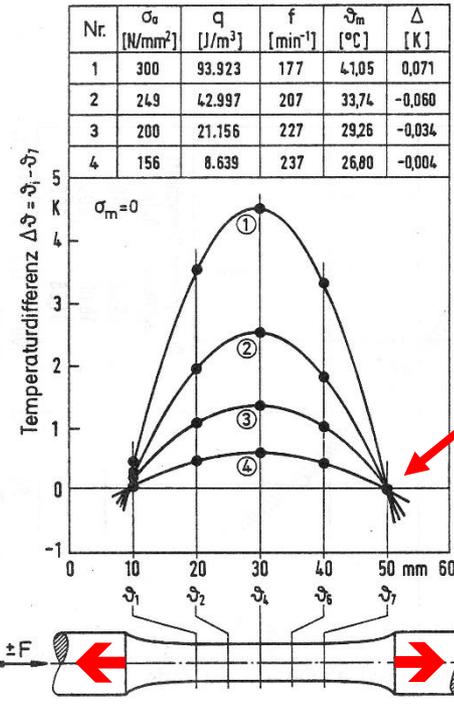
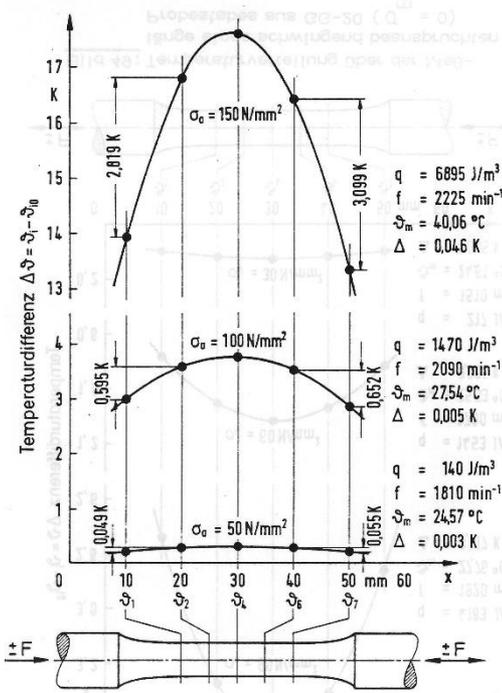
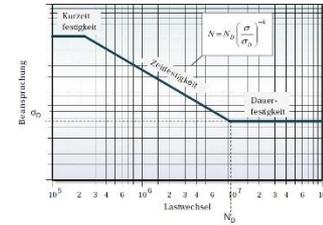
- Mindestens 3 präzise Temperaturmessungen ϑ_i
- Mindestens 3 genaue Positionsmessungen x_i
- Prüffrequenz f
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda = f(\vartheta)$
- Homogene Spannungsverteilung in der Messlänge
- Rein axiale Wärmeleitung (radial isolierte Probe)
- Stabile Parabelkrümmung (Messintervall)



Quantitative Thermometrie

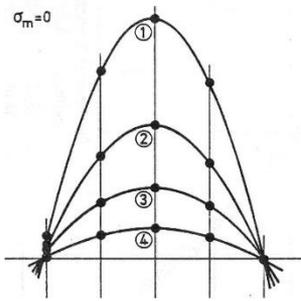
Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie



z. B. **Bezugspunkt**

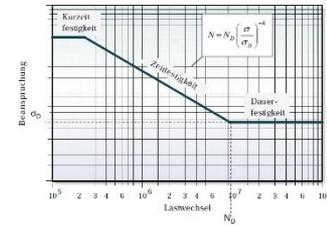
spez. Wärmemenge q pro Lastspiel ist **unabhängig** von den Randbedingungen!



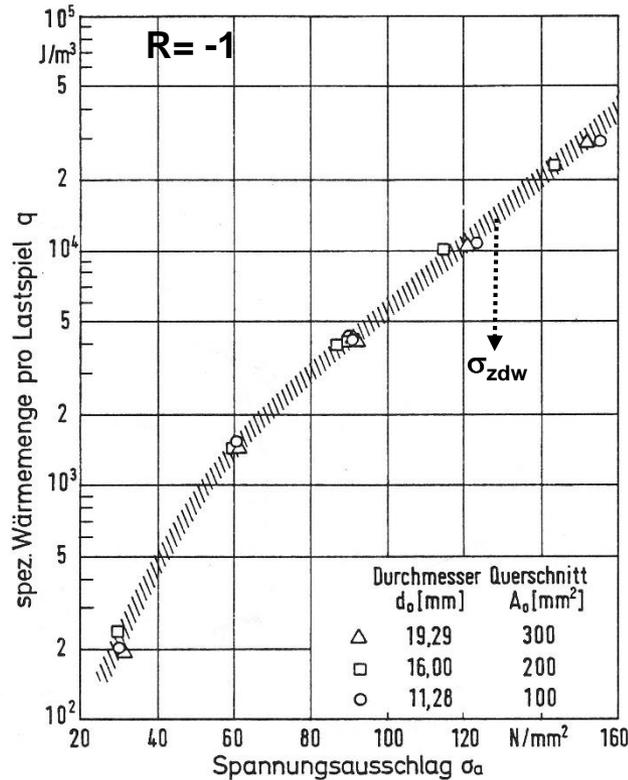
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie



GG-20



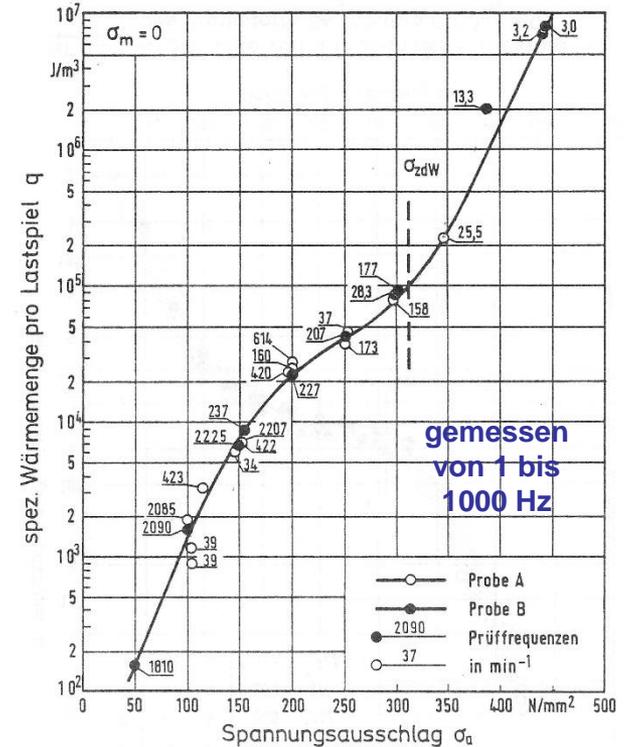
unabhängig vom Probendurchmesser!

q

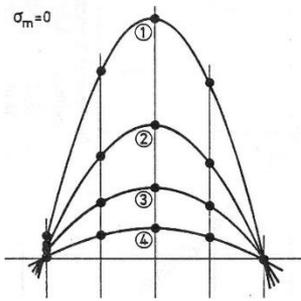
[J/m³ und cy]

spez. Wärmemenge q pro Lastspiel ist

X10CrNiMoTi1810



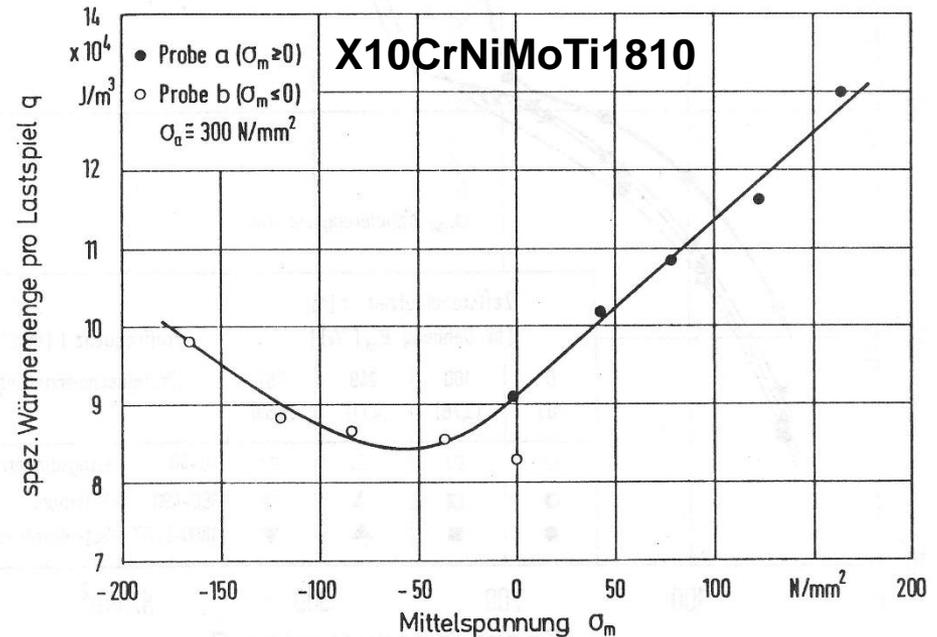
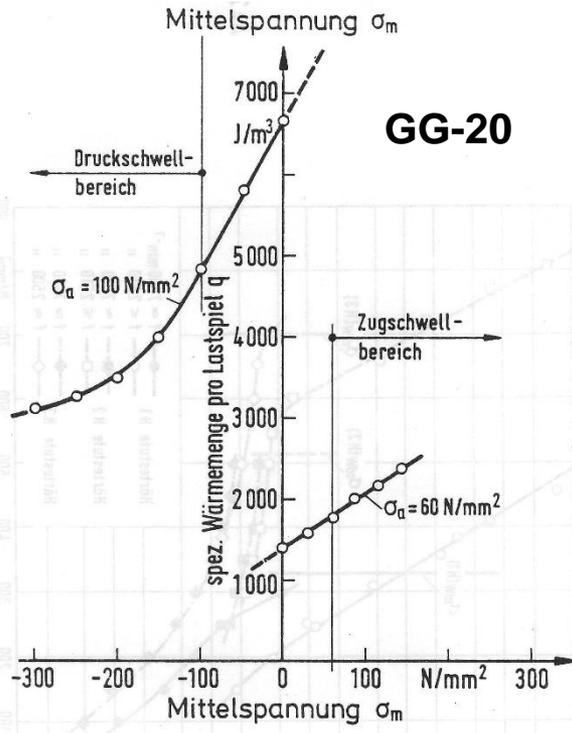
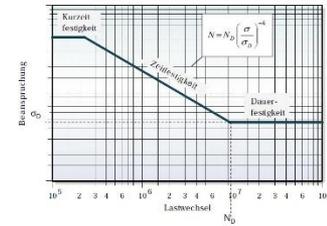
unabhängig von der Prüffrequenz!



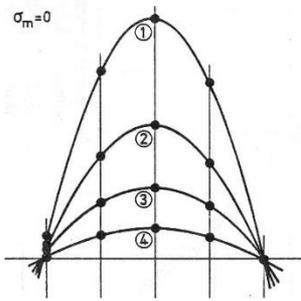
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie



spez. Wärmemenge q pro Lastspiel **zeigt** den Einfluss von Mittelspannungen!
Wie auch die Ermüdungsdauer.

$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

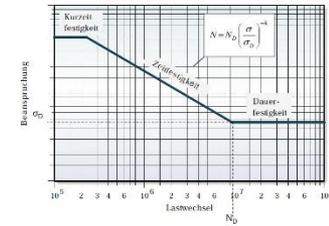
Dämpfung und Schädigung

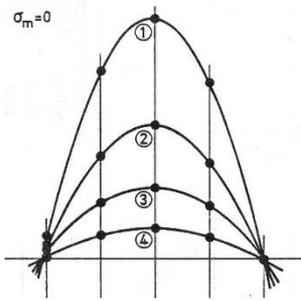
quantitative Thermometrie

die spezifische Wärmemenge q pro Lastspiel ist

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

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

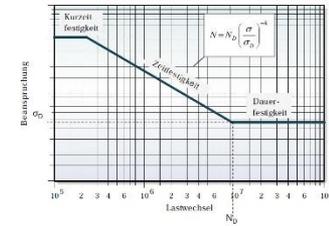


$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

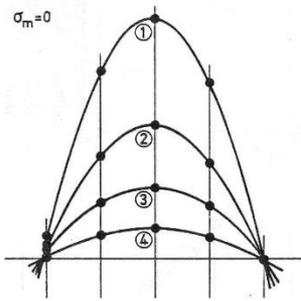
quantitative Thermometrie



die spezifische Wärmemenge q pro Lastspiel ist

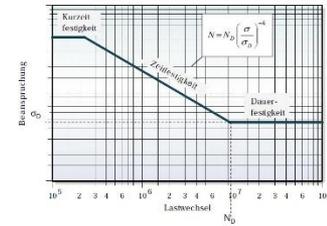
- abhängig von der Mittelspannung ✓
 - abhängig von der Spannungsfolge (Reihenfolge) ✓
 - abhängig von plastischen Vorverformungen ✓
 - abhängig von Kriechvorbelastungen ✓
- s.a. Einflüsse auf Dauerfestigkeit

→ Eignung zur Charakterisierung von Werkstoffzuständen!



Quantitative Thermometrie

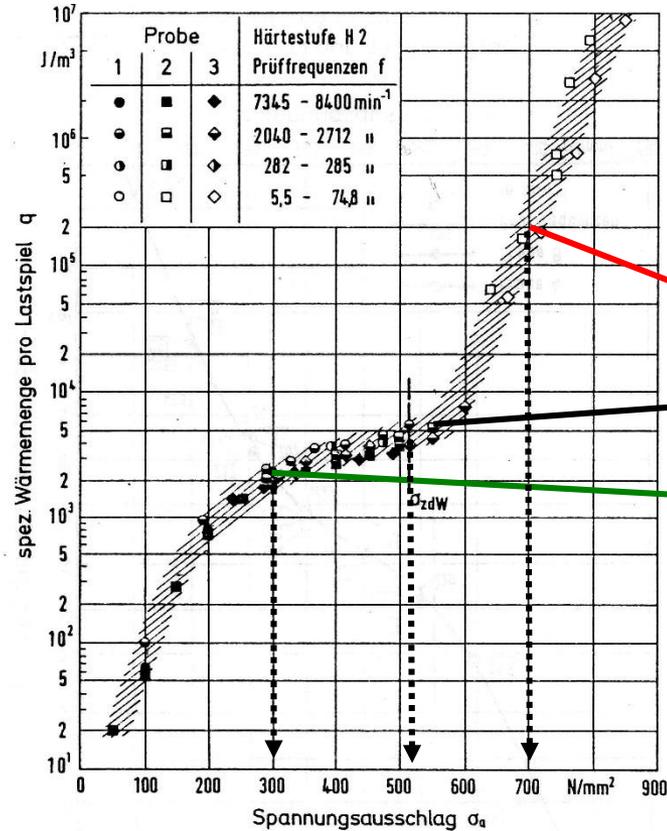
Dämpfung und Schädigung



$$\text{Fläche } A = q \approx \Delta\sigma * \Delta\varepsilon$$

Dehnungsschwingbreite

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



LCF und Zeitfestigkeit

HCF und Übergangsgebiet

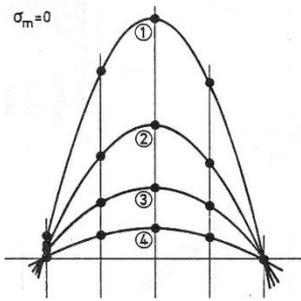
VHCF bis „Unendlich“

quantitative
Thermometrie

6 Dekaden von q (J/m³)

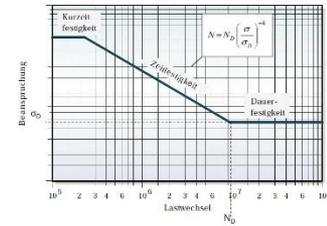
s. Spannungsbereich 50 – 700 MPa

34CrNiMo6 (H2)



Quantitative Thermometrie

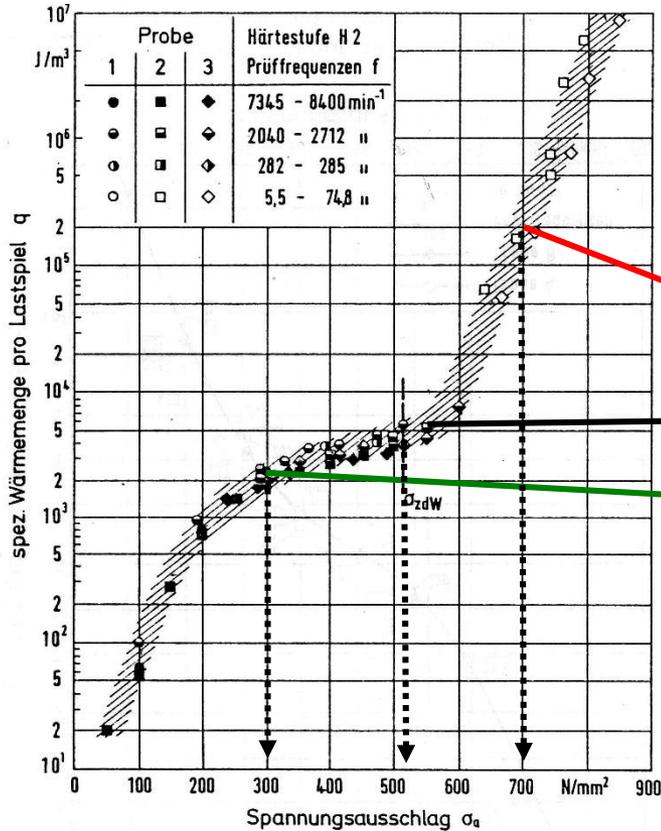
Dämpfung und Schädigung



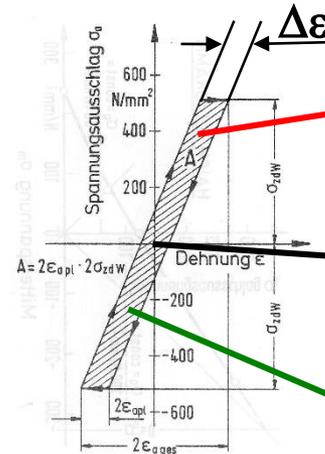
Hysteresefläche $A = q \approx \Delta\sigma * \Delta\varepsilon$

plast. Dehnungsschwingbreite

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



34CrNiMo6 (H2)



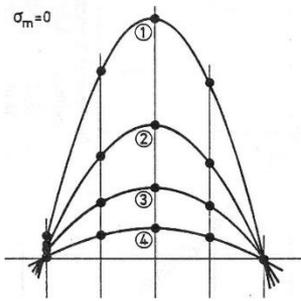
$\Delta\varepsilon = 143 \cdot 10^{-6} = 0.1430 \text{ ‰}$ **LCF**
(elastisch-plastisch)

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

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

Was ist Schädigung?

$\sigma_m = 0$

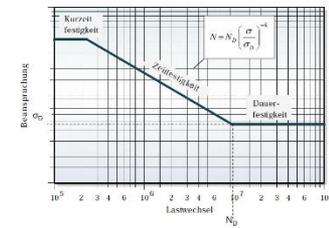


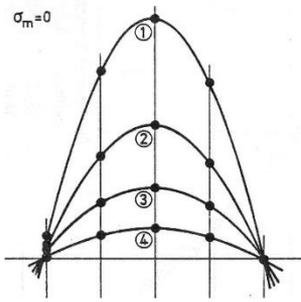
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

Gliederung

1. Werkstoff und Gefüge
2. Ermüdung LCF-HCF-VHCF
3. Quantitative Thermometrie
4. Energie-Hypothese (Schädigung und Schädigungsmass)
5. Messtechnik
6. Ausblick
7. Ihre Fragen, meine Fragen
8. Upgrade

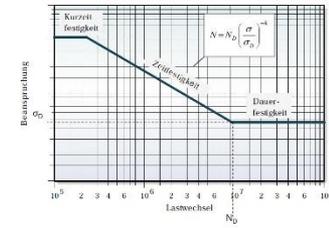


$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

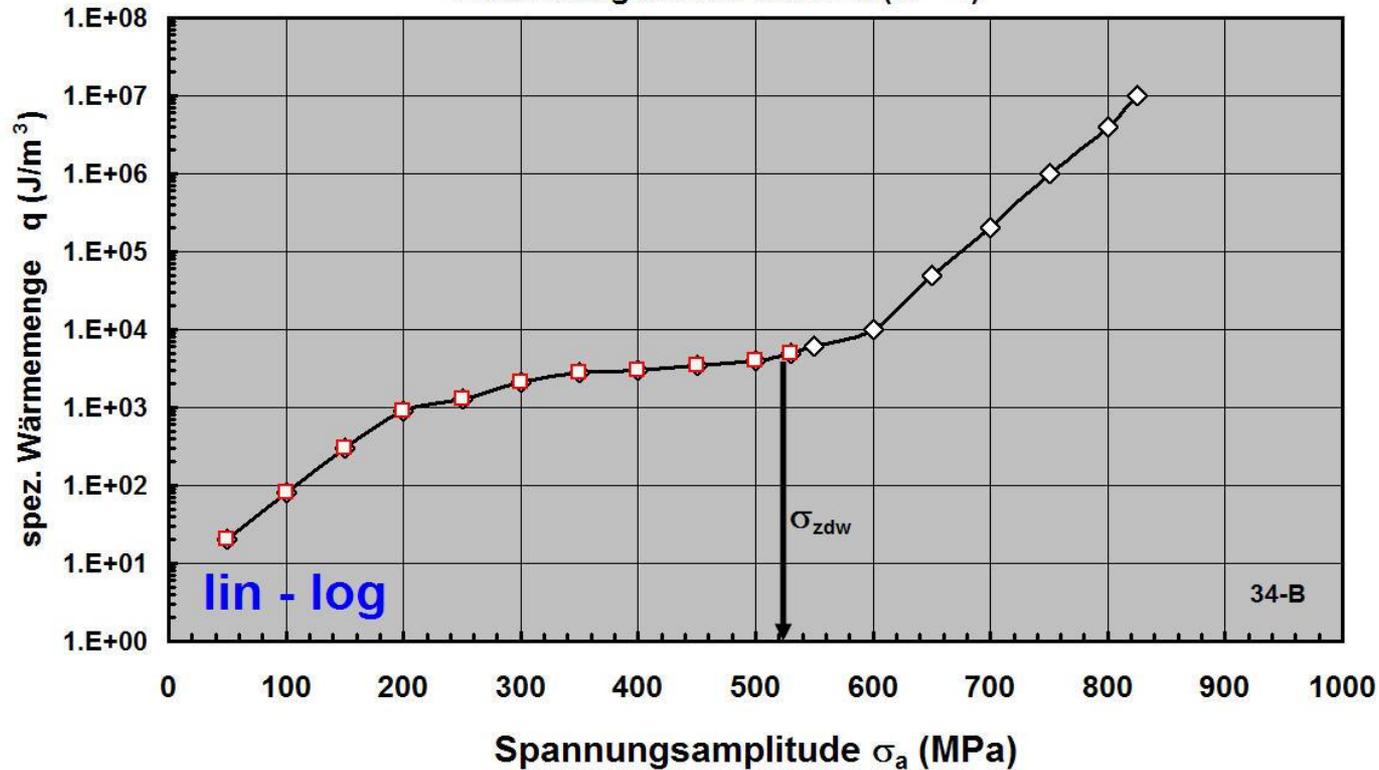
Dämpfung und Schädigung

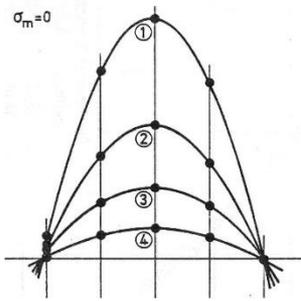
quantitative Thermometrie



34CrNiMo6 (H2)

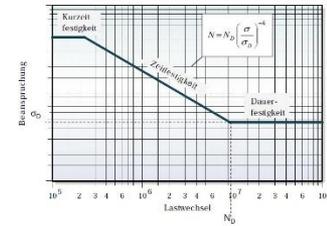
Dauerfestigkeit 510-530MPa (R= -1)





Quantitative Thermometrie

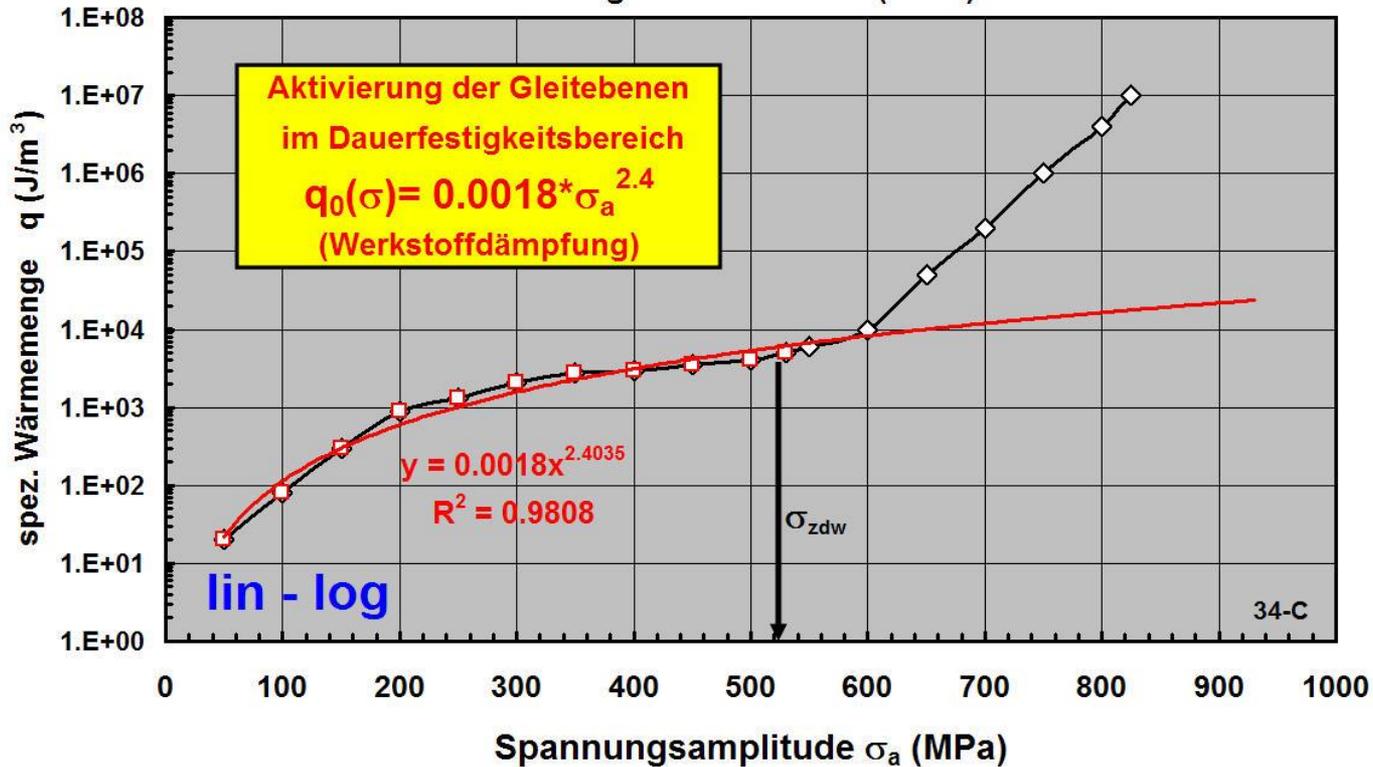
Dämpfung und Schädigung

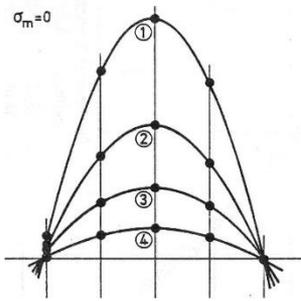


quantitative Thermometrie

34CrNiMo6 (H2)

Dauerfestigkeit 510-530MPa (R= -1)

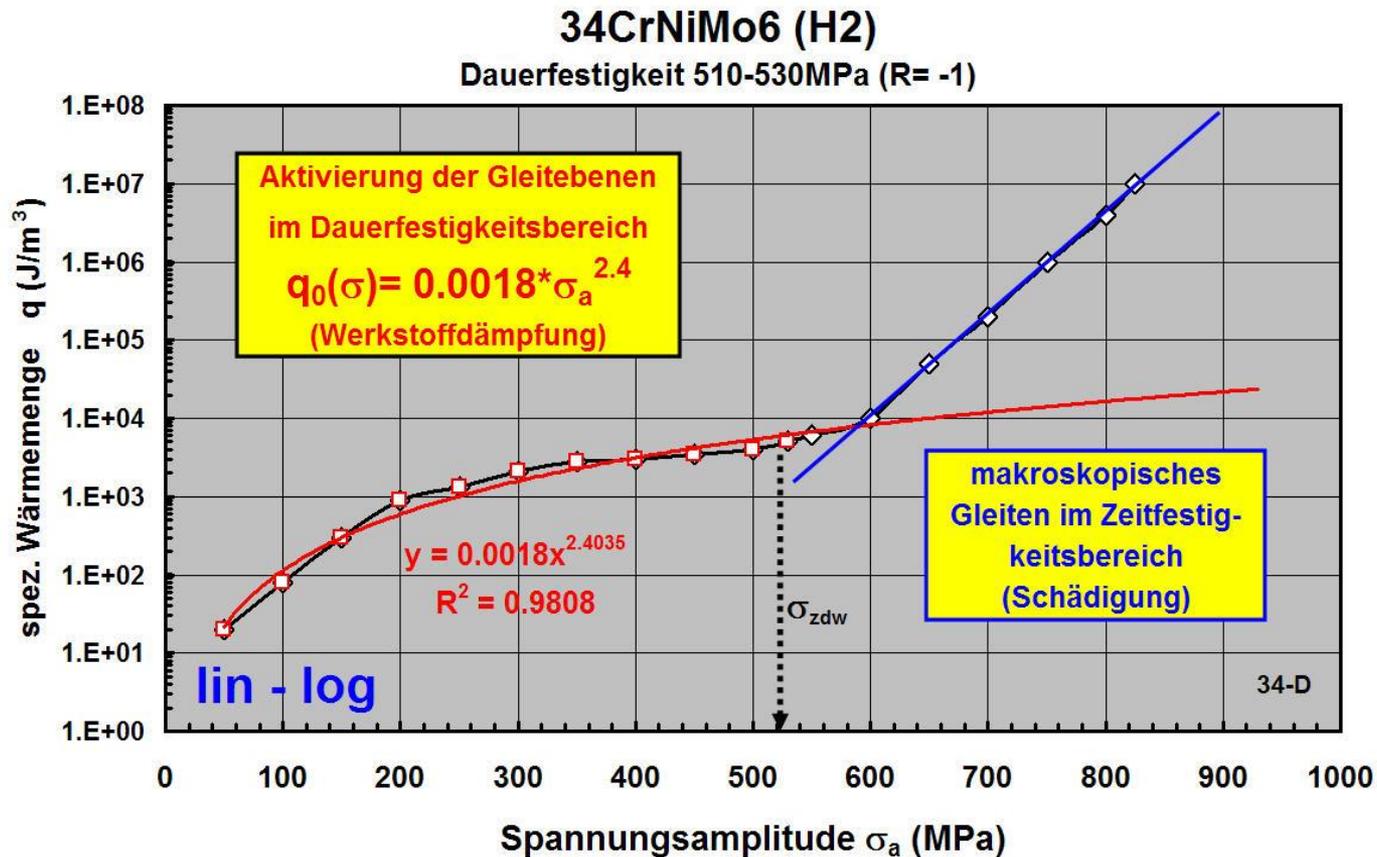
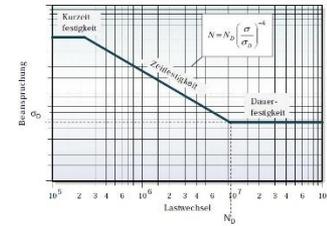


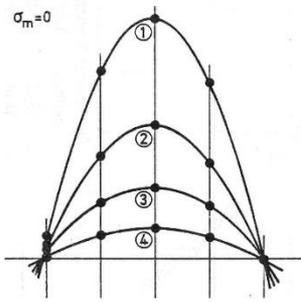
$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie

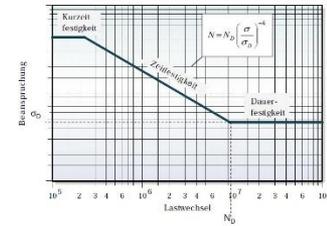


$\sigma_m = 0$ 

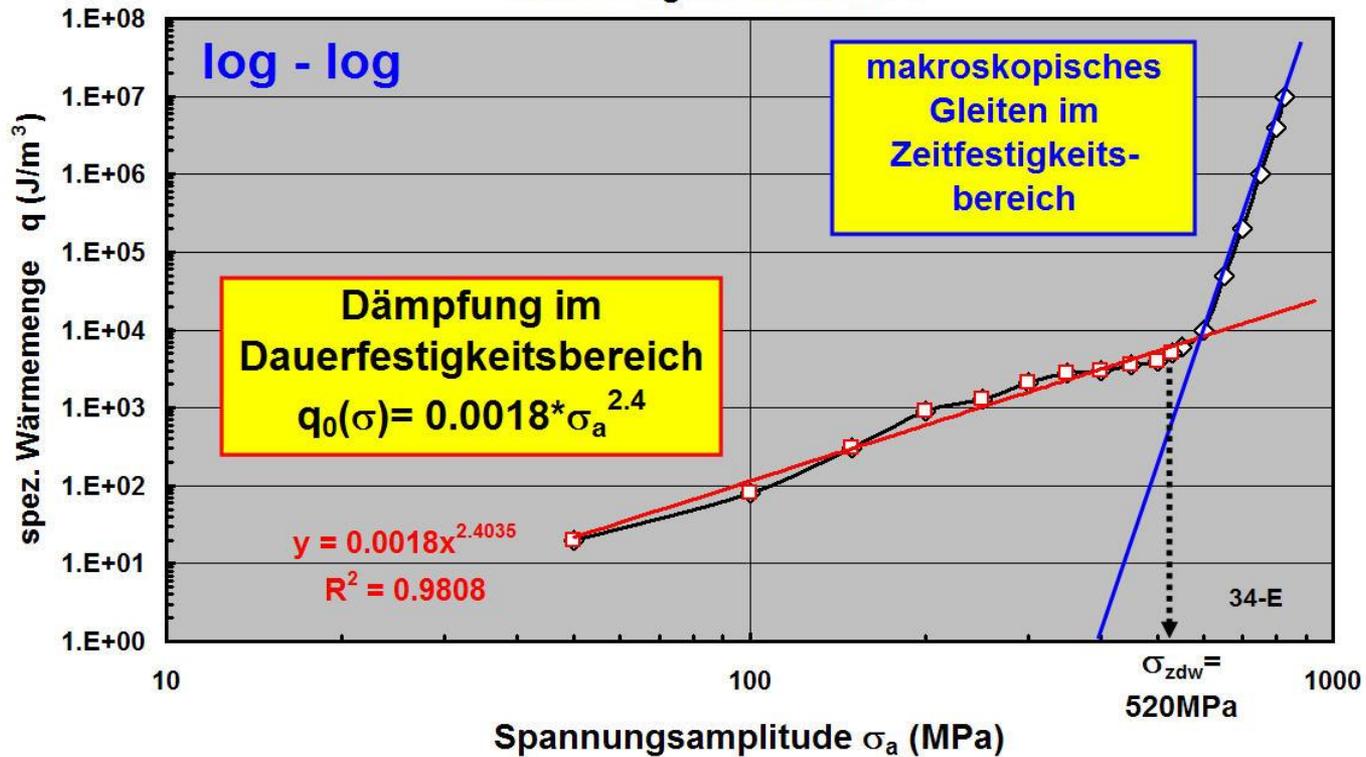
Quantitative Thermometrie

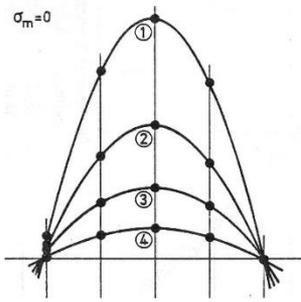
Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie



34CrNiMo6 (H2)
Dauerfestigkeit 510-530MPa

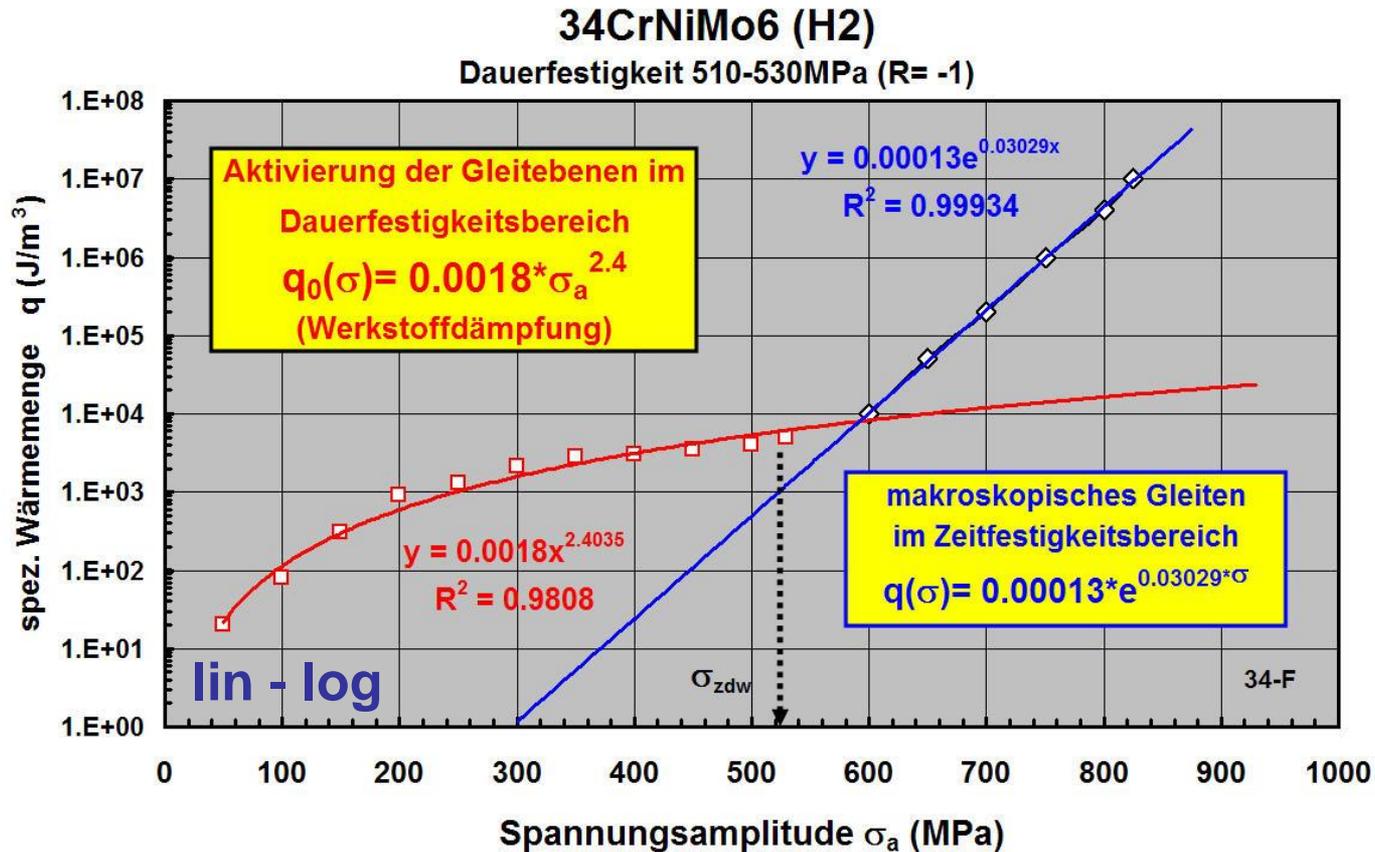
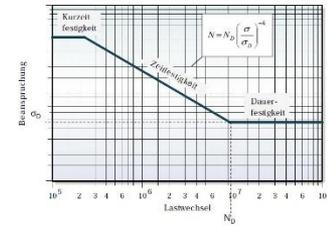


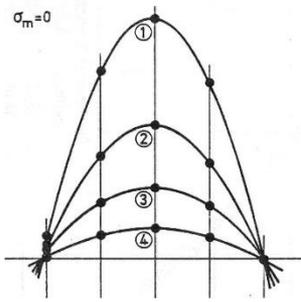
$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie

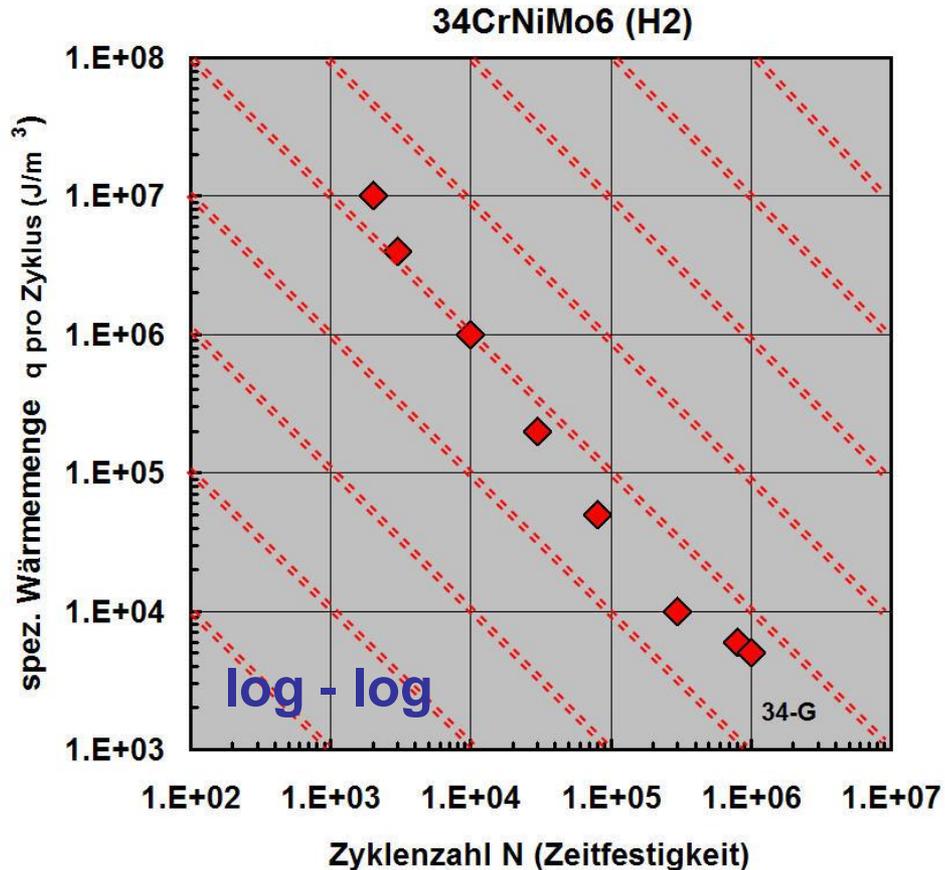
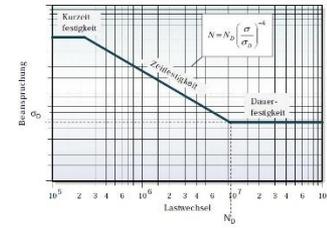




Quantitative Thermometrie

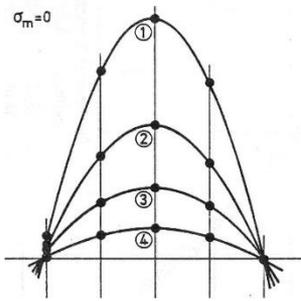
Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie



Wieviel
Wärmeentwicklung
 q pro Lastspiel
bei welcher Anriss-
Lebensdauer im
Zeitfestigkeitsbereich?

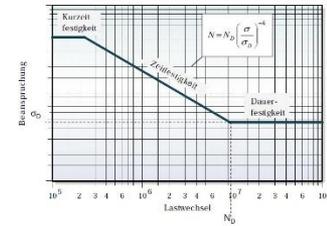
(Näherung aus
Stufenversuchen)

$\sigma_m = 0$ 

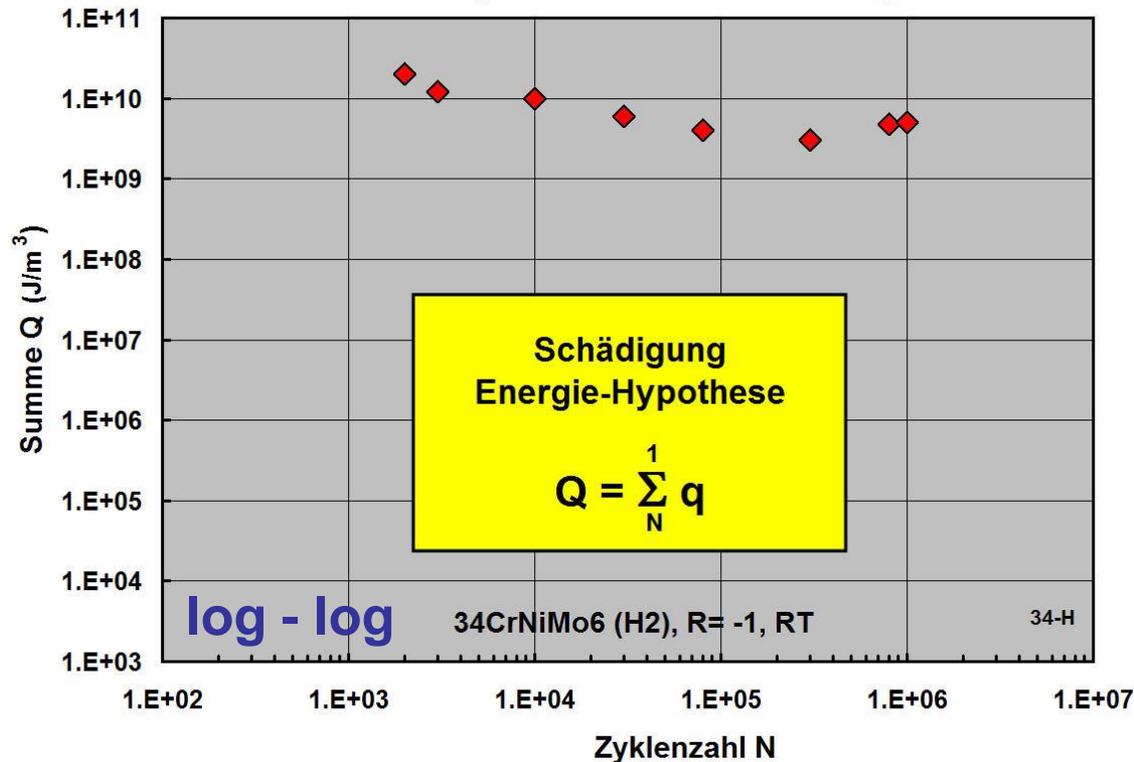
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie



Näherung aus Stufenversuch $Q = q \cdot N$



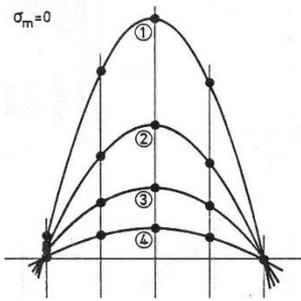
Wieviel Gesamt-
Wärmeentwicklung

Q_{ges}

bei welcher Anriss-
Lebensdauer?

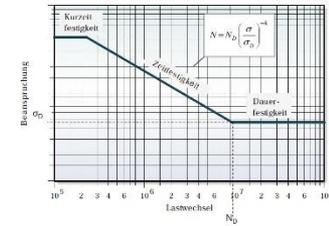
(Näherung aus
Stufenversuchen)

$\sigma_m = 0$



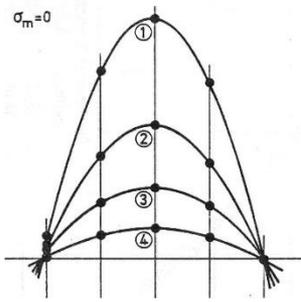
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung



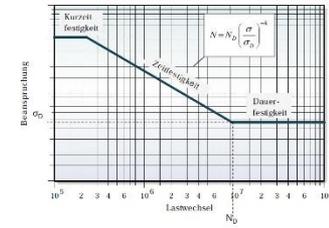
Gliederung

1. Werkstoff und Gefüge
2. Ermüdung LCF-HCF-VHCF
3. Quantitative Thermometrie
4. Energie-Hypothese (Schädigung und Schädigungsmass)
5. Messtechnik
6. Ausblick
7. Ihre Fragen, meine Fragen
8. Upgrade



Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung



Temperatur-Messtechnik

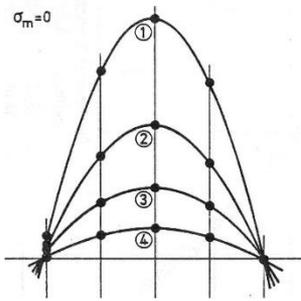
Temperatur-Messfühler

Temperatur-Messfühler	Applikationsform	Durchmesser D (mm)	Temperaturauflösung	Kennlinie	Messbereich ca. (°C)
NTC-Heissleiter	Punkt	0.33	besser 1 mK	exponentiell	0 - 100
Cu-Draht	Linie	0.05	1 - 10 mK	linear	0 - 100
TE Typ J	Punkt	0.2	10 mK	linear	0 - 600
Thermokamera	Fläche	-	1 - 10 mK	linear	0 - 200

Jeweils Mittelwert aus ca. 1000 Messungen/Temperatur
(Messrate ca. 0.5 bis 1 kHz)

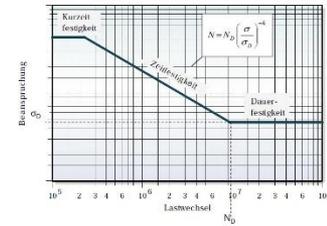
Beste Anwendung abhängig von:

- Probengröße
- Opt. Zugänglichkeit, Isolation
- Oberfläche und Prüftemperatur
- Prüffrequenz
- Werkstoff

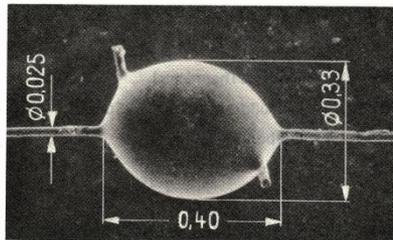


Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung



Temperatur-Messtechnik

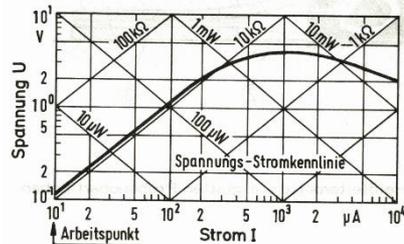


Heißleiter K 19,
Typ K 19/10 %/12 kΩ
(goldbedampft,
REM-Aufnahme)

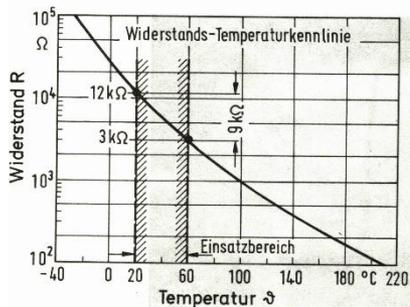
Heißleiter-Miniatur-Widerstandsfühler 12 kΩ

Konstantstrom 10-20 μA

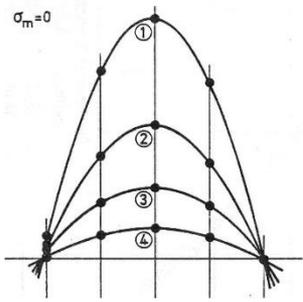
(Präzisions-Stromquelle
Digistant-Burster)



Technische Daten:
Untere Grenztemperatur $\vartheta_{\min} = -55^{\circ}\text{C}$
(mit $R_{\max} = 500.000 \Omega$)
Obere Grenztemperatur $\vartheta_{\max} = 200^{\circ}\text{C}$
(mit $R_{\min} = 120 \Omega$)
Nenntemperatur $\vartheta_N = 20^{\circ}\text{C}$
(mit $R_N = 12.000 \Omega$)
Belastbarkeit bei 25°C etwa 25 mW
Therm. Abkühlzeitkonstante $\tau = 0,4 \text{ s}$
Wärmekapazität $C = 56 \cdot 10^{-6} \text{ J/K}$
Anschlußdrähte: Platin $\varnothing 25 \mu\text{m}$
Halbleiteroberfläche: glasbedampft

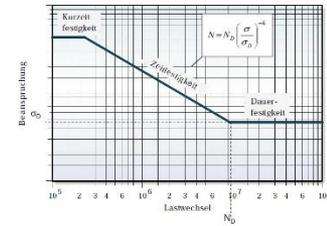


$\sigma_m = 0$



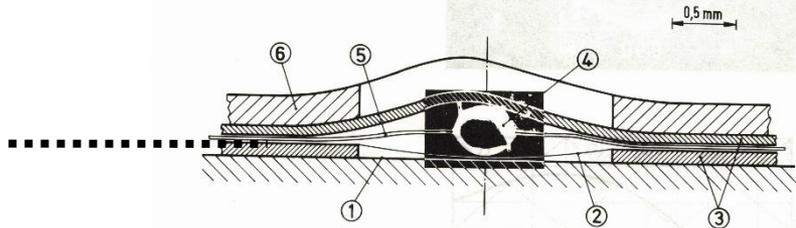
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung



Temperatur-Messtechnik

- 1 Probenoberfläche ($R_t \leq 1 \mu\text{m}$)
- 2 Elektroisierfolie (Dicke $3 \mu\text{m}$)
- 3 Einbettklebefolie
- 4 Heißeleiter (Thermistor)
- 5 Anschlußdraht (Platin $\varnothing 25 \mu\text{m}$)
- 6 Klebeband



Heissleiter-Miniatur-Widerstandsfühler

Kennlinie $(\ln R)^4$

Bild 23: Applikationsaufbau der Heißeleiterperle auf glatten Probenoberflächen

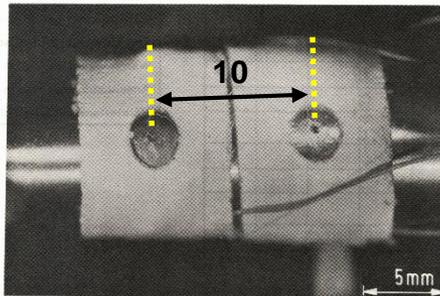
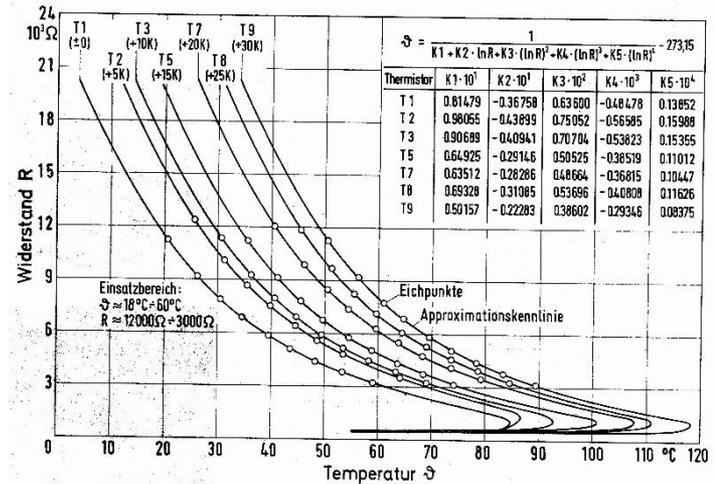
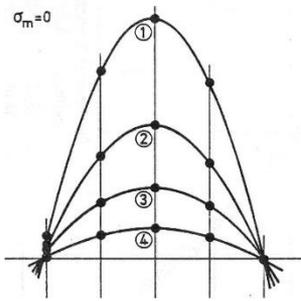


Bild 24: Zwei applizierte Thermistor-temperaturfühler auf einer glatten Probe

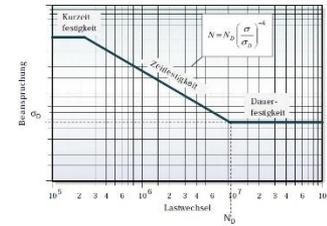


$\sigma_m = 0$



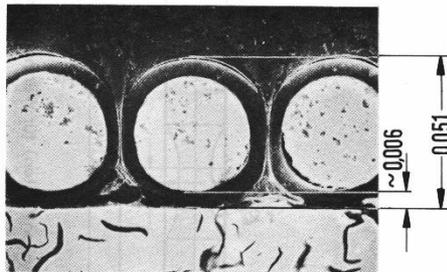
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung



Temperatur-Messtechnik

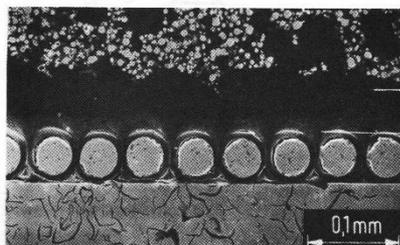
Durchmesser $d = 0,05 \pm 0,005 \text{ mm}$	Streckgrenze $\sigma_{0,2} = 140 \text{ N/mm}^2$
Isolierung: Vielschichtverfahren, Polyurethan, mod.	Zugfestigkeit $\sigma_B = 300 \text{ N/mm}^2$
Grenztemperatur $\vartheta_G = 130^\circ\text{C}$	E-Modul $E = 125.000 \text{ N/mm}^2$
Löttemperatur $\vartheta_L \approx 350^\circ\text{C}$	Bruchdehnung $\delta_5 \approx 18 \%$
	Biegeradius $r \approx d = 0,05 \text{ mm}$



Querschliff, goldbedampft (Aufnahme Rasterelektronenmikroskop, REM)

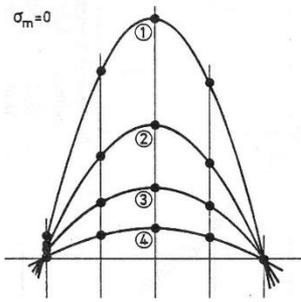
Kupfer-Lackdraht-Widerstandsfühler (Dehnungsmessbrücke)

Bild 13: Kupferlackdraht für Oberflächentemperaturmessungen (Hersteller: Fa. Synflex, Erich Hasse GmbH & Co. KG, Lügde/Westf.)



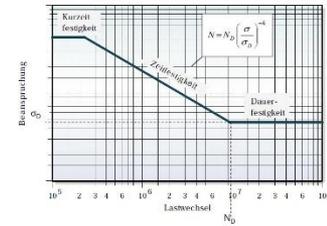
- Einbettmittel
- Abdeck- und Fixierlack
- Kupfermeßwicklung
- Grauguß GG 20

$\sigma_m = 0$

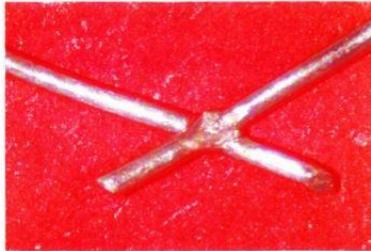


Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung



Temperatur-Messtechnik

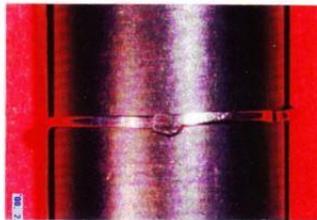


step 1

capacitor
discharge
welding



step 2
cutting

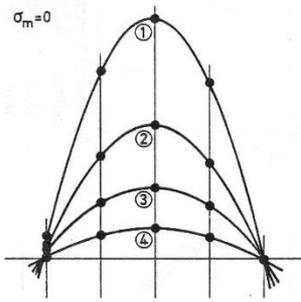


step 3
forging

production steps of PtRh-Pt type S
thermocouples \varnothing 0.35mm
for tensile, LCF and TMF tests

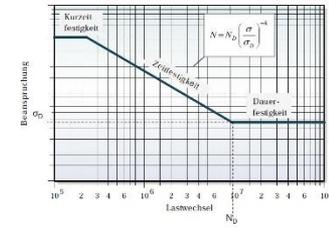
Empfehlungen für Thermometrie:

- Thermodraht Typ J
Eisen-Konstantan
 \varnothing ca. 0.2 mm
- punktgeschweisst oder
lasergeschweisst
- Fixiert mit Sekundenkleber
- Abdeckung mit farblosem Lack

$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung



Temperatur-Messtechnik

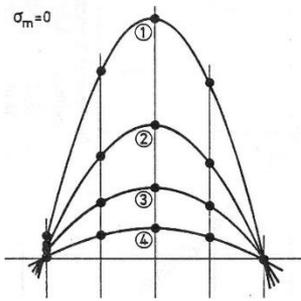
1979:

- Kein PC
- Kein Taschenrechner
- Kein Internet
- Dehnmessbrücke
- Millivoltmeter
- DEC PDP 11/23 mit Magnetband

2019:

- PC mit Messinterface
- Präzisionsverstärker
- DasyLAB / LabView
- Mikrotron mit PC-Steuerung
- Internet

$\sigma_m = 0$

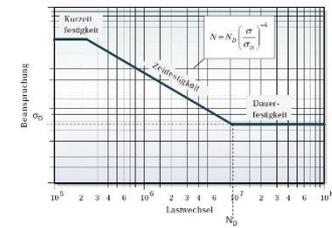


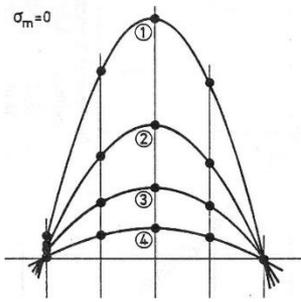
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

Gliederung

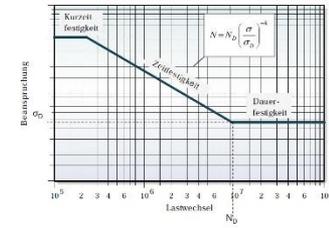
1. Werkstoff und Gefüge
2. Ermüdung LCF-HCF-VHCF
3. Quantitative Thermometrie
4. Energie-Hypothese (Schädigung und Schädigungsmass)
5. Messtechnik
6. Ausblick
7. Ihre Fragen, meine Fragen
8. Upgrade



$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

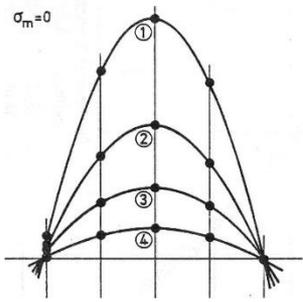


Ausblick

interessante Anwendungen

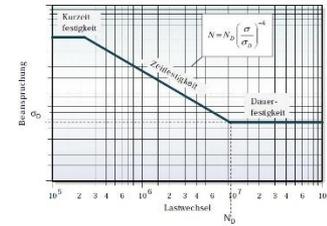
- **Einkristalle, gerichtet erstarrte Legierungen**
- **Mikro- und nano-kristalline Werkstoffe**
- **Mikrolegierte Werkstoffe**
- **SLM - Werkstoffe (selective 3D laser manufacturing)**
- **CFK (Kohlenstofffaser verstärkte Kunststoffe)**
- **FE - Gefüge-Simulation**
- **Einfluss des Mehrachsigkeitsgrades (Volumeneffekt)**
- **Reihenfolgeeinflüsse (Schädigung)**

$\sigma_m = 0$

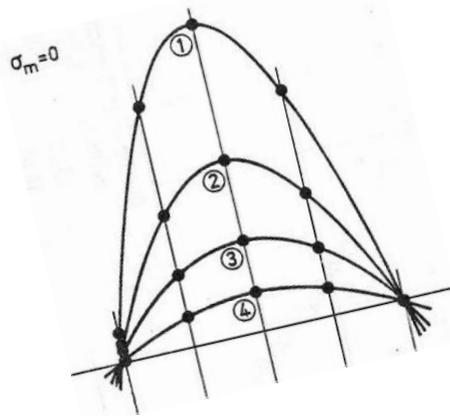


Quantitative Thermometrie

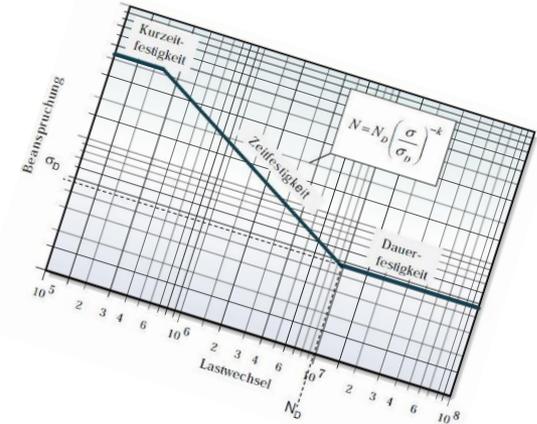
Dämpfung und Schädigung



Vielen Dank!



**Fragen?
Anregungen?
Beiträge?**

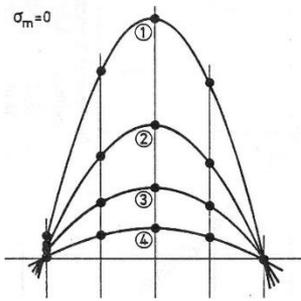


Nun sind Sie dran !!

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

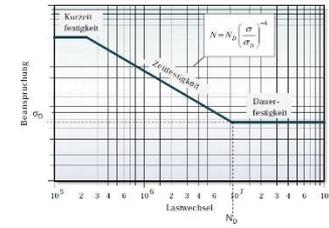
klaus.staerk@swissonline.ch
www.staerk-erdwaerme.ch

$\sigma_m = 0$



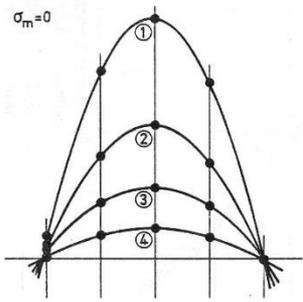
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung



Gliederung

1. Werkstoff und Gefüge
2. Ermüdung LCF-HCF-VHCF
3. Quantitative Thermometrie
4. Energie-Hypothese (Schädigung und Schädigungsmass)
5. Messtechnik
6. Ausblick
7. Ihre Fragen, meine Fragen
8. Upgrade

$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

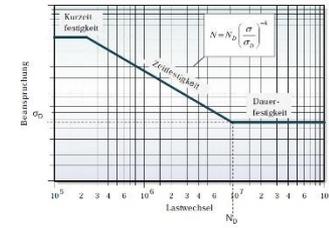
Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie

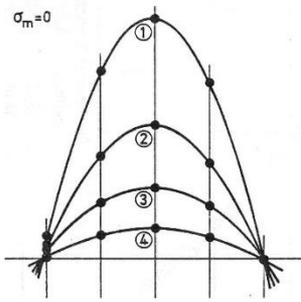
Energie-Hypothese

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?



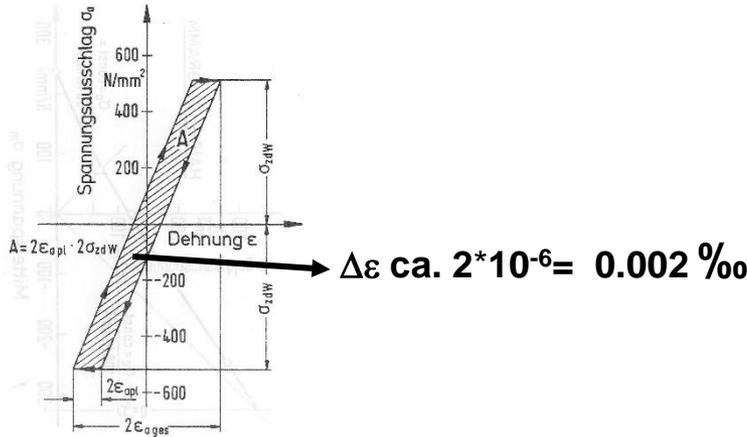
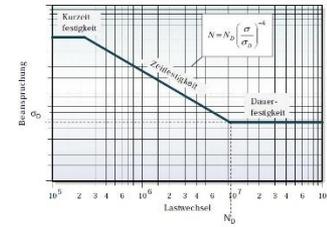
$\sigma_m = 0$



Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

Ihre Fragen, meine Fragen



HCF/VHCF

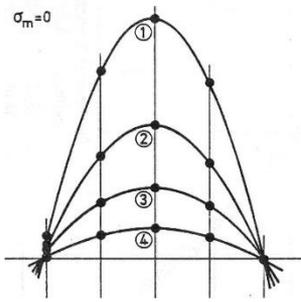
$$\text{Fläche } A = q \approx \Delta\sigma^* \Delta\epsilon$$

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

Ist die spez. Formänderungsarbeit von ca. 1-5 kJ/m³ ein typischer Grenzwert bei ferritischen Werkstoffen für Ermüdungsschädigung?

- Mikro-elastische Versetzungsgleitungen?
- Saitenschwingungen?
- Dämpfung?

$\sigma_m = 0$

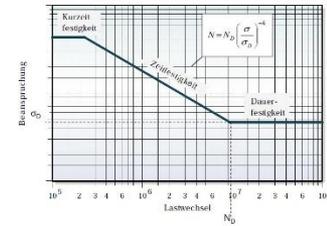


Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie

Ihre Fragen, meine Fragen

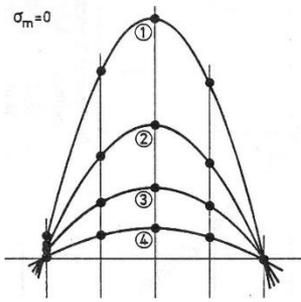


Gibt es eine Dauerfestigkeit und einen threshold-Wert?

Ist der Abfall im VHCF-Gebiet von der Homogenität des Gefüges abhängig?

Ist der Abfall im VHCF-Gebiet von der Gitterstruktur abhängig?

Ist die Änderung der spez. Wärmemenge/cy ein Mass für die Lebensdauer?

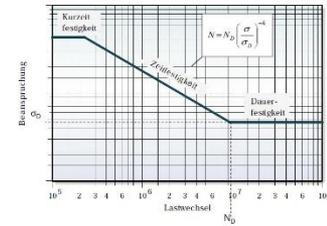
$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie

Ihre Fragen, meine Fragen



Gibt es einen
Schädigungs-
grenzwert q_0 bzw.
die unendliche
Schädigungs-
akkumulation?

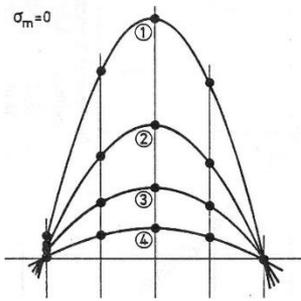
Gibt es eine
Schädigungssumme

$$Q_{\text{ges}} = \sum_N^1 q_i$$

für Anriss?

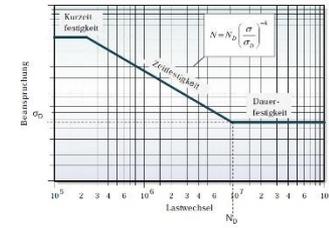
Kann man aus der Wärmeentwicklung q auf eine
Vorschädigung schliessen?

$\sigma_m = 0$



Quantitative Thermometrie

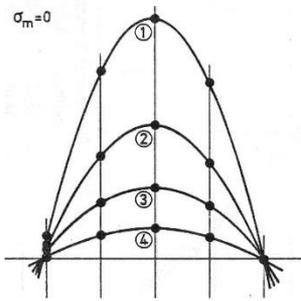
Dämpfung und Schädigung



Gliederung

1. Werkstoff und Gefüge
2. Ermüdung LCF-HCF-VHCF
3. Quantitative Thermometrie
4. Energie-Hypothese (Schädigung und Schädigungsmass)
5. Messtechnik
6. Ausblick
7. Ihre Fragen, meine Fragen
8. Upgrade

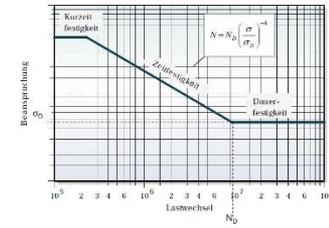
$\sigma_m = 0$



Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

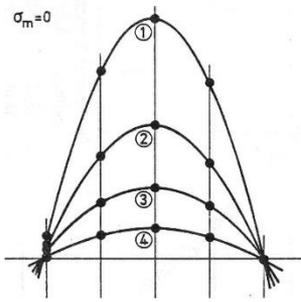
quantitative Thermometrie



Upgrade

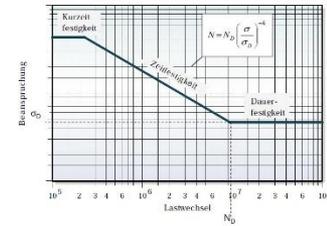
**Ermüdungsrisswachstum
und
diverse thermometrische
Messungen**

$\sigma_m = 0$

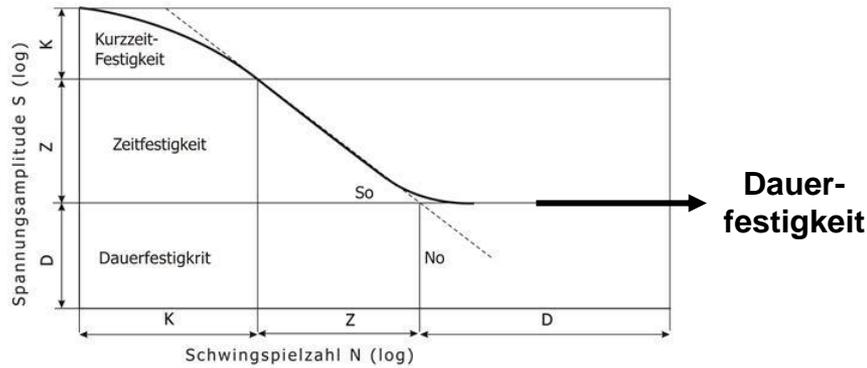


Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

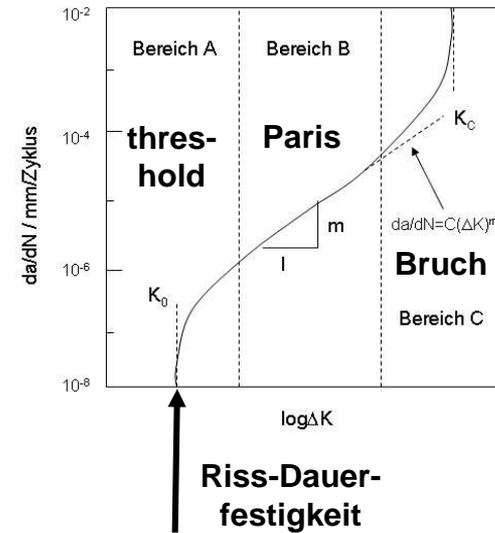


Ermüdung

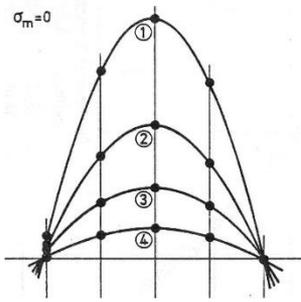


Schwingfestigkeit

Risswachstum



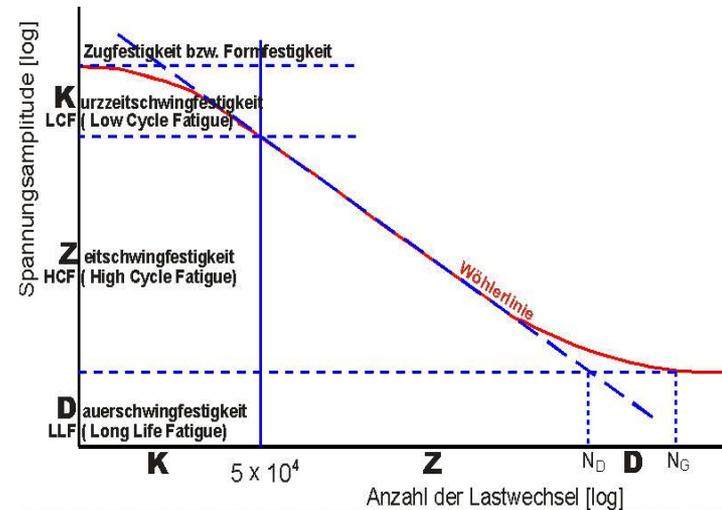
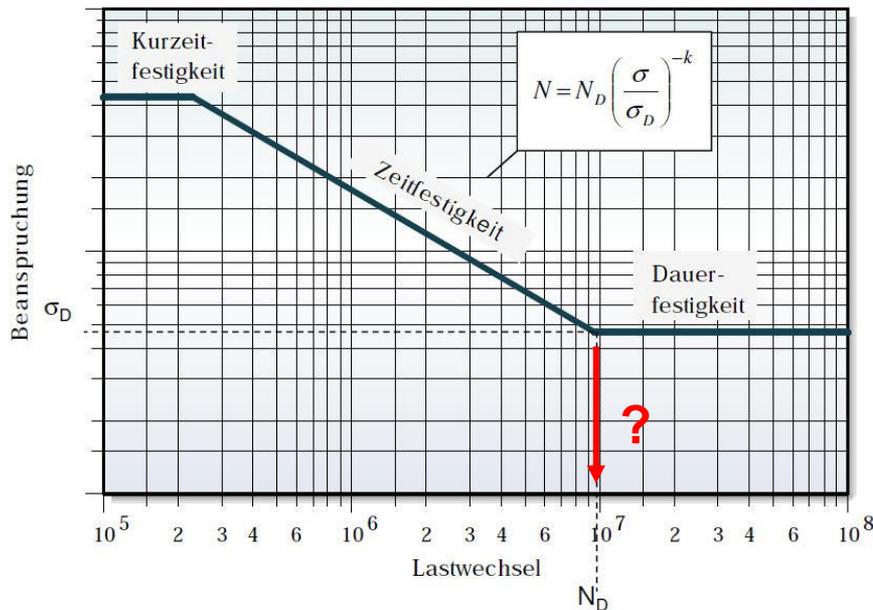
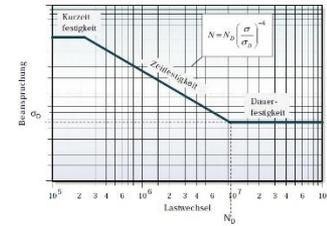
Bruchmechanik

$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

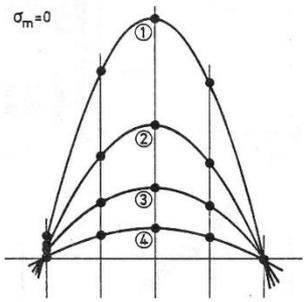
Dämpfung und Schädigung

Wöhlerlinie, Dauerfestigkeit?



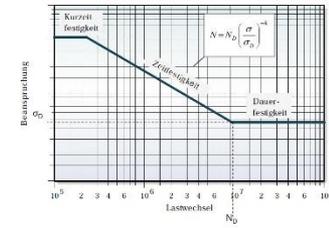
- Gibt es eine Dauerfestigkeit?
- Bei wieviel Lastwechseln ist der Übergang zeit-dauerfest?
- Ist der Übergang werkstoffabhängig?

$\sigma_m = 0$

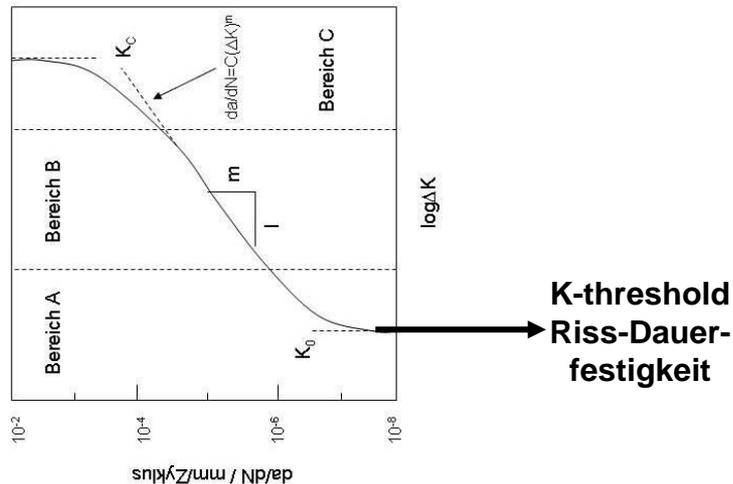
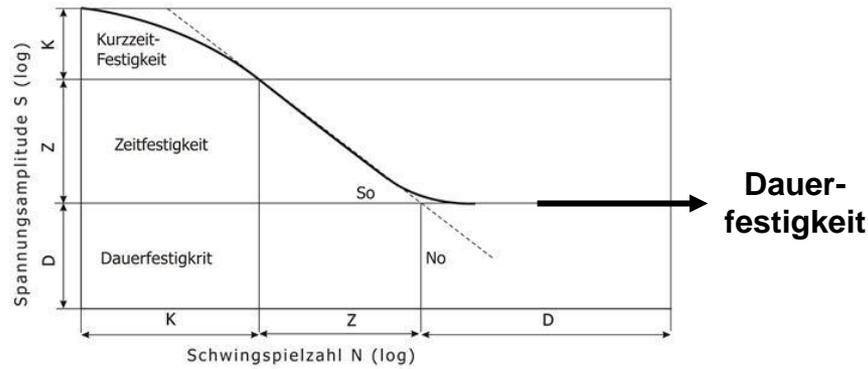


Quantitative Thermometrie

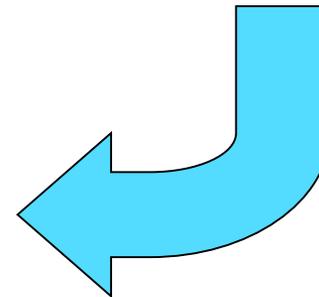
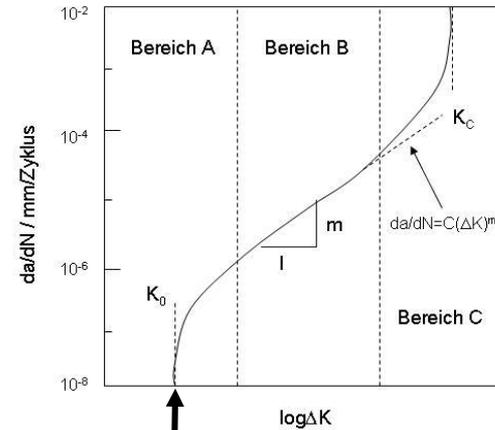
Dämpfung und Schädigung



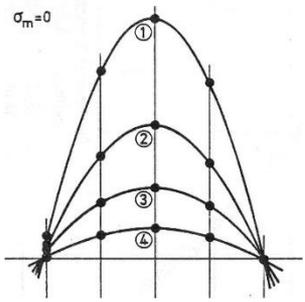
Ermüdung



Risswachstum



$\sigma_m = 0$

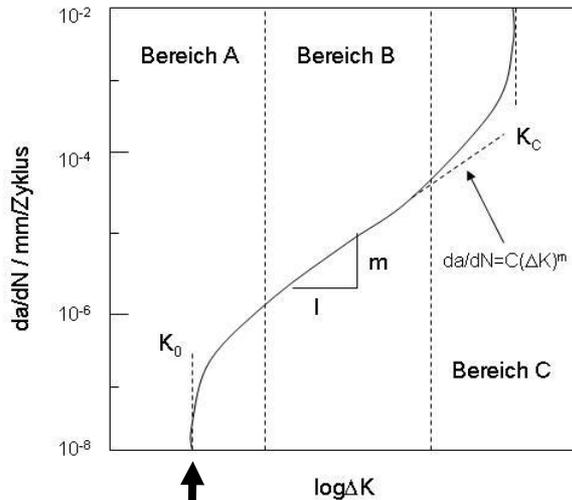
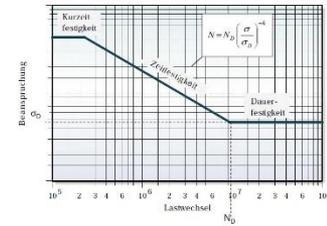


Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

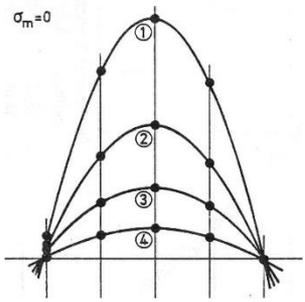
threshold Riss-Stopp

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



„Riss-Dauerfestigkeit“

„Oberflächenriss“

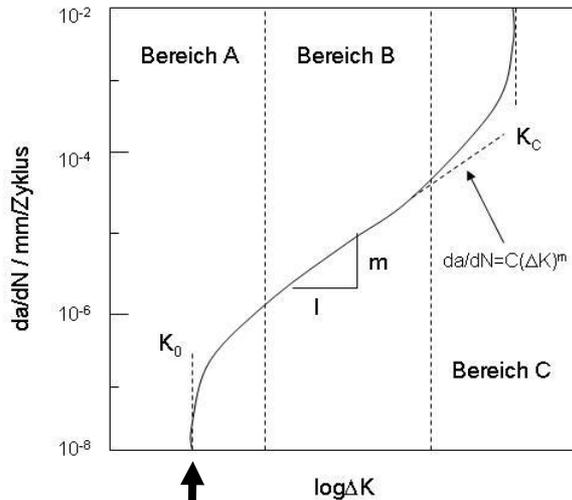
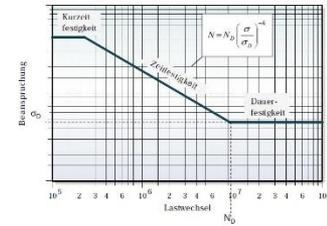


Quantitative Thermometrie

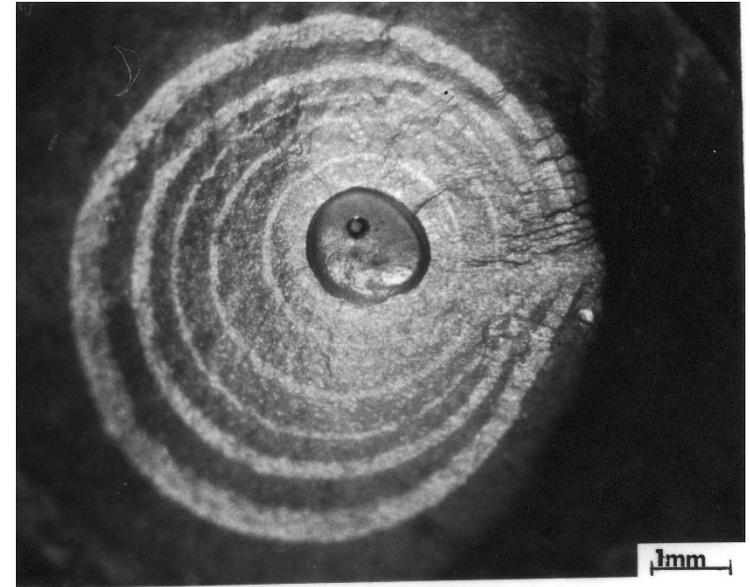
Dämpfung und Schädigung

threshold Riss-Stopp

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

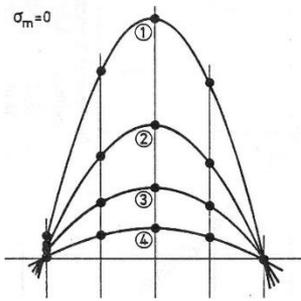


Riss-Dauerfestigkeit



„innenliegender Fehler“

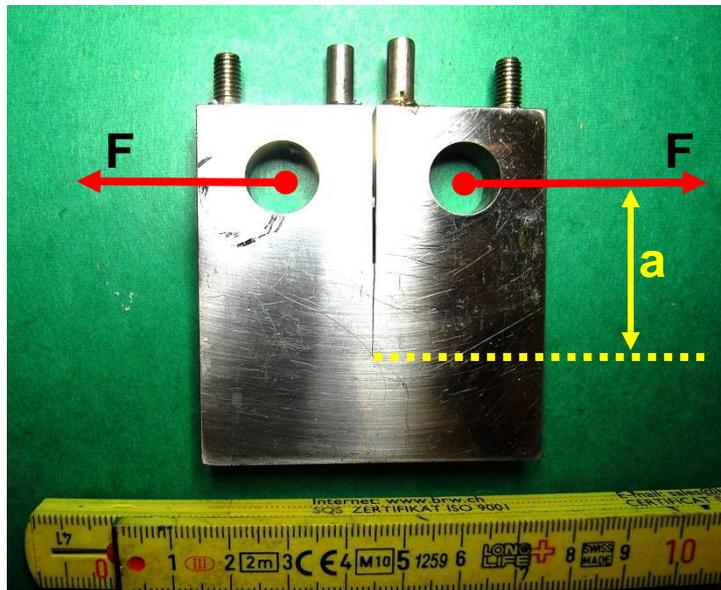
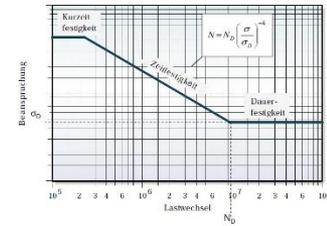
HCF-Blöcke mit beach marks an Schweisspore

$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

Ermüdungsrisswachstum im VHCF (threshold)



→ Innenliegende Fehlstelle
(Riss) unter Ermüdung
(Abschätzung)

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

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

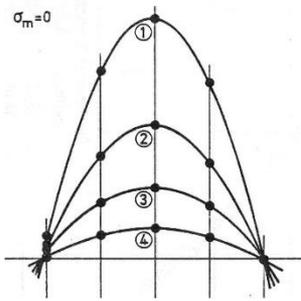
→ Fehlerdurchmesser
 $2a \approx 16 \mu m$

Beispiel:

Werkstoff 12%-Cr-Stahl

Dauerfestigkeit $\sigma_D = 500 \text{ MPa}$

Threshold $\Delta K_{th} = 4.8 \text{ MPa}\sqrt{m}$

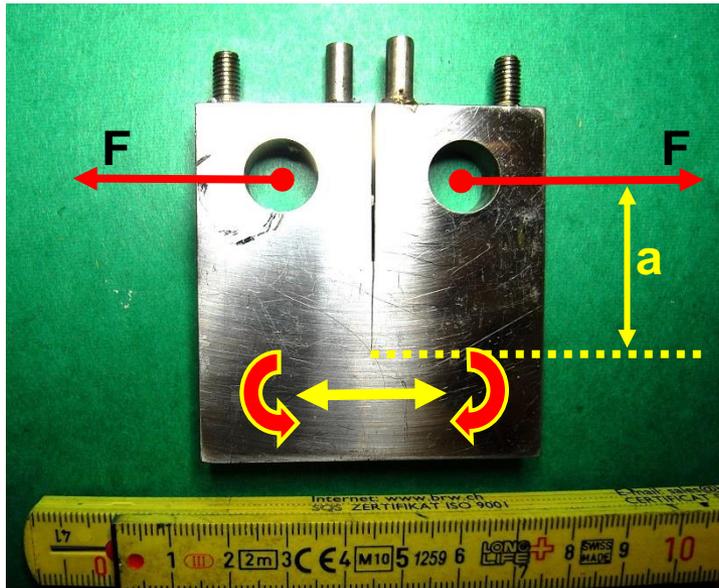
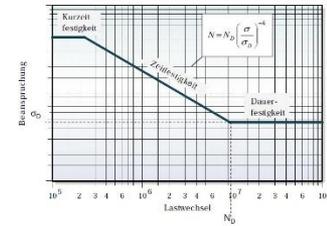
$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

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}

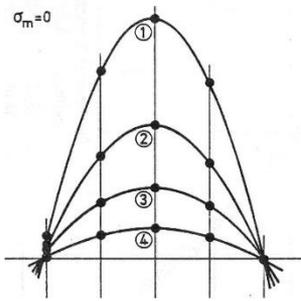
$$\Delta K_{th} = \Delta \sigma_n \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Q \quad \text{threshold}$$

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

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

Kerb- bzw. Risswirkungszahl

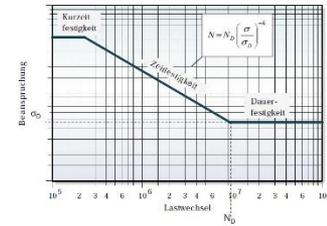
$$\beta_{Riss} = \Delta \sigma_D / \Delta \sigma_n = 1000 / 40.7 = 24.6$$



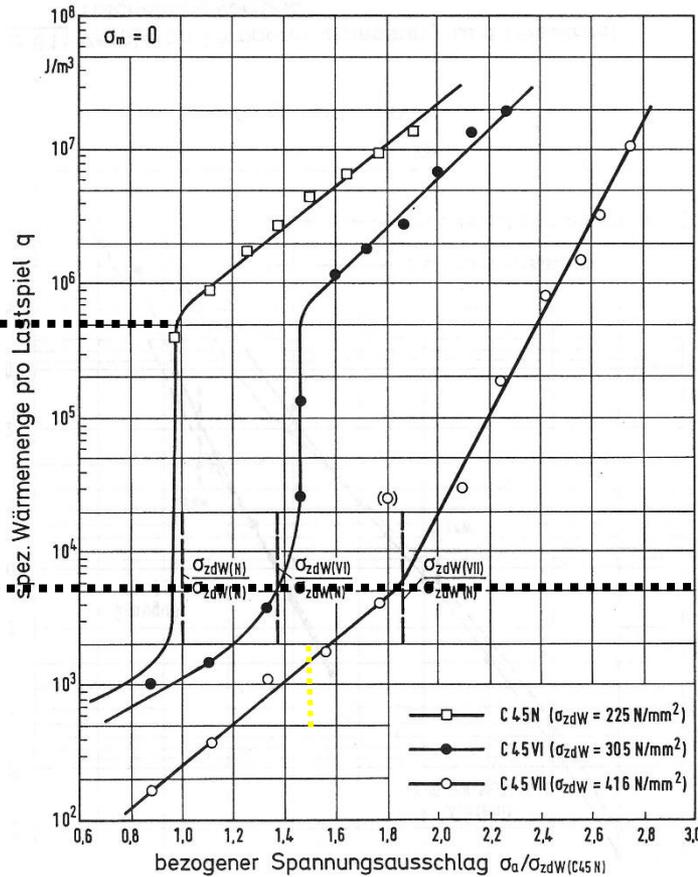
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie

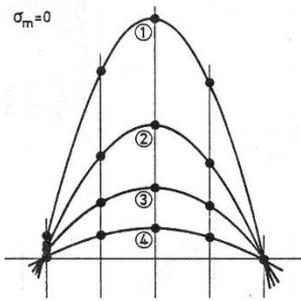


2 Dekaden



ca. 5000 J/m³

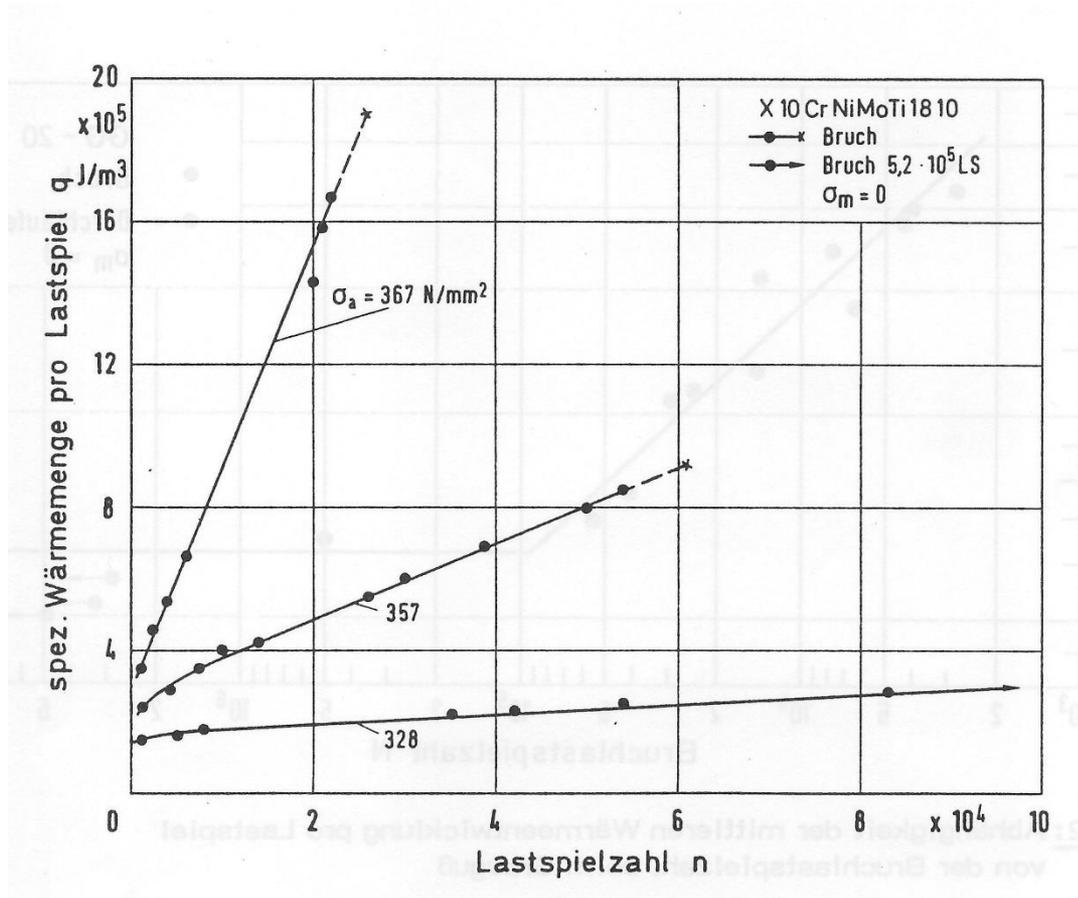
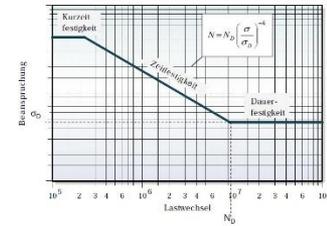
Abhängigkeit
von der
Wärmebehandlung
bzw. Festigkeit beim
Ck45



Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

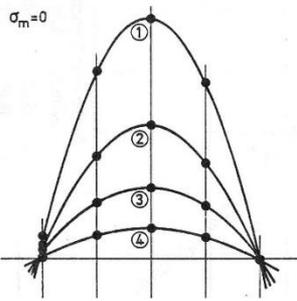
quantitative Thermometrie



Abhängigkeit von der Zyklenzahl im Zeitfestigkeitsgebiet

(Dauerfestigkeit ca. 310 MPa)

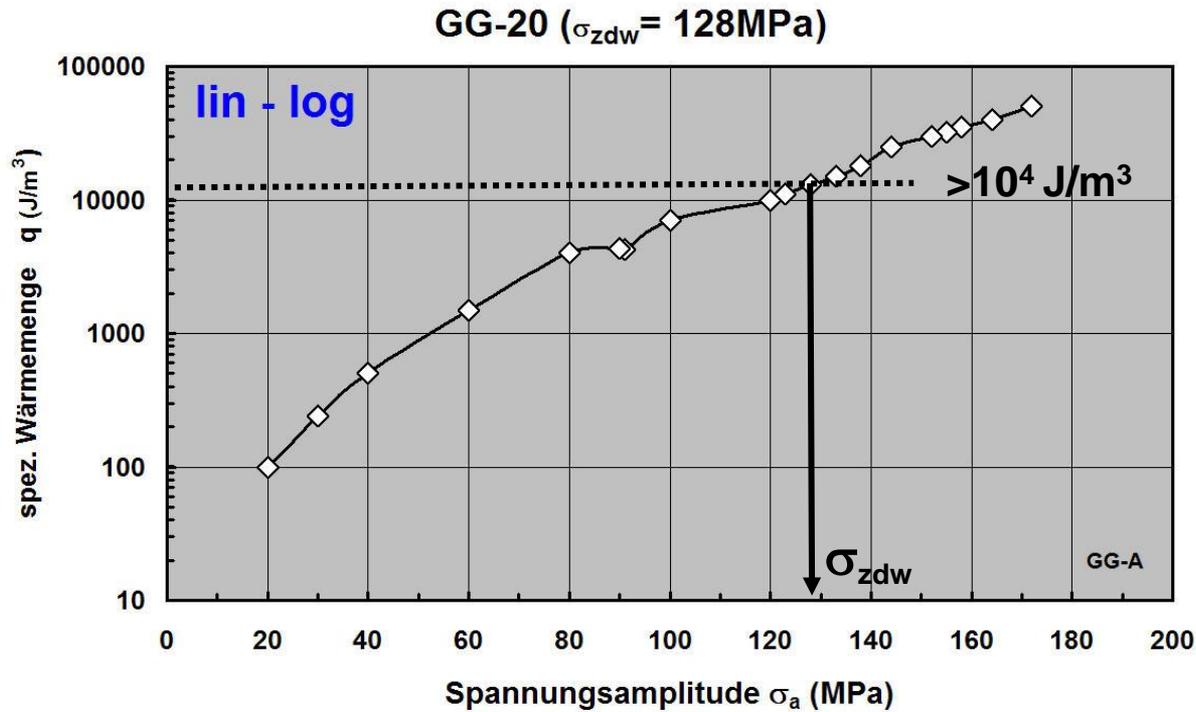
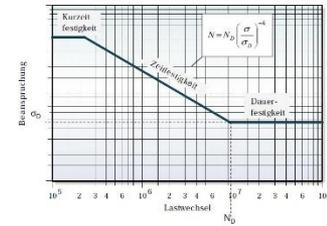
Anwendung:
 Kurzzeitbestimmung der Dauerfestigkeit im Laststeigerungsversuch (LSV)
 Reihenfolgeeffluss



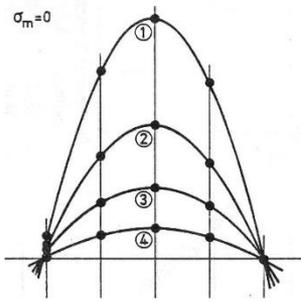
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie



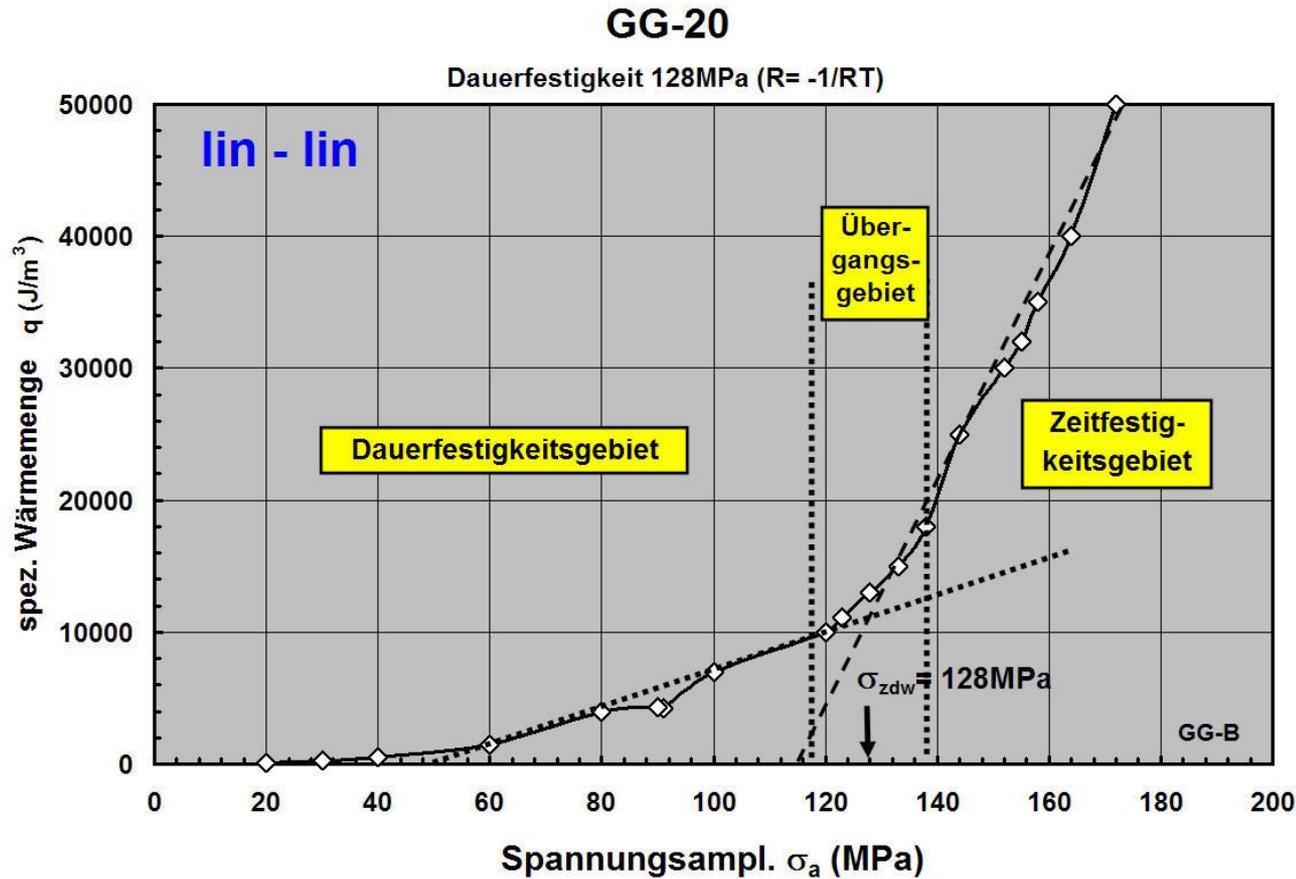
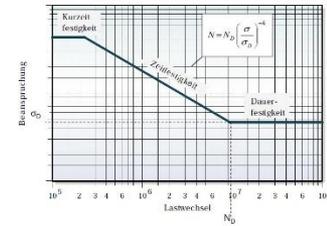
hoch-
dämpfender
lamellarer
Grauguss

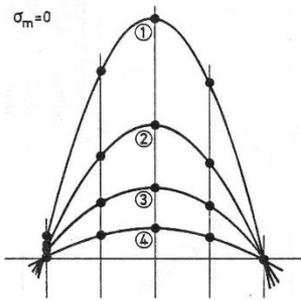


Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie

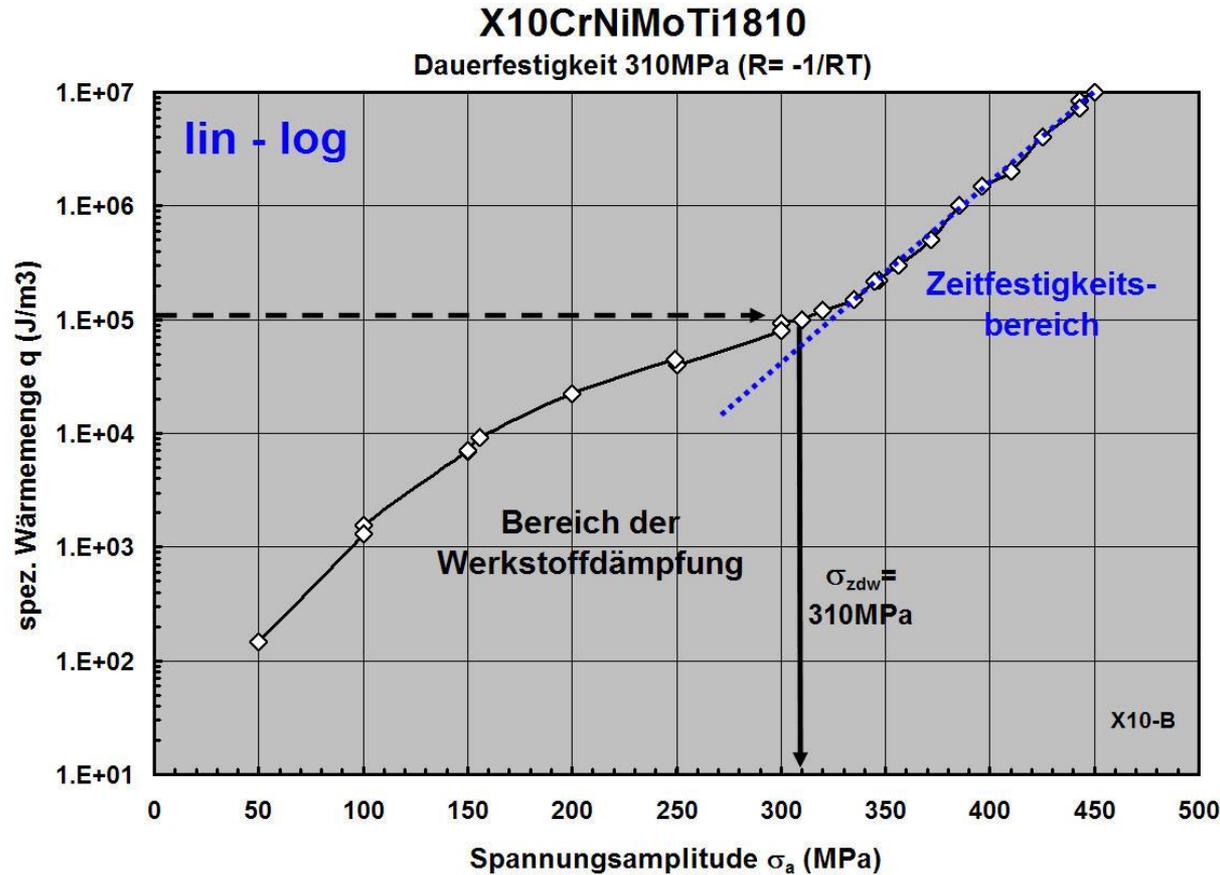
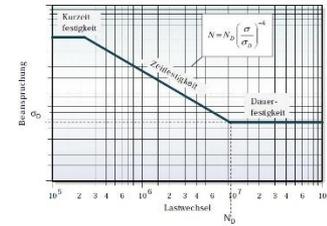




Quantitative Thermometrie

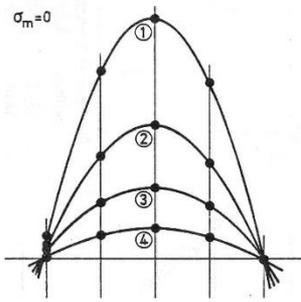
Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie



hoch-
dämpfender
Austenit

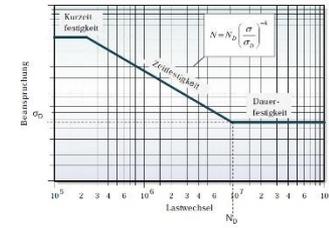
$>10^5 \text{ J/m}^3$
an der
HCF-Dauer-
festigkeits-
grenze

$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie



X10CrNiMoTi1810

Dauerfestigkeit 310MPa (R= -1/RT)

