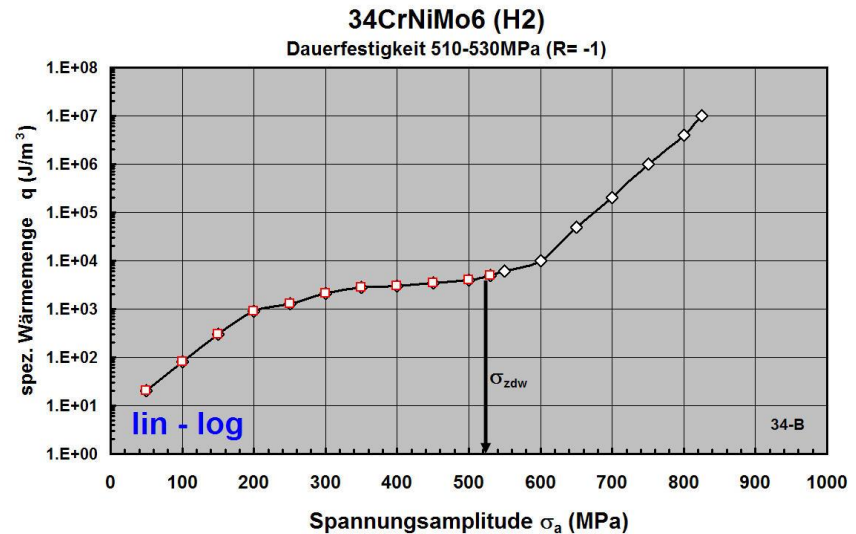
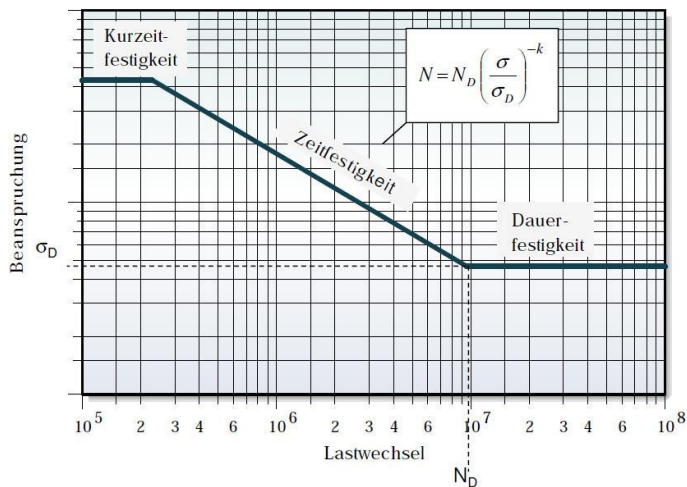


# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

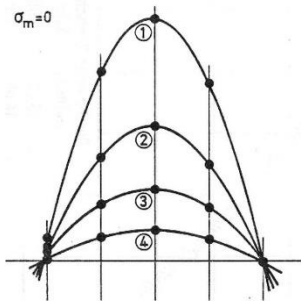


Uni Saarbrücken 14. März 2019

Experimentelle Methodik der  
Werkstoffwissenschaften

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

$\sigma_m = 0$

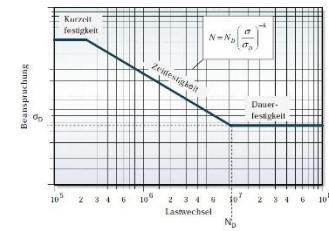


# Quantitative Thermometrie

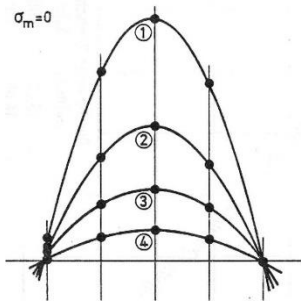
## Dämpfung und Schädigung

### 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



$\sigma_m = 0$

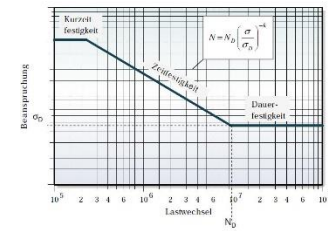


# Quantitative Thermometrie

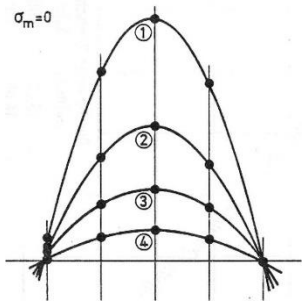
## Dämpfung und Schädigung

### 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

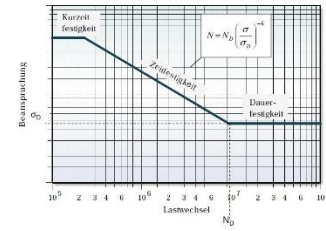


$\sigma_m = 0$



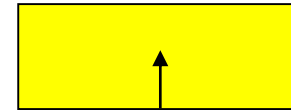
# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung



## Werkstoff

homogen+isotrop – statistisch – lokal



allg. Werkstoffprüfung

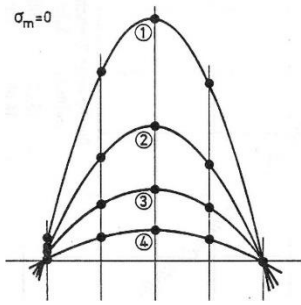


Statistik



Bruchmechanik  
s. Anhang upgrade

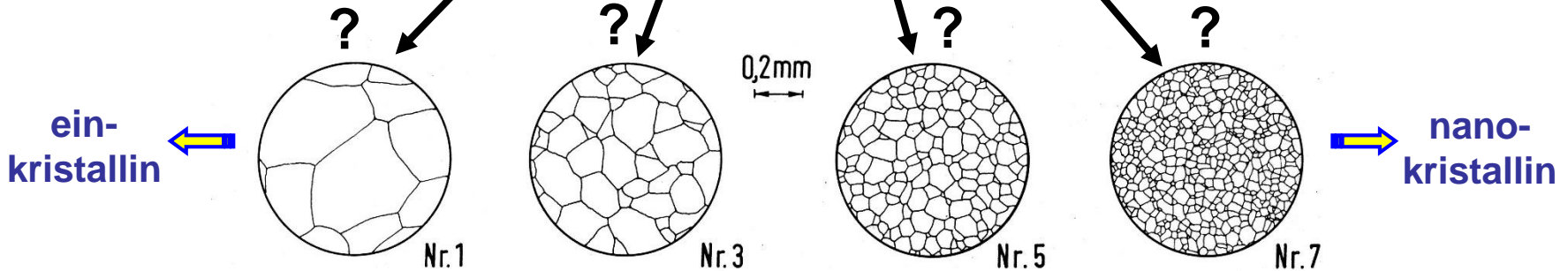
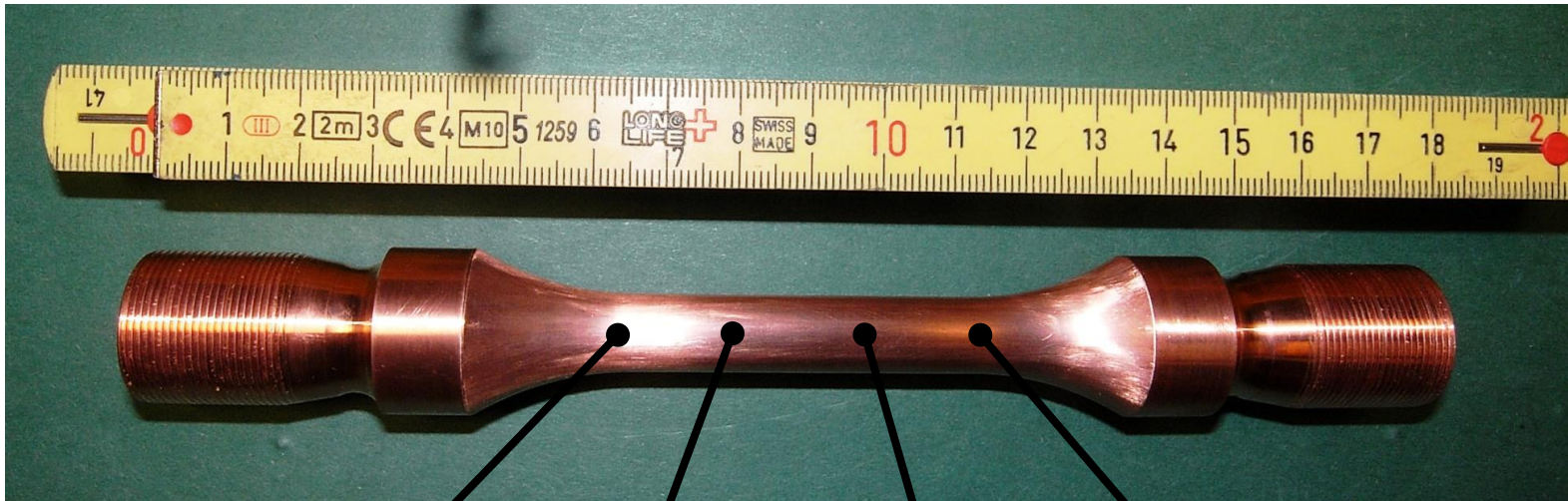
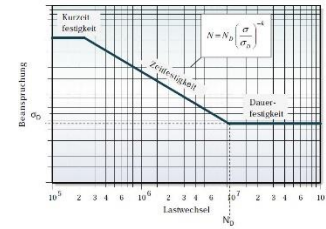
$\sigma_m = 0$



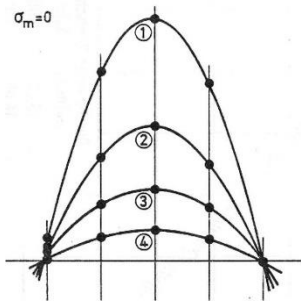
# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

## Werkstoff und Gefüge



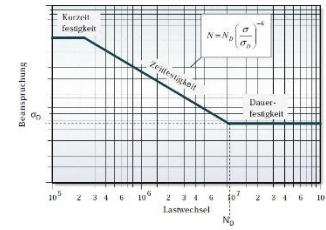
$\sigma_m = 0$



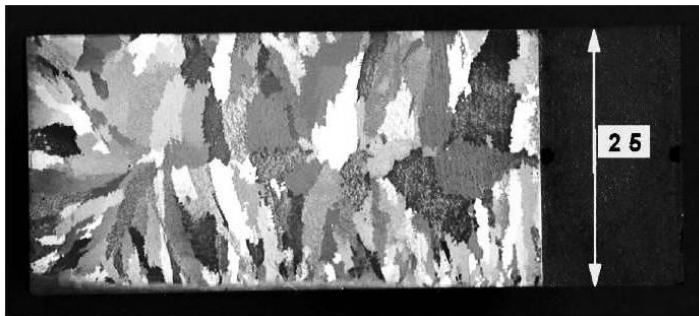
# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

## Werkstoff und Gefüge



MarM247cc



HT-Gasturbinenschaufel

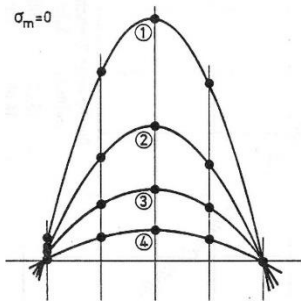
OF-Cu



oxygen-free Kupfer

?

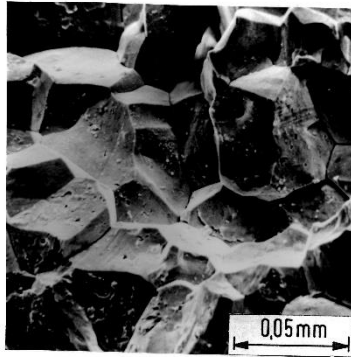
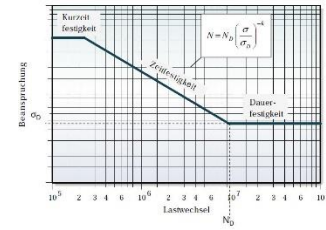
$\sigma_m = 0$



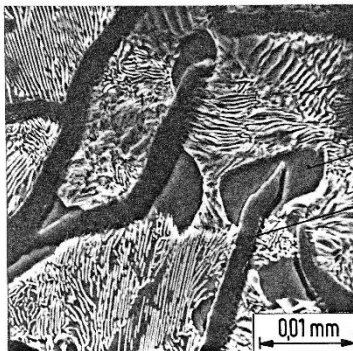
# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

## Werkstoff und Gefüge



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



Perlit

Ferrit

Graphitlamelle

Gefüge lamellarer Grauguss GG-20

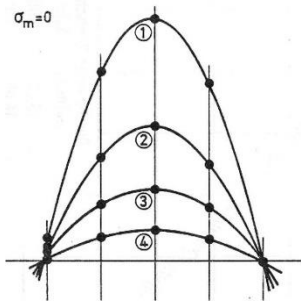
interkristalliner Bruch  
(Spannungsrisskorrosion  
12%-Cr-Stahl)

das „homogene“  
Material

- Gefüge
- Reinheit
- Homogenität
- Isotropie

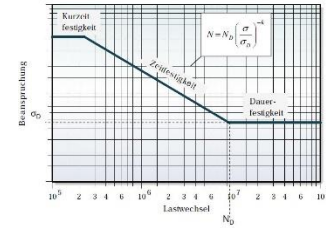


$\sigma_m = 0$

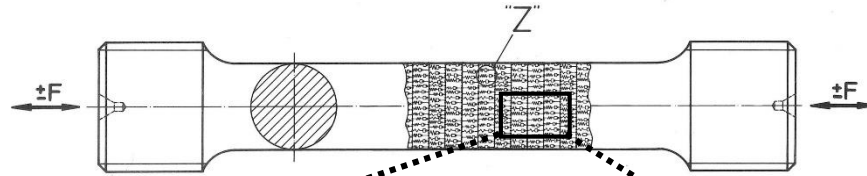


# Quantitative Thermometrie

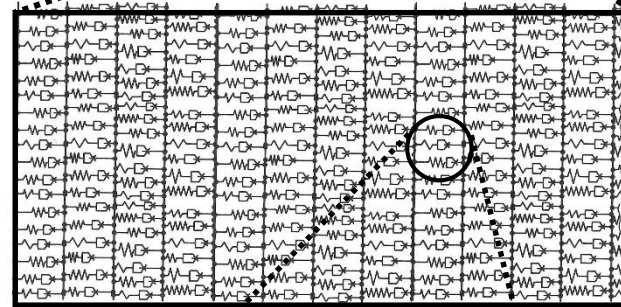
## Dämpfung und Schädigung



homogen und isotrop

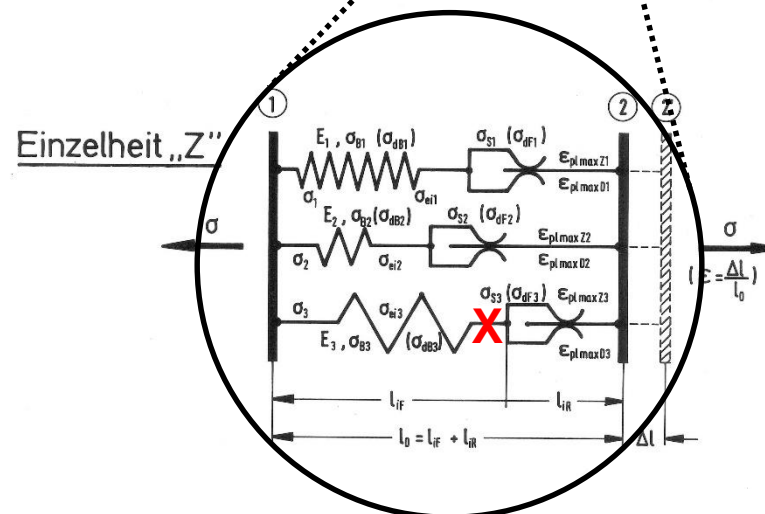


Inhomogenes Gefüge



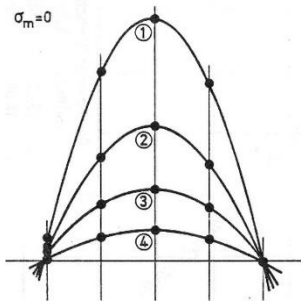
Statistische  
Werkstoff-  
Simulation 1976  
auf CDC

Fehlstelle und  
Bruchmechanik



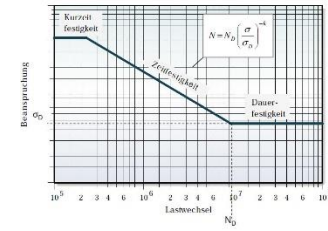


$\sigma_m = 0$



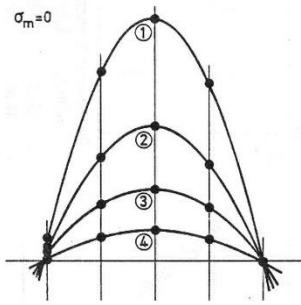
# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung



## Gliederung

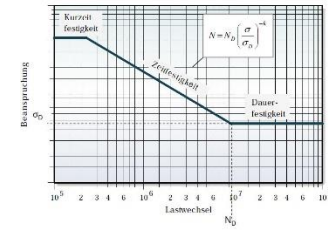
1. Werkstoff und Gefüge
2. Ermüdung LCF-HCF-VHCF
3. Quantitative Thermometrie
4. Energie-Hypothese (Schädigung und Schädigungsmass)
5. Messtechnik
6. Ausblick
7. Ihre Fragen, meine Fragen
8. Upgrade

$\sigma_m = 0$ 

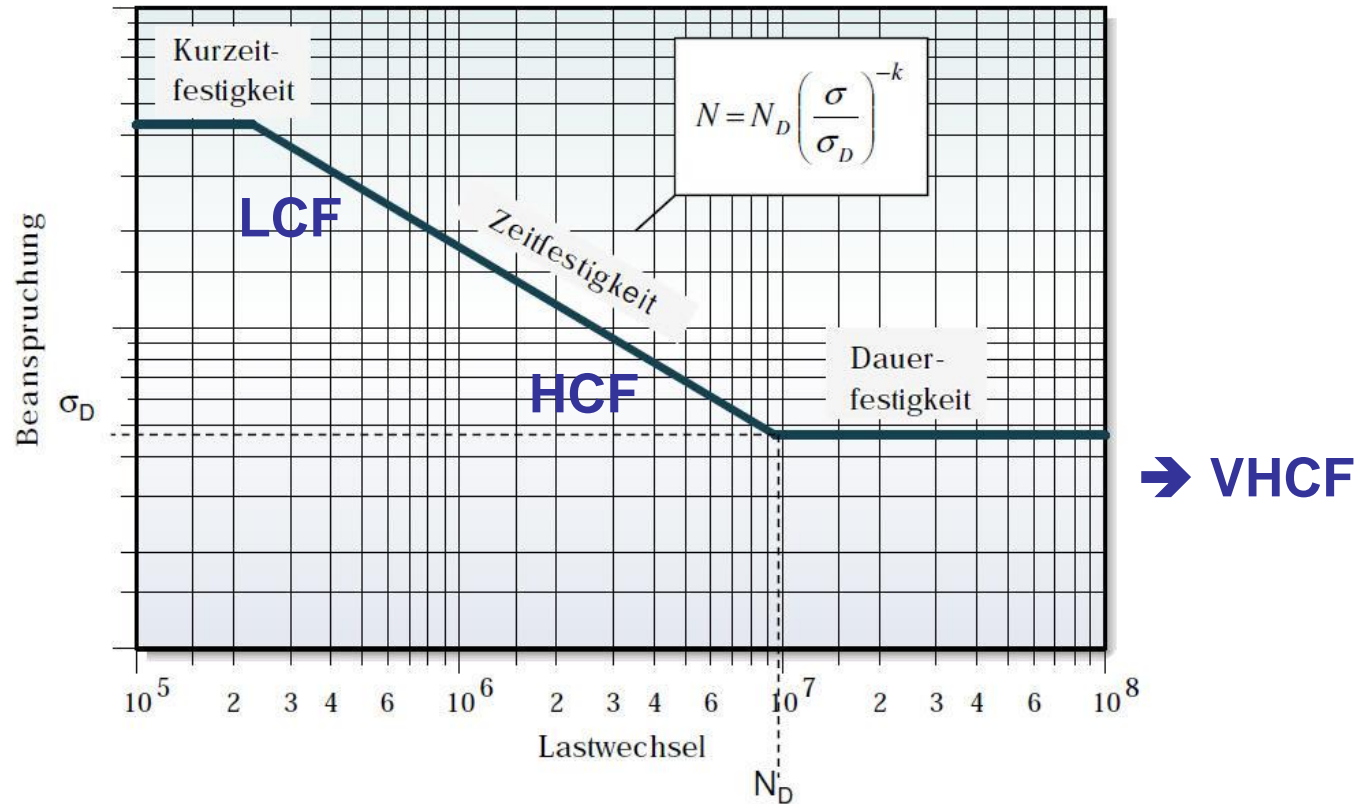
# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

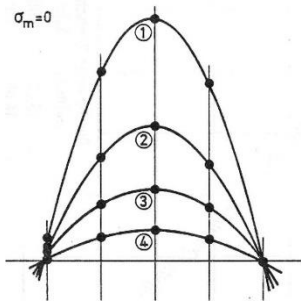
LCF  $\rightarrow$  HCF  $\rightarrow$  VHCF  $> 10^{10}$  cy



### Die Wöhler-Linie

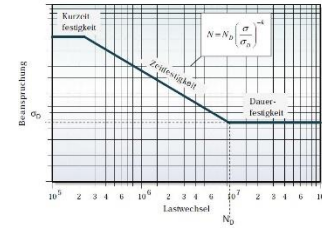


$\sigma_m = 0$

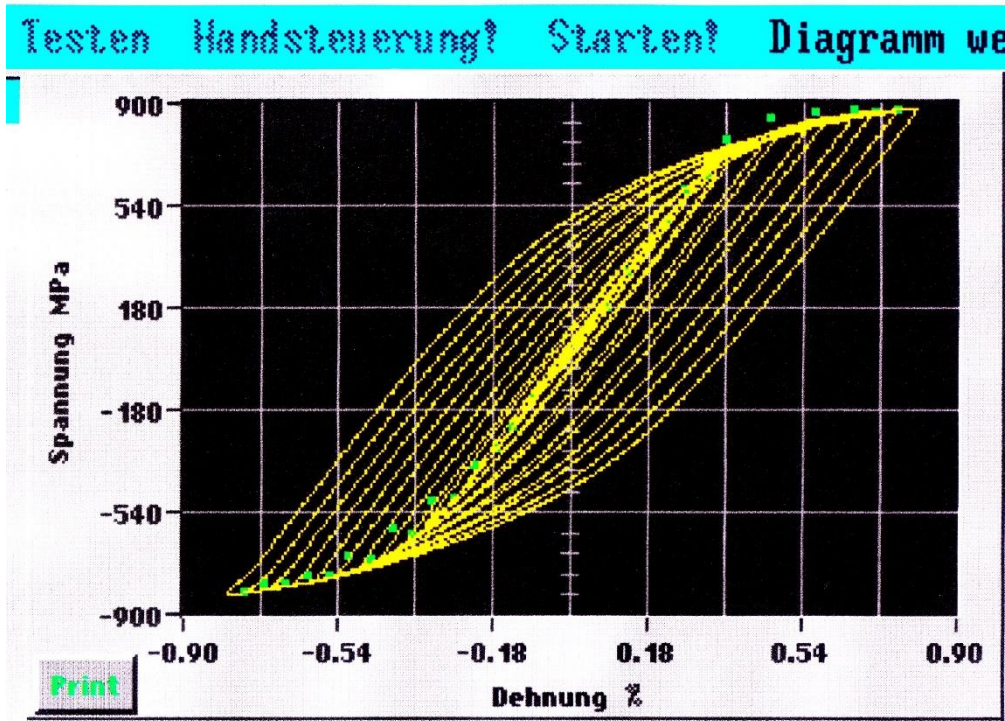


# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung



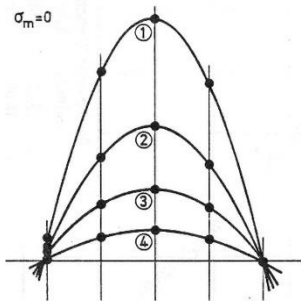
Hysterese, Gesamtdehnung, plastische Dehnungsamplitude



**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

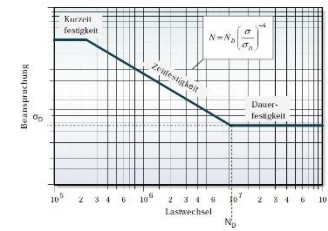
HCF → VHCF  $> 10^{10}$  cy

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

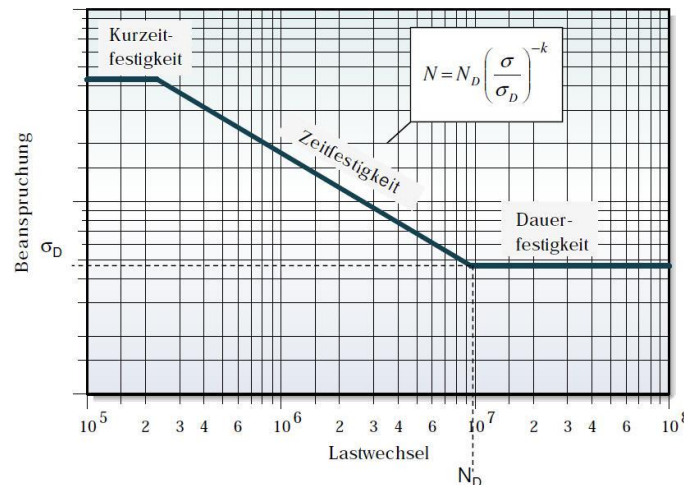
Rohr (Schwingungen): 100 Hz,  $10^{10}$  cycle = 3.2 Jahre

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

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

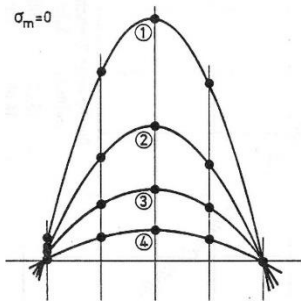


das ist  
nicht  
„ewig“



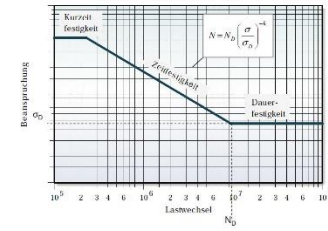
→ VHCF  $> 10^{10}$

$\sigma_m = 0$

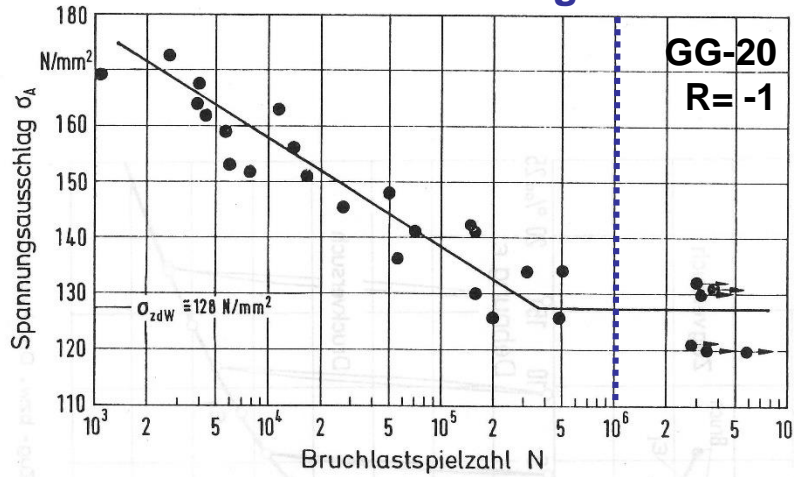


# Quantitative Thermometrie

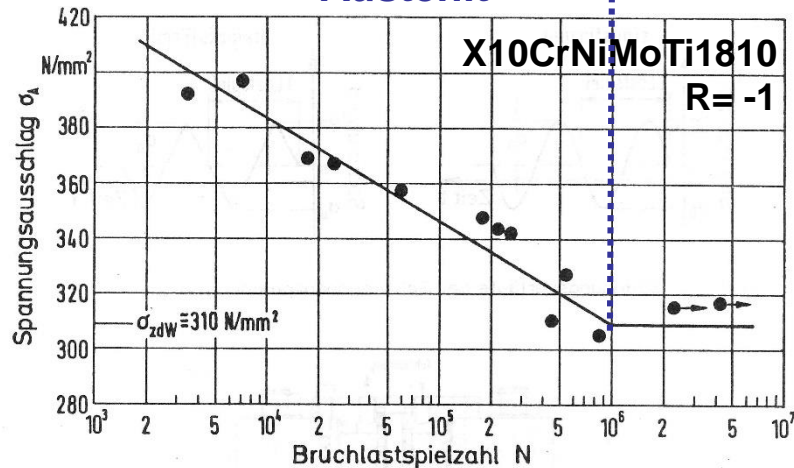
## Dämpfung und Schädigung



### Lamellarer Grauguss



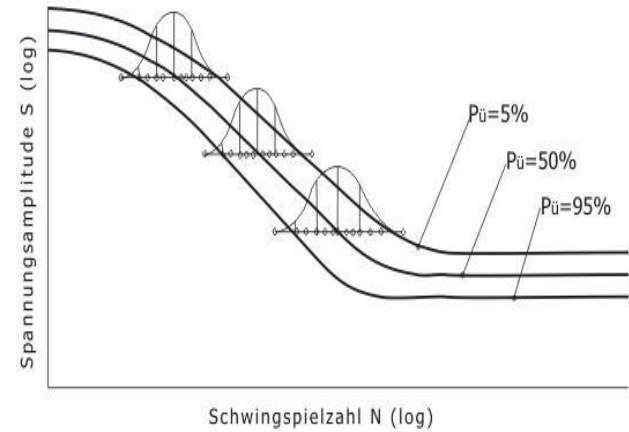
### Austenit



## Ermüdungslebensdauer

## Streuungen

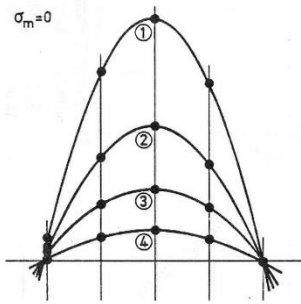
## Statistik



## Ein Mass für die Ermüdungsschädigung?

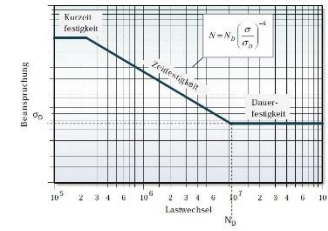
( $\sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $\delta$ ,  $\Omega$ ,  $\lambda$ ,  $E$ )

$\sigma_m = 0$



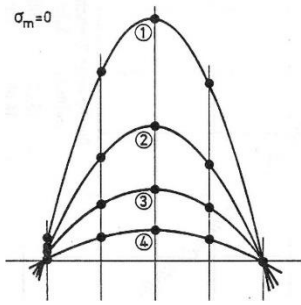
# Quantitative Thermometrie

## 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

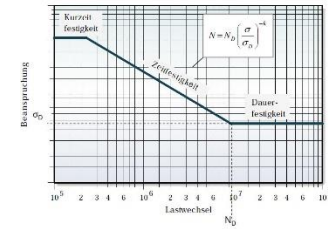
## Dämpfung und Schädigung

### Die quantitative Thermometrie

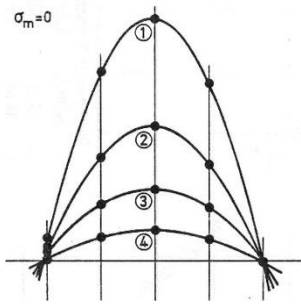
## Methodik

- 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 !!**

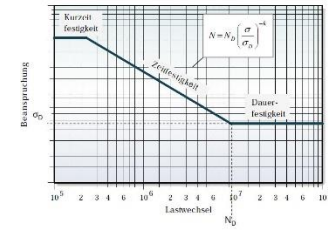


$\sigma_m = 0$



# Quantitative Thermometrie

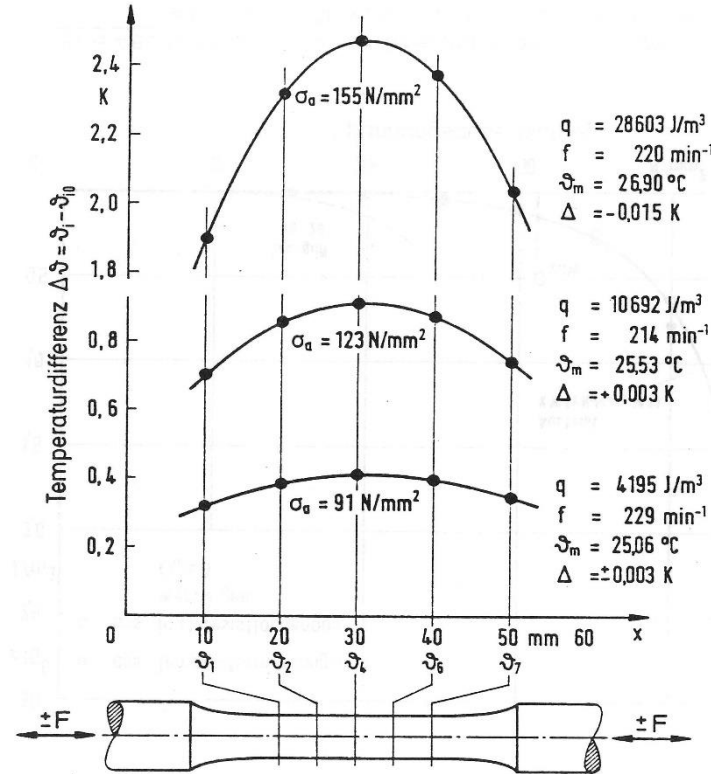
## Dämpfung und Schädigung



### 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)

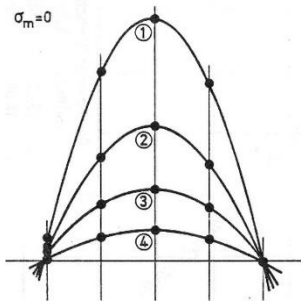
Auflösung  
mit NTC-  
Halbleitern

< 0.001 K = 1 mK



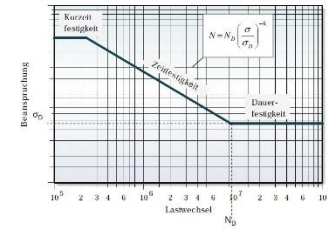
Homogene  
Spannung über  
dem Querschnitt  
und der Messlänge



$\sigma_m = 0$ 

# 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

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

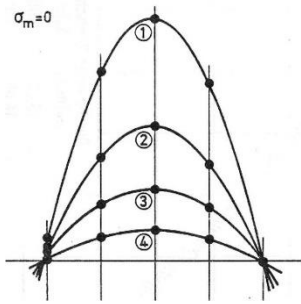
(Weiblen)

4.35

**nur Differenzen !**

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

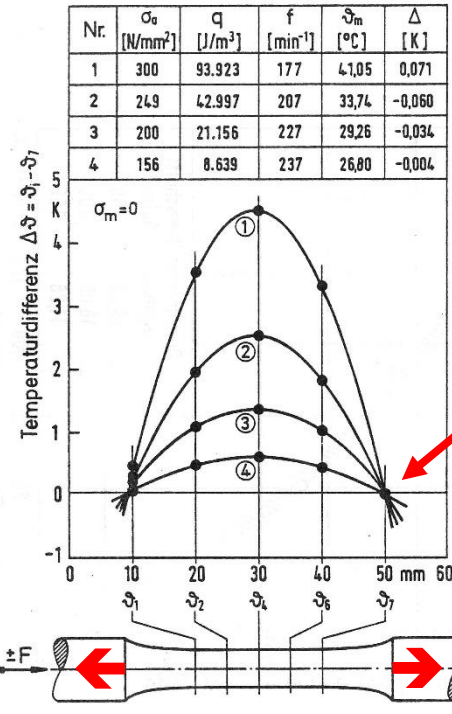
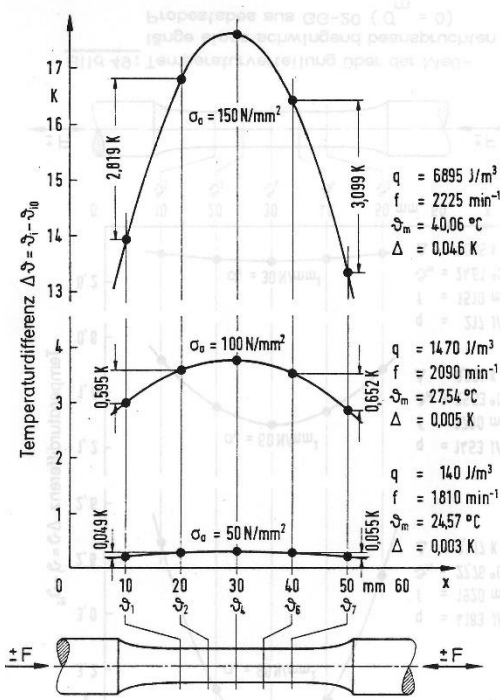
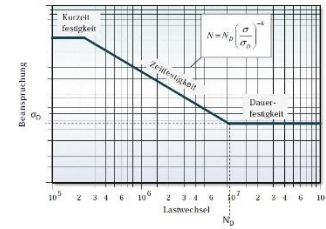
- Mindestens 3 präzise Temperaturmessungen  $\vartheta_i$
- Mindestens 3 genaue Positionsmessungen  $x_i$
- Prüffrequenz  $f$
- Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = f(\vartheta)$
- Homogene Spannungsverteilung in der Messlänge
- Rein axiale Wärmeleitung (radial isolierte Probe)
- Stabile Parabelkrümmung (Messintervall)



# Quantitative Thermometrie

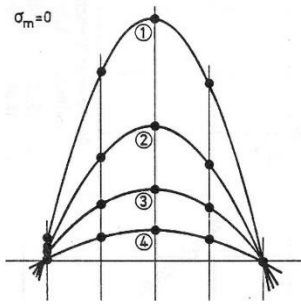
## Dämpfung und Schädigung

### quantitative Thermometrie



z. B. **Bezugs-**  
**punkt**

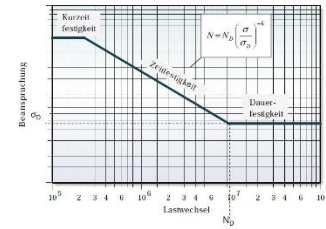
spez. Wärmemenge  $q$  pro Lastspiel ist **unabhängig** von den Randbedingungen!



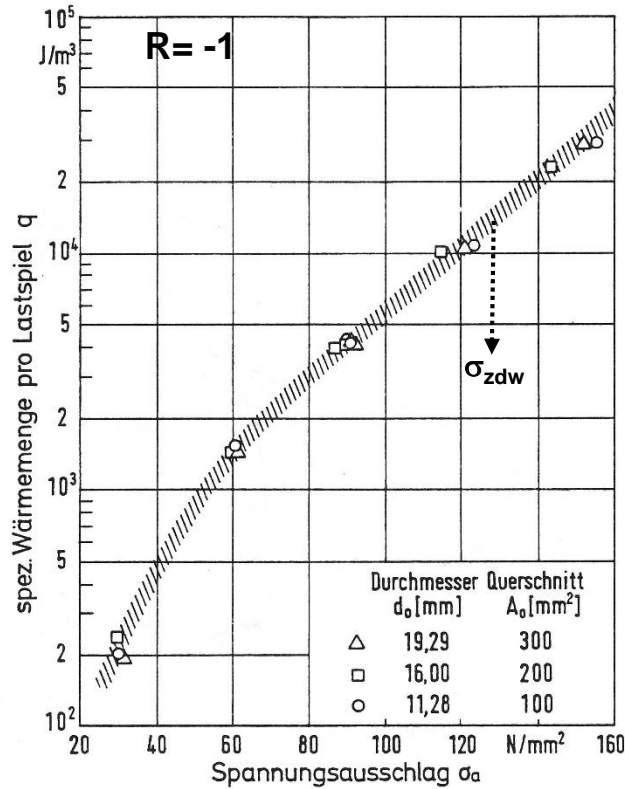
# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

### quantitative Thermometrie

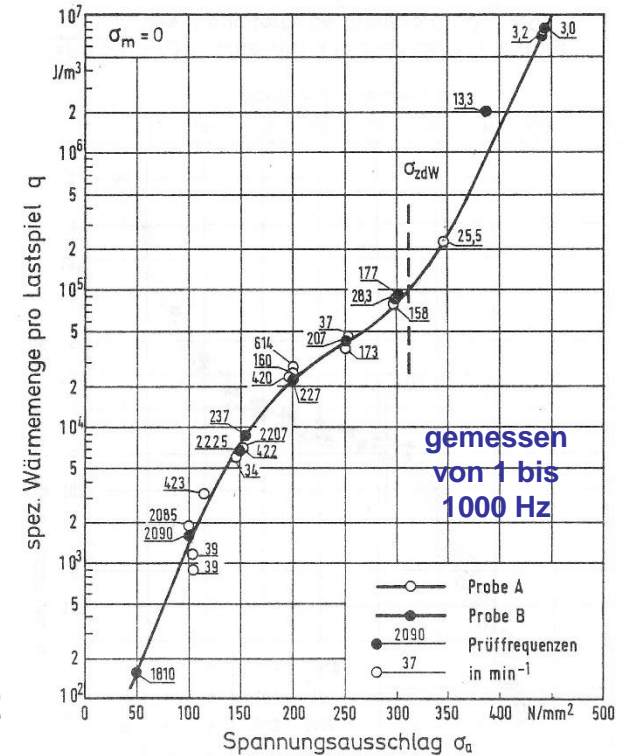


GG-20



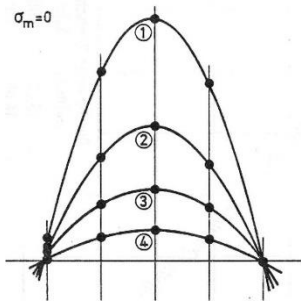
**unabhängig vom Probendurchmesser!**

X10CrNiMoTi1810



**unabhängig von der Prüffrequenz!**

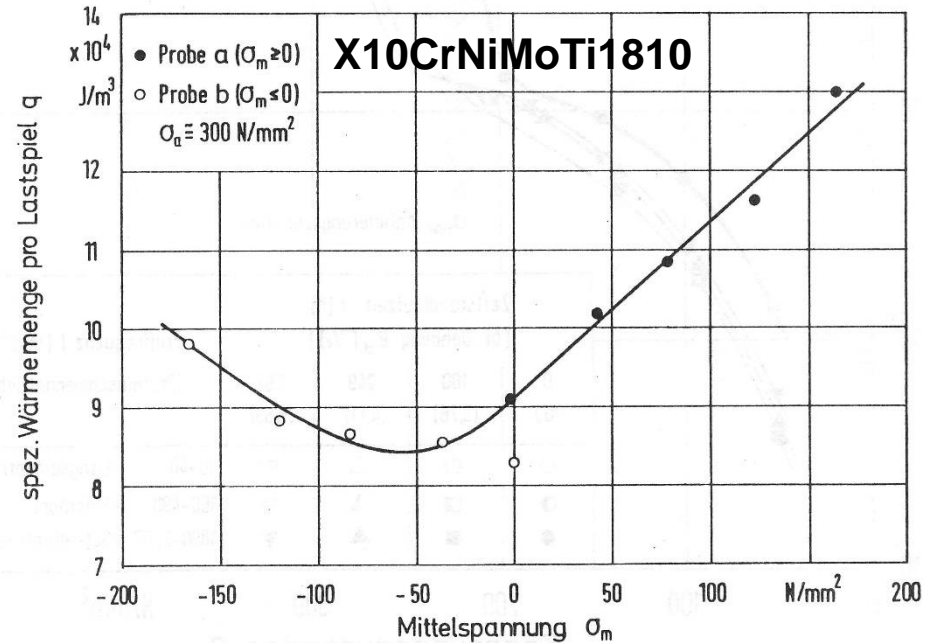
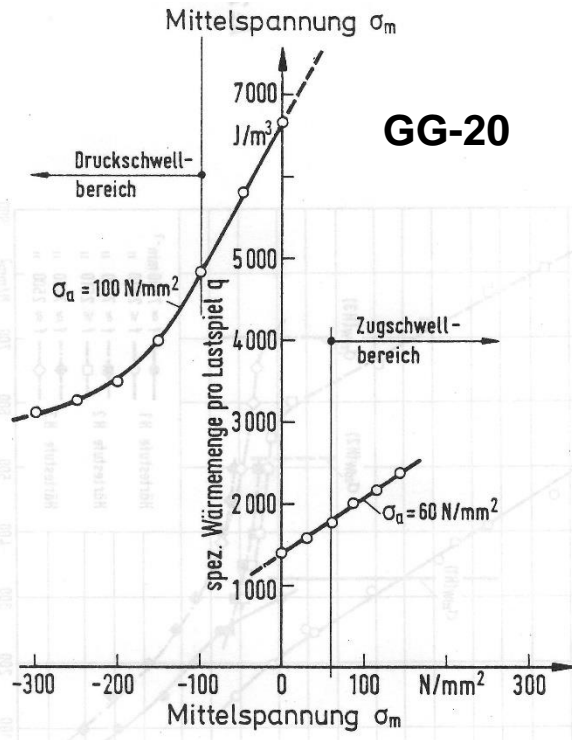
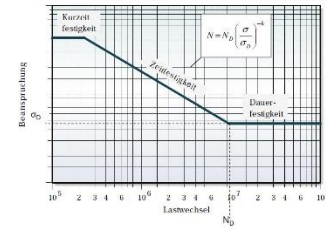
**q**  
[J/m<sup>3</sup> und cy]  
spez. Wärmemenge q pro Lastspiel ist



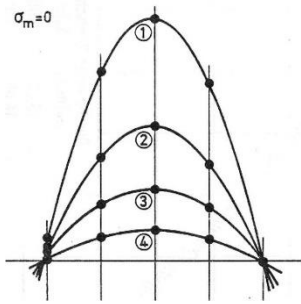
# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

### quantitative Thermometrie



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



# Quantitative Thermometrie

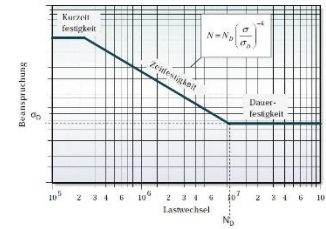
## Dämpfung und Schädigung

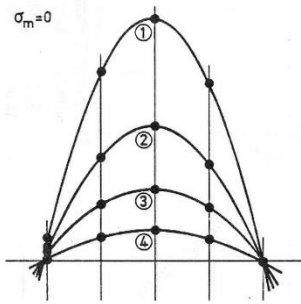
### quantitative Thermometrie

die spezifische Wärmemenge  $q$  pro Lastspiel ist

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

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

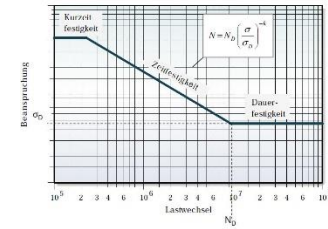


$\sigma_m = 0$ 

# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

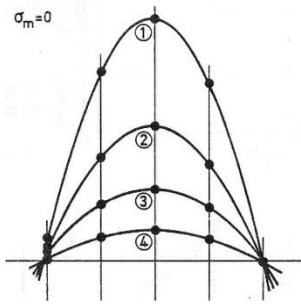
### quantitative Thermometrie



die spezifische Wärmemenge  $q$  pro Lastspiel ist

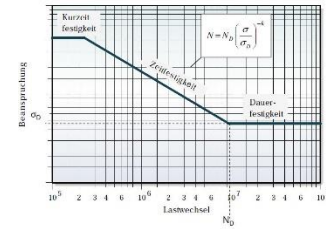
- abhängig von der Mittelspannung ✓
  - abhängig von der Spannungsfolge (Reihenfolge) ✓
  - abhängig von plastischen Vorverformungen ✓
  - abhängig von Kriechvorbelastungen ✓
- s.a. Einflüsse auf Dauerfestigkeit

→ Eignung zur Charakterisierung von Werkstoffzuständen!



# Quantitative Thermometrie

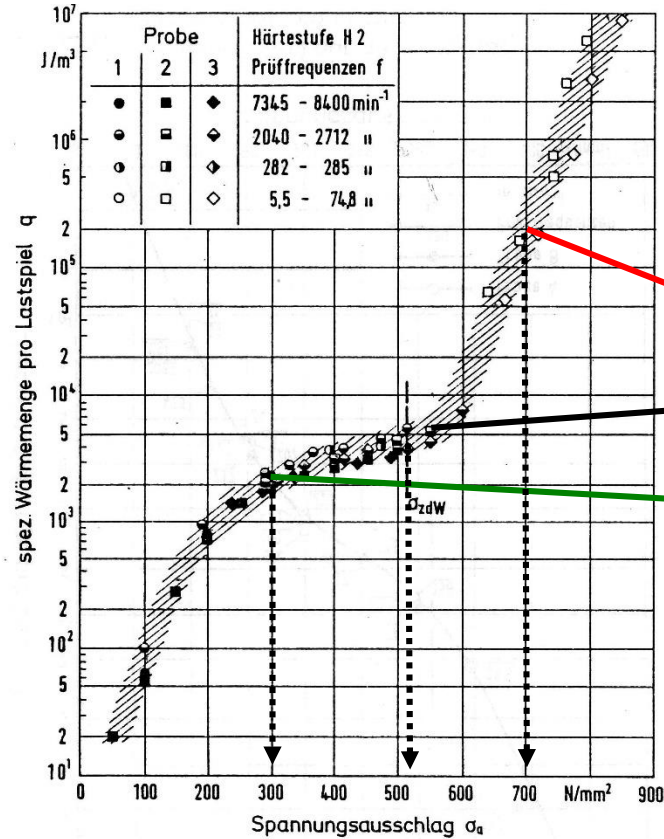
## Dämpfung und Schädigung



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

Dehnungsschwingbreite

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



LCF und Zeitfestigkeit

HCF und Übergangsgebiet

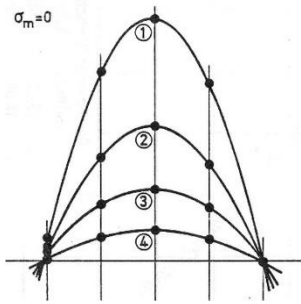
VHCF bis „Unendlich“

quantitative  
Thermometrie

6 Dekaden von  $q$  (J/m<sup>3</sup>)

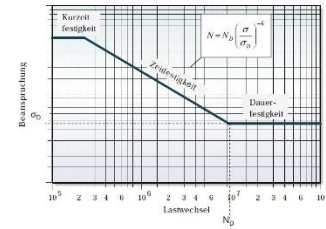
s. Spannungsbereich 50 – 700 MPa

34CrNiMo6 (H2)



# Quantitative Thermometrie

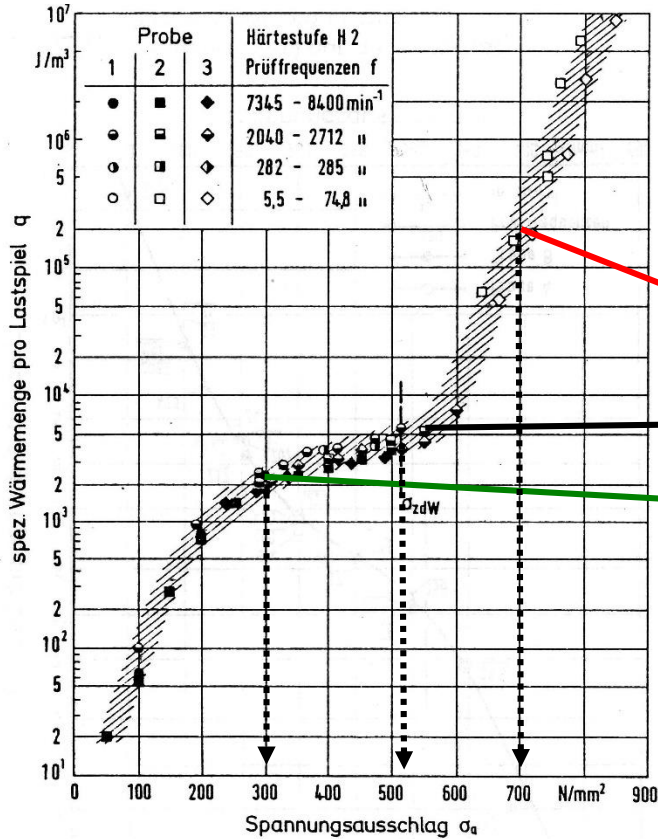
## Dämpfung und Schädigung



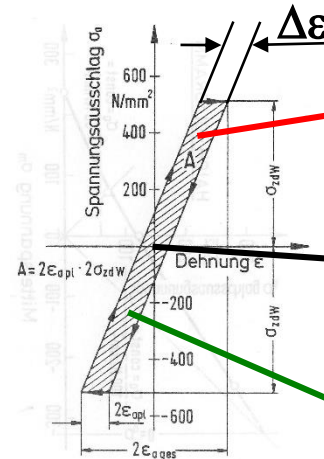
Hysteresese-Fläche  $A = q \approx \Delta\sigma * \Delta\varepsilon$

plast. Dehnungsschwingbreite

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



34CrNiMo6 (H2)



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

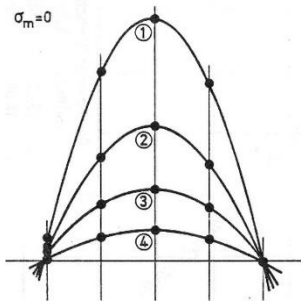
$\Delta\varepsilon = 4.9 \cdot 10^{-6} = 0.0049 \text{ ‰}$  **HCF**  
(makro-elastisch)

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

Was ist Schädigung?

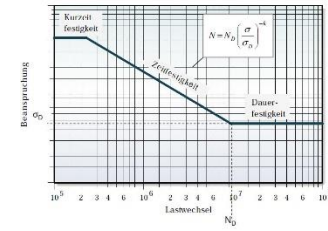


$\sigma_m = 0$



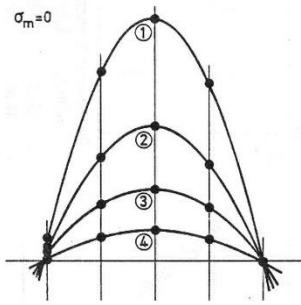
# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung



## Gliederung

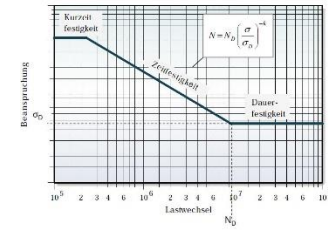
1. Werkstoff und Gefüge
2. Ermüdung LCF-HCF-VHCF
3. Quantitative Thermometrie
4. Energie-Hypothese (Schädigung und Schädigungsmass)
5. Messtechnik
6. Ausblick
7. Ihre Fragen, meine Fragen
8. Upgrade

$\sigma_m = 0$ 

# Quantitative Thermometrie

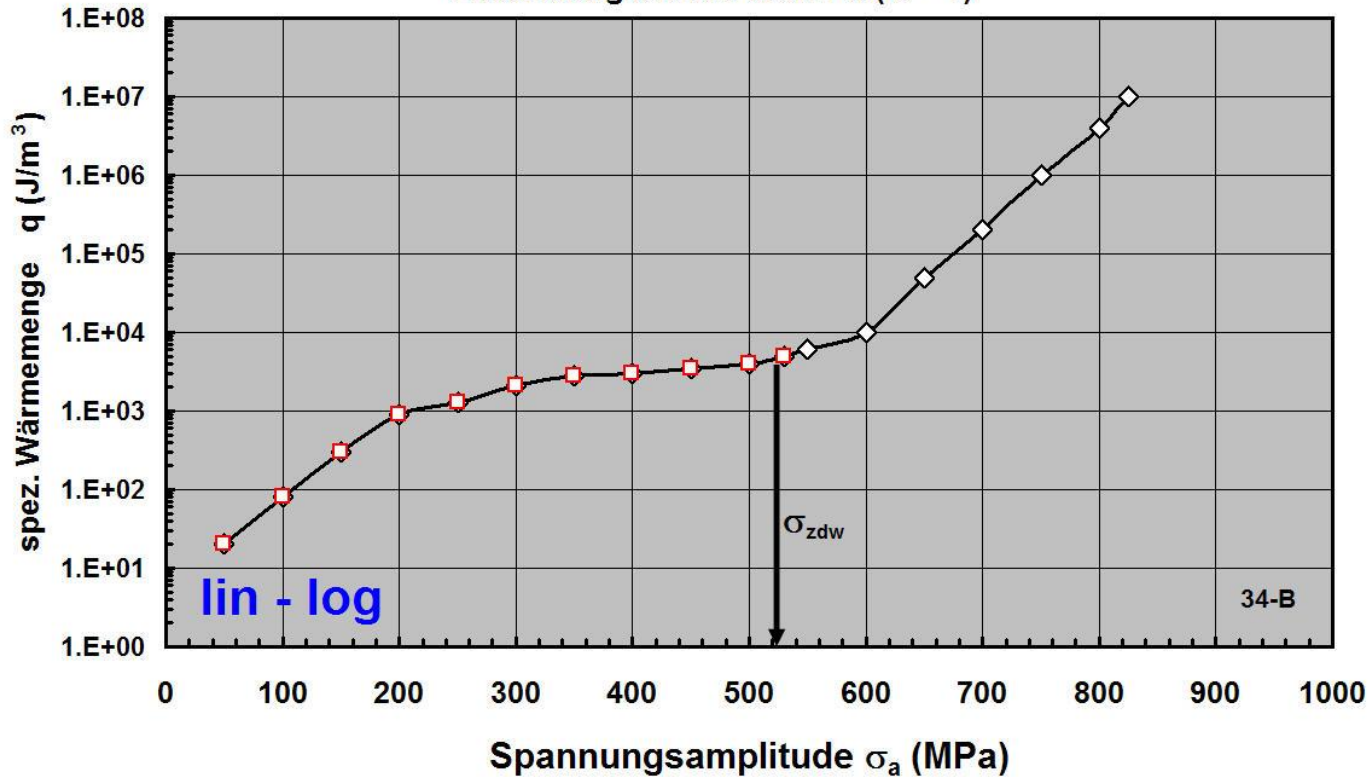
## Dämpfung und Schädigung

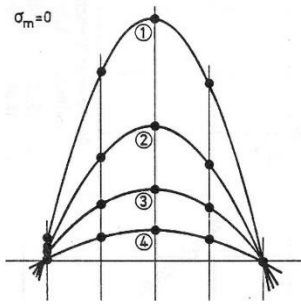
### quantitative Thermometrie



### 34CrNiMo6 (H2)

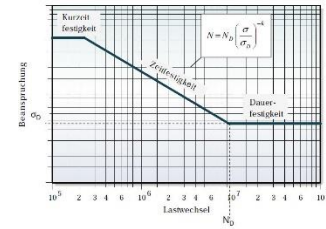
Dauerfestigkeit 510-530MPa (R= -1)





# Quantitative Thermometrie

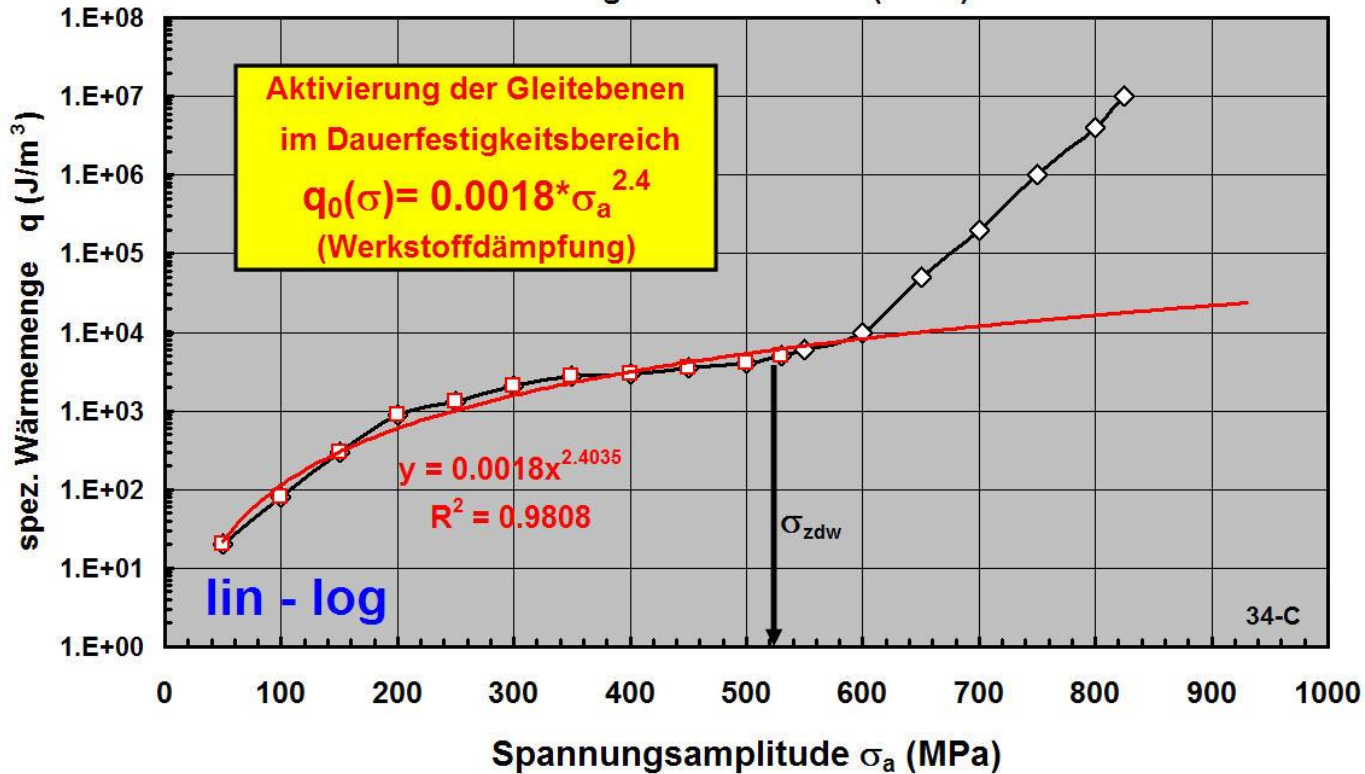
## Dämpfung und Schädigung

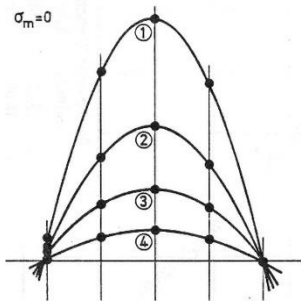


### quantitative Thermometrie

34CrNiMo6 (H2)

Dauerfestigkeit 510-530MPa (R= -1)

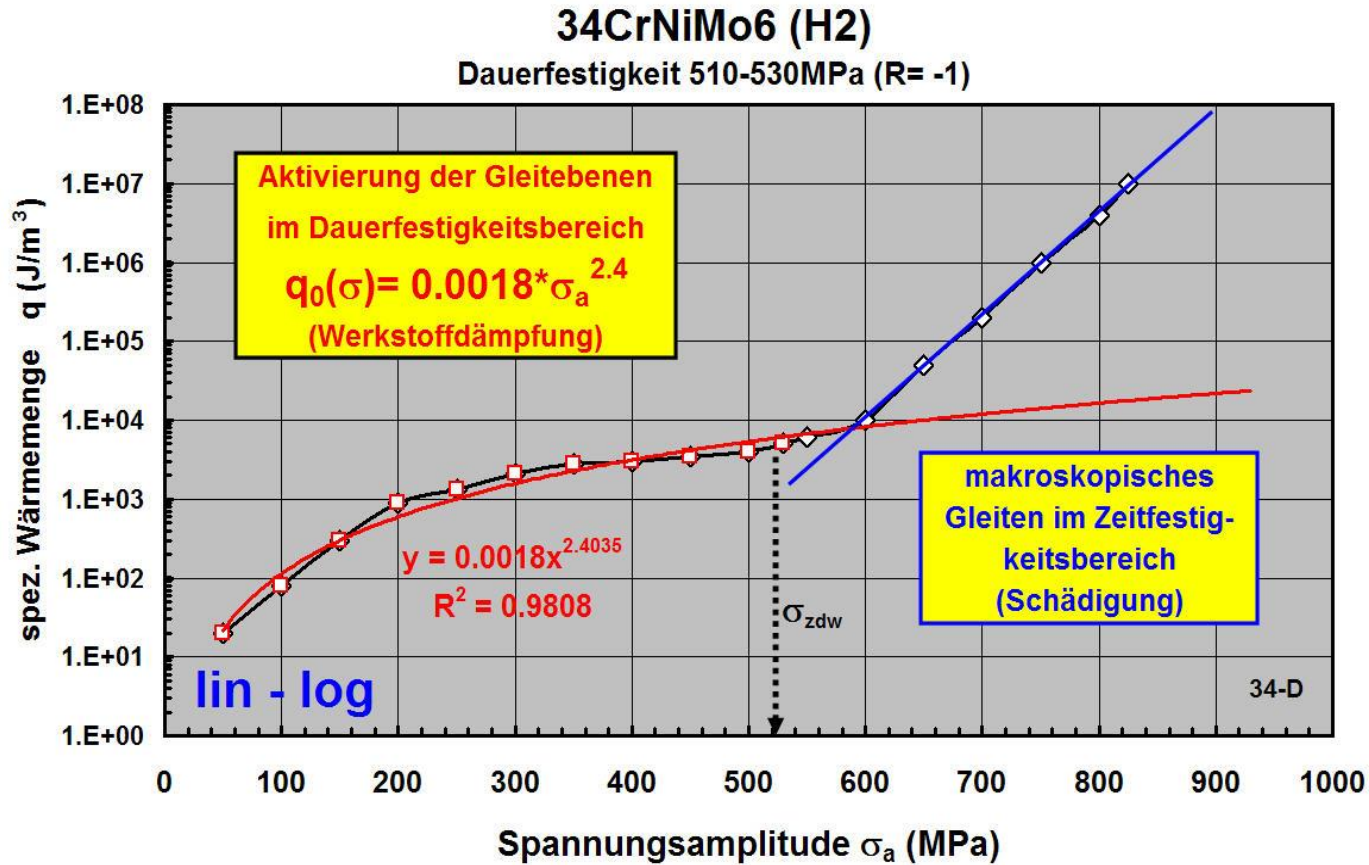
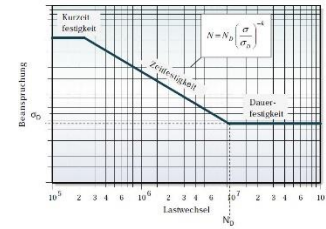


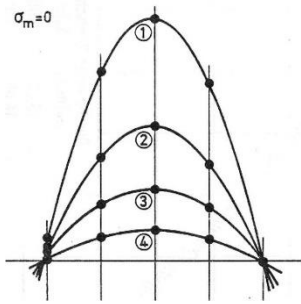
$\sigma_m = 0$ 

# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

### quantitative Thermometrie

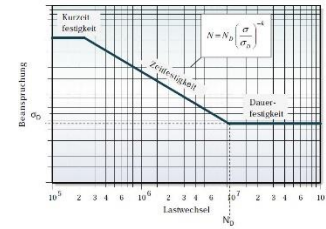


$\sigma_m = 0$ 

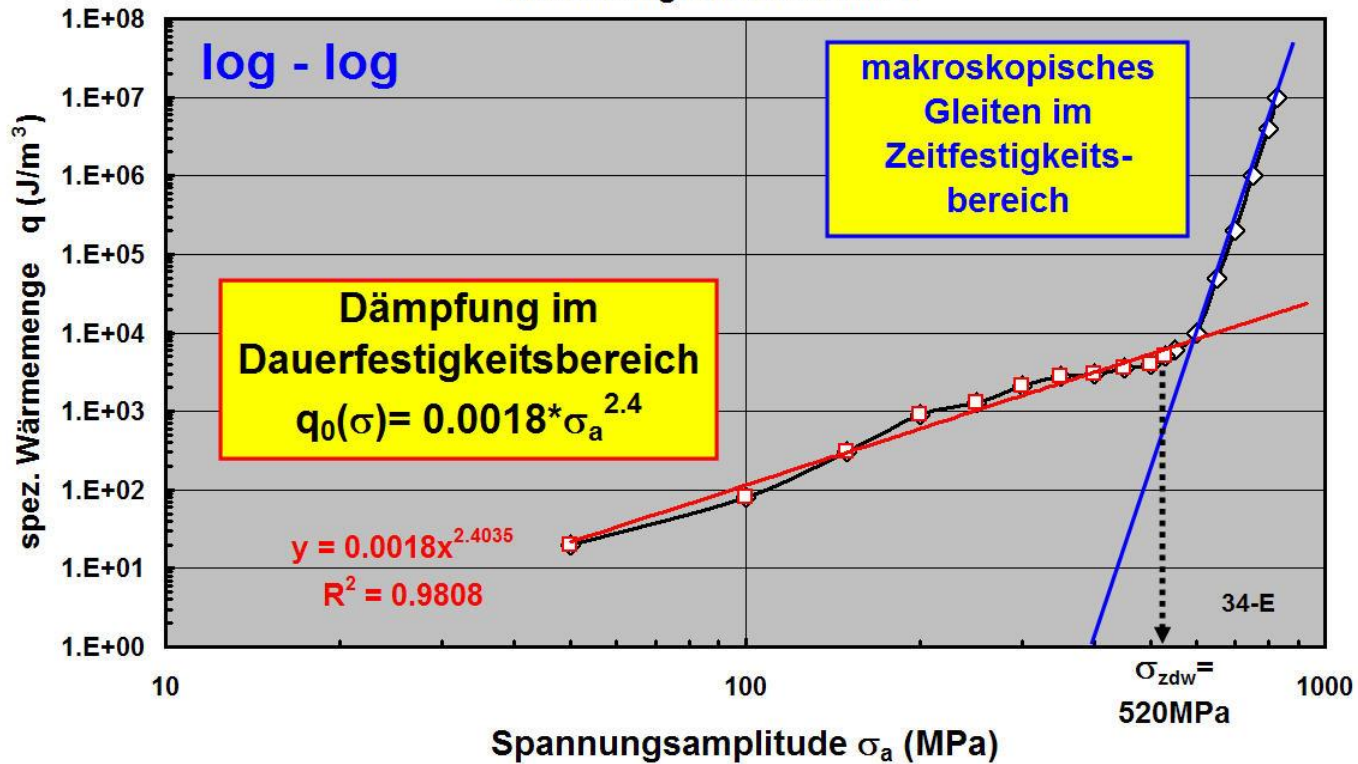
# Quantitative Thermometrie

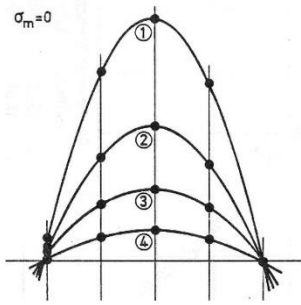
## Dämpfung und Schädigung

### quantitative Thermometrie



34CrNiMo6 (H2)  
Dauerfestigkeit 510-530MPa

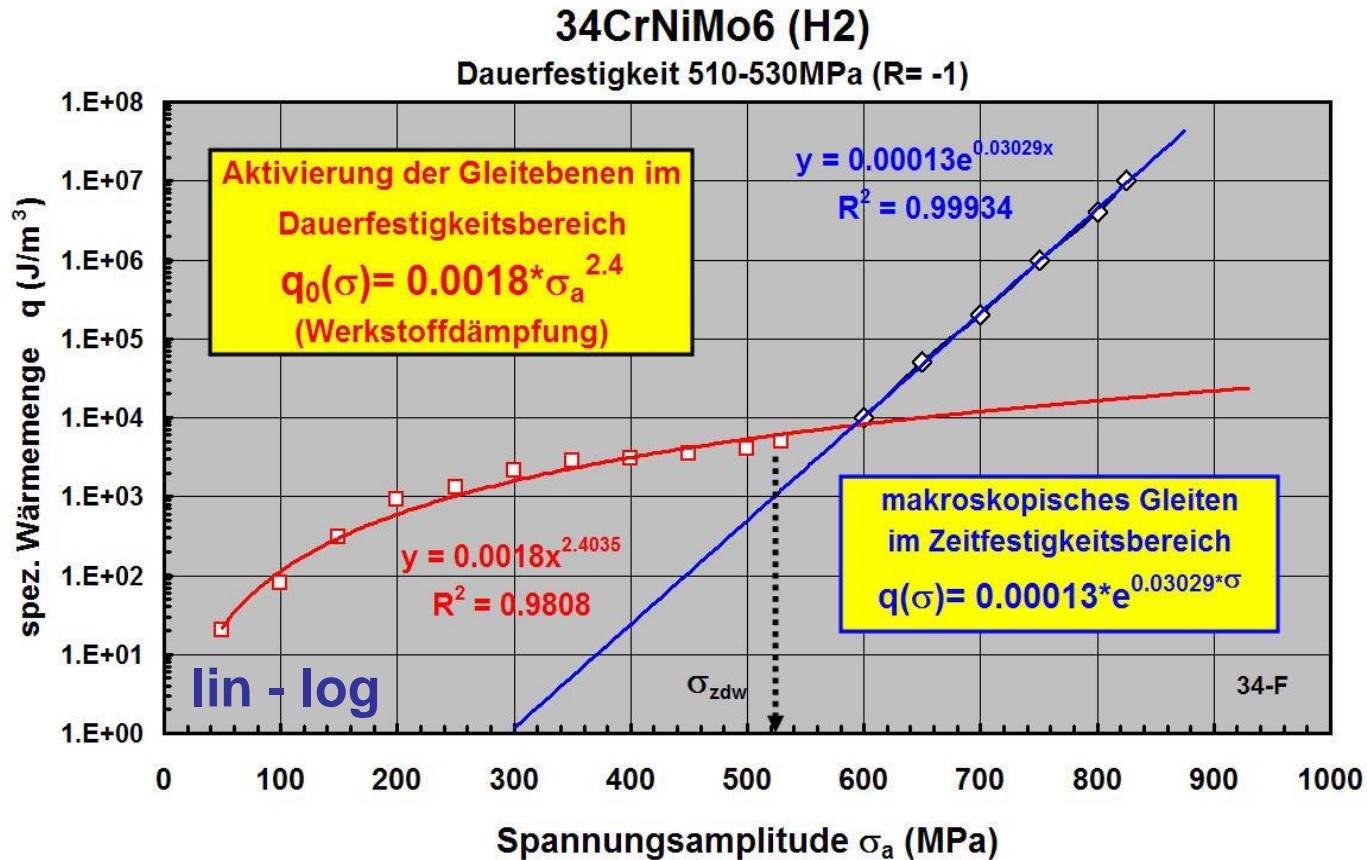
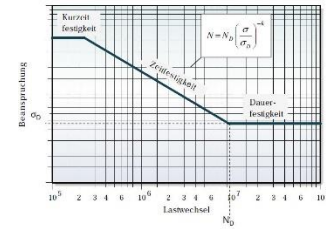


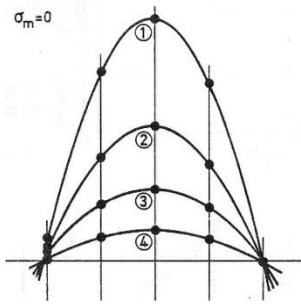
$\sigma_m = 0$ 

# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

### quantitative Thermometrie

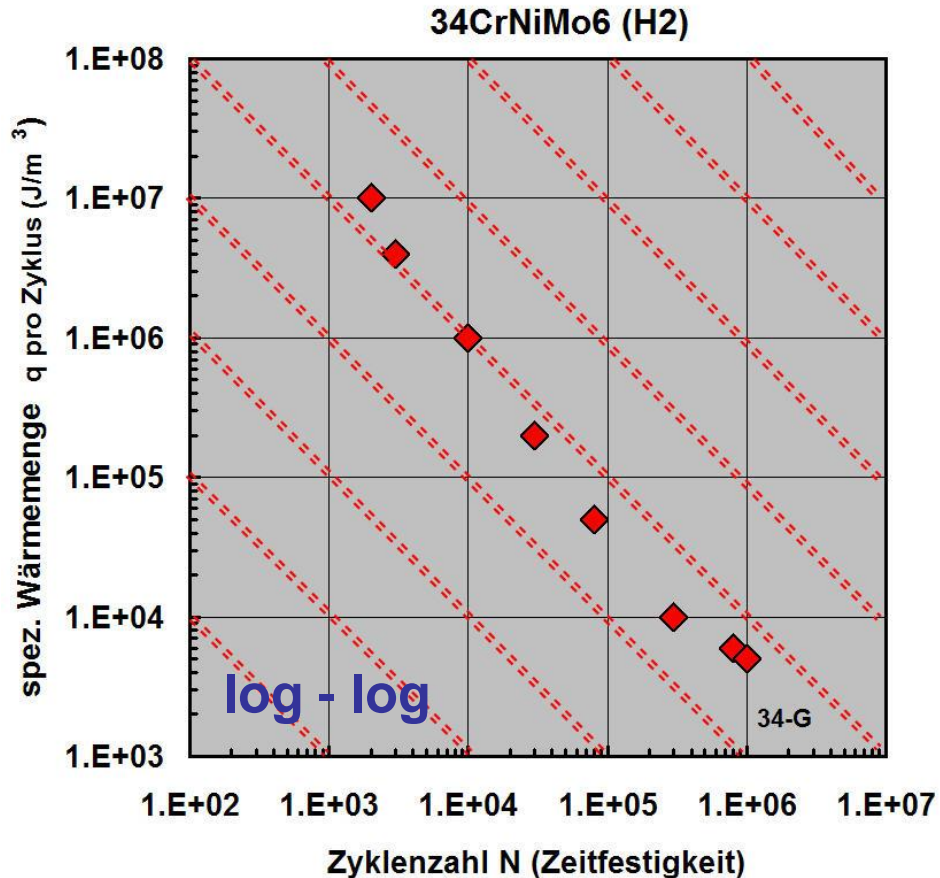
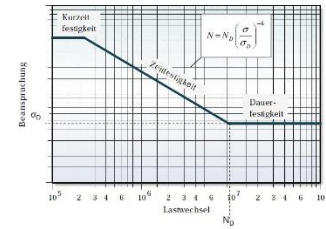




# Quantitative Thermometrie

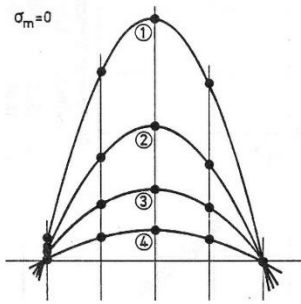
## Dämpfung und Schädigung

### quantitative Thermometrie



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

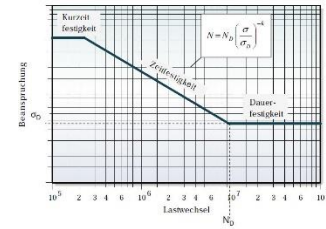
(Näherung aus  
 Stufenversuchen)

$\sigma_m = 0$ 

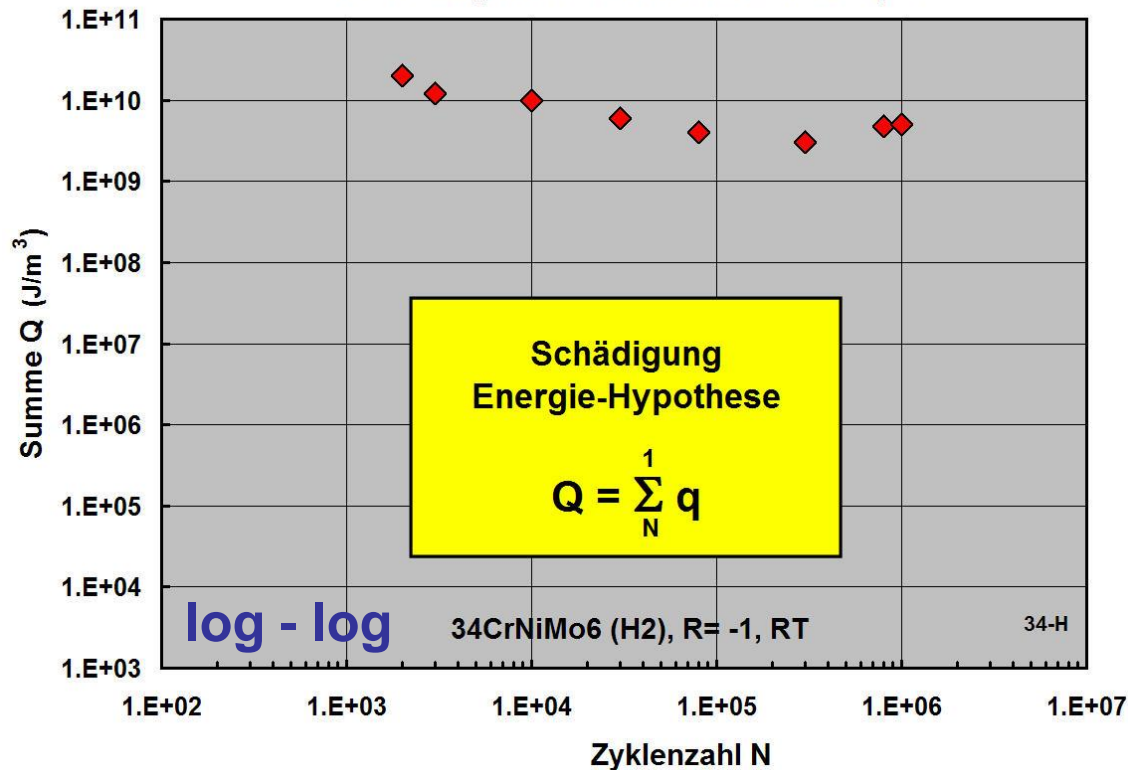
# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

### quantitative Thermometrie



Näherung aus Stufenversuch  $Q = q \cdot N$



Wieviel Gesamt-  
Wärmeentwicklung

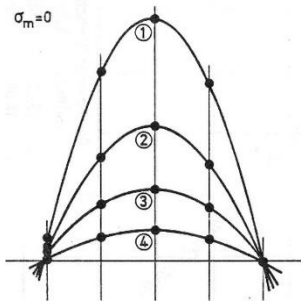
$Q_{ges}$

bei welcher Anriss-  
Lebensdauer?

(Näherung aus  
Stufenversuchen)

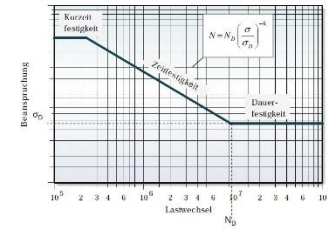


$\sigma_m = 0$



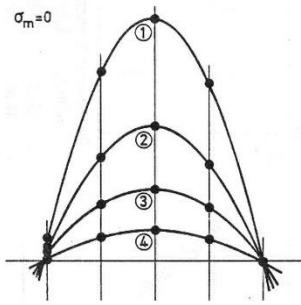
# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung



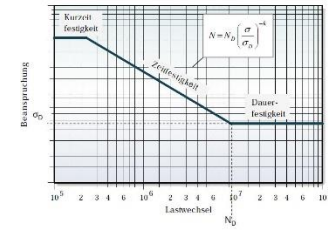
## Gliederung

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

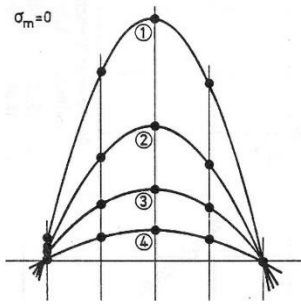
## Temperatur-Messfühler

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)

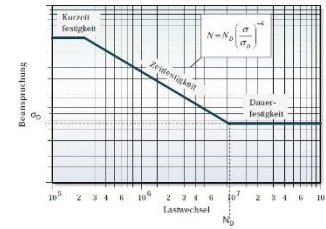
## Beste Anwendung abhängig von:

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

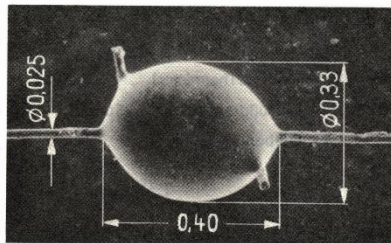


# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung



# Temperatur-Messtechnik

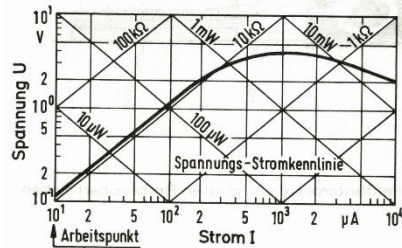


Heißleiter K 19,  
Typ K 19/10 %/12 k $\Omega$   
(goldbedampft,  
REM-Aufnahme)

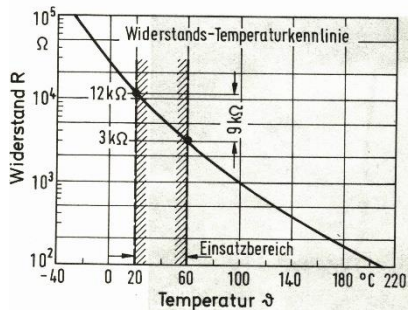
## Heißleiter-Miniatur- Widerstandsfühler 12 k $\Omega$

Konstantstrom 10-20  $\mu$ A

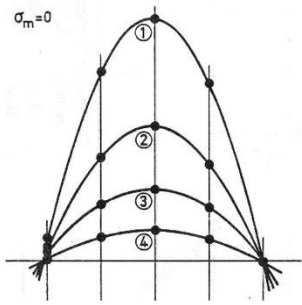
(Präzisions-Stromquelle  
Digistant-Burster)



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  $25^{\circ}\text{C}$  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

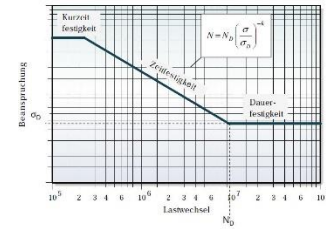


$\sigma_m = 0$



# 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 Heißleiter (Thermistor)
- 5 Anschlußdraht (Platin  $\varnothing 25 \mu\text{m}$ )
- 6 Klebeband

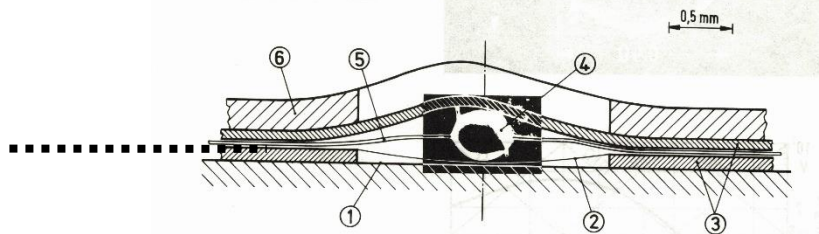


Bild 23: Applikationsaufbau der Heißleiterperle auf glatten Probenoberflächen

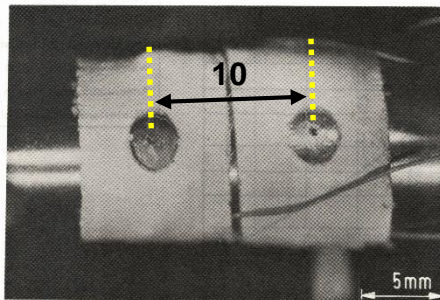
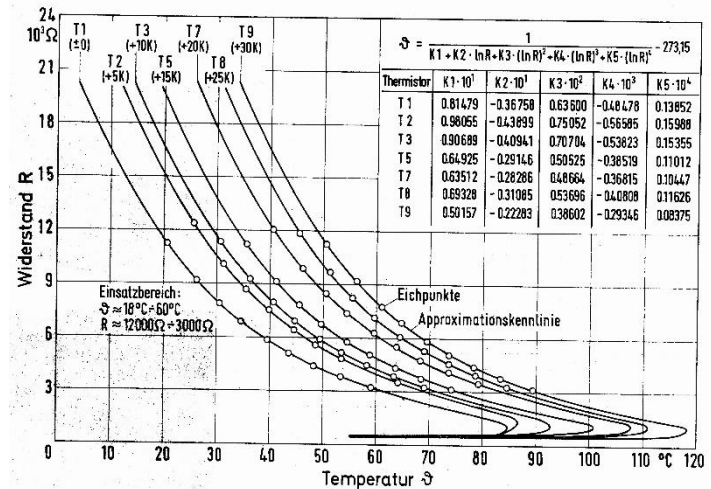


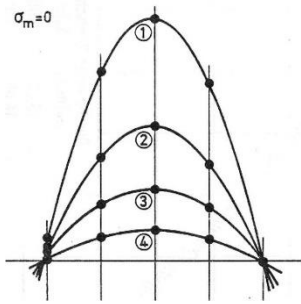
Bild 24: Zwei applizierte Thermistor-temperaturfühler auf einer glatten Probe

## Heissleiter-Miniatur-Widerstandsfühler

Kennlinie  $(\ln R)^4$

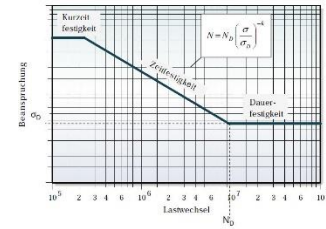


$\sigma_m = 0$



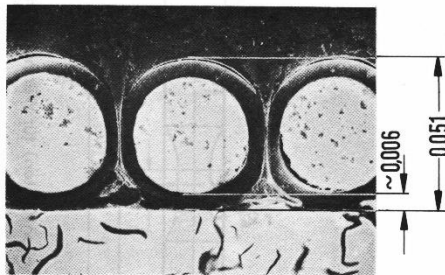
# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung



# Temperatur-Messtechnik

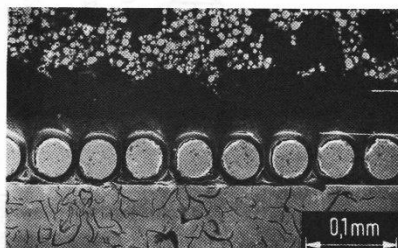
Durchmesser $d = 0,05 \pm 0,055 \text{ mm}$	Streckgrenze $\sigma_{0,2} = 140 \text{ N/mm}^2$
Isolierung: Vielschichtverfahren, Polyurethan, mod.	Zugfestigkeit $\sigma_B = 300 \text{ N/mm}^2$
Grenztemperatur $\vartheta_G = 130^\circ\text{C}$	E-Modul $E = 125.000 \text{ N/mm}^2$
Löttemperatur $\vartheta_L \approx 350^\circ\text{C}$	Bruchdehnung $\delta_S \approx 18 \%$
	Biegeradius $r \approx d = 0,05 \text{ mm}$



Querschliff, goldbedampft (Aufnahme Rasterelektronenmikroskop, REM)

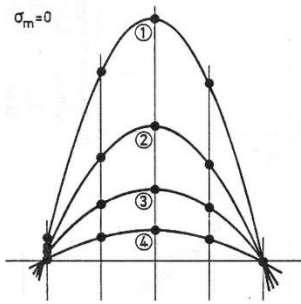
## Kupfer-Lackdraht-Widerstandsfühler (Dehnungsmessbrücke)

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



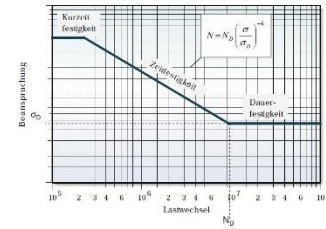
Einbettmittel  
Abdeck- und Fixierlack  
Kupfermeßwicklung  
Grauguß GG 20

$\sigma_m = 0$

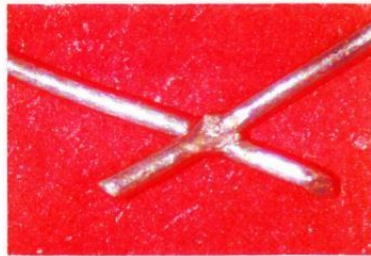


# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung



## Temperatur-Messtechnik

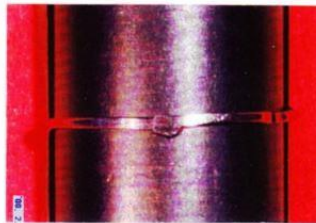


step 1

capacitor  
discharge  
welding



step 2  
cutting

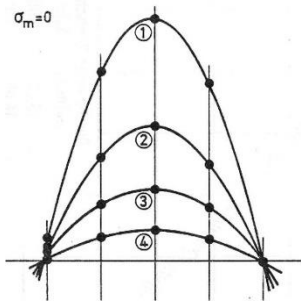


step 3  
forging

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

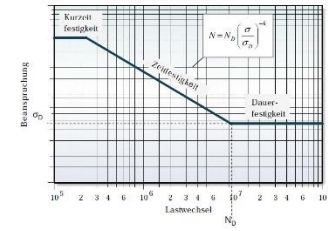
## Empfehlungen für Thermometrie:

- 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

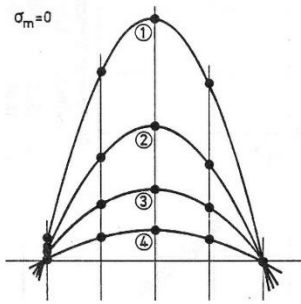
### 1979:

- 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

$\sigma_m = 0$

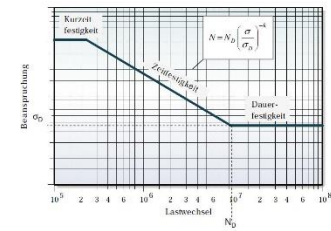


# Quantitative Thermometrie

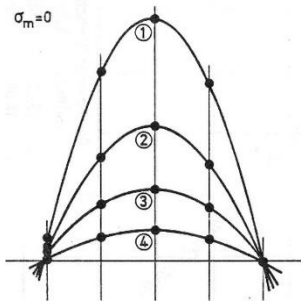
## Dämpfung und Schädigung

### 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

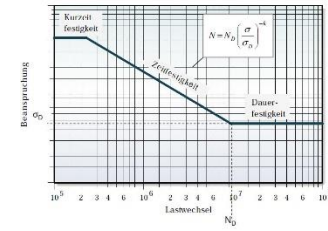




$\sigma_m = 0$ 

# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

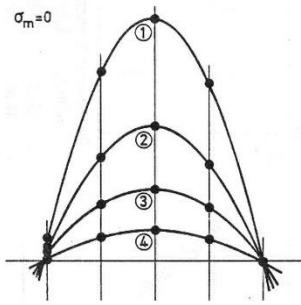


## Ausblick

## interessante Anwendungen

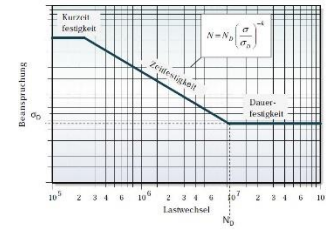
- Einkristalle, gerichtet erstarrte Legierungen
- Mikro- und nano-kristalline Werkstoffe
- Mikrolegierte Werkstoffe
- SLM - Werkstoffe (selective 3D laser manufacturing)
- CFK (Kohlenstofffaser verstärkte Kunststoffe)
- FE - Gefüge-Simulation
- Einfluss des Mehrachsigkeitsgrades (Volumeneffekt)
- Reihenfolgeefflüsse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

$\sigma_m = 0$

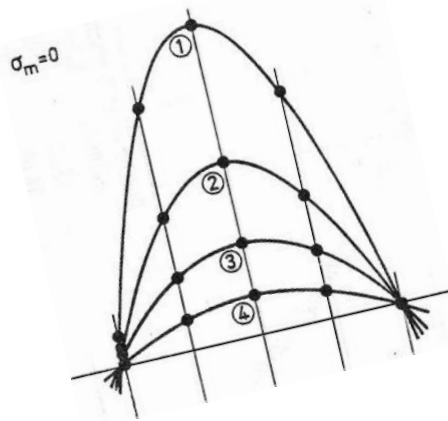


# Quantitative Thermometrie

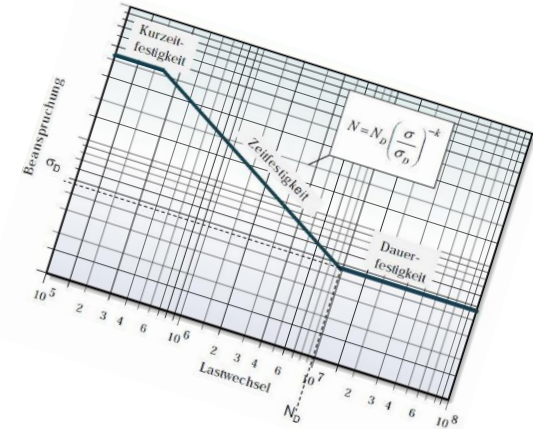
## Dämpfung und Schädigung



Vielen Dank!



Fragen?  
Anregungen?  
Beiträge?

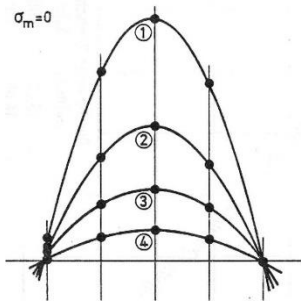


Nun sind Sie dran !!

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

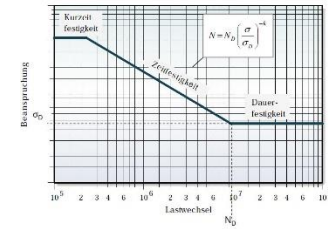
klaus.staerk@swissonline.ch  
www.staerk-erdwaerme.ch

$\sigma_m = 0$



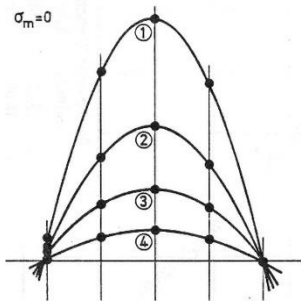
# Quantitative Thermometrie

## 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

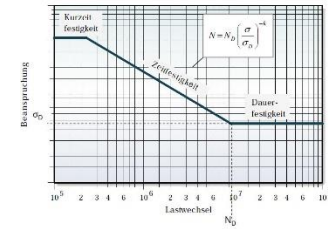
## Dämpfung und Schädigung

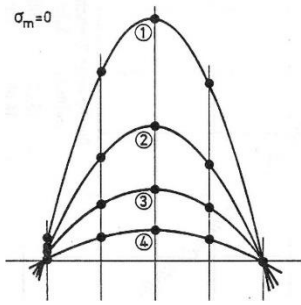
### quantitative Thermometrie

## 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?

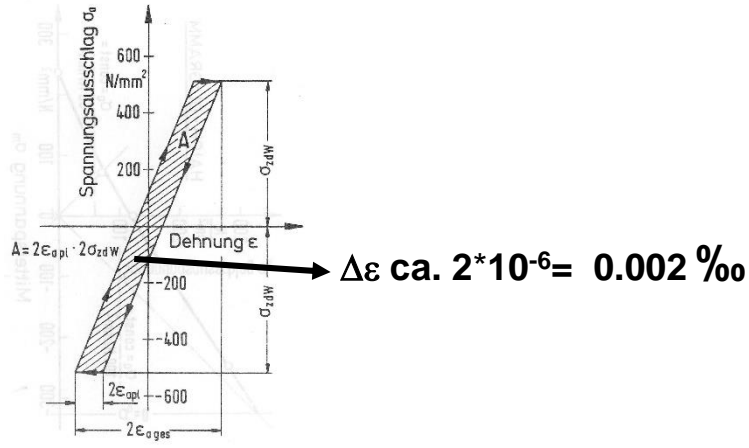
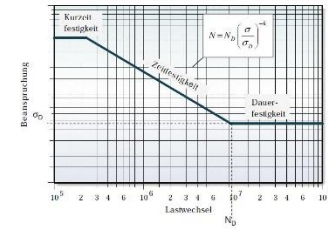


$\sigma_m = 0$ 

# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

### Ihre Fragen, meine Fragen



## HCF/VHCF

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

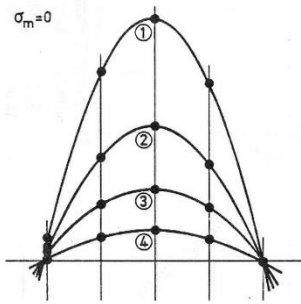
Dehnungsschwingbreite

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

Ist die spez. Formänderungsarbeit von ca. 1-5 kJ/m<sup>3</sup> ein typischer Grenzwert bei ferritischen Werkstoffen für Ermüdungsschädigung?

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

$\sigma_m = 0$

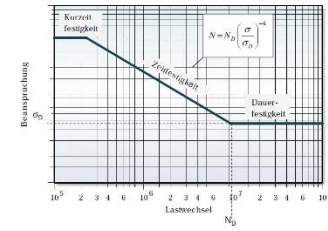


# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie

Ihre Fragen, meine Fragen

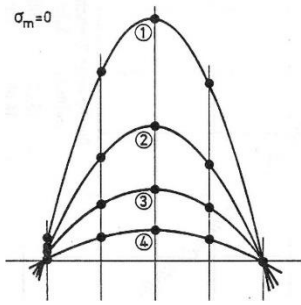


Gibt es eine Dauerfestigkeit und einen threshold-Wert?

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?

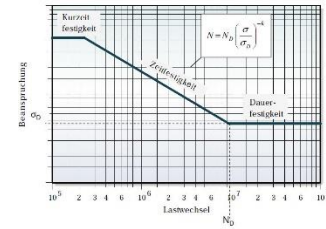
$\sigma_m = 0$ 

# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

quantitative Thermometrie

Ihre Fragen, meine Fragen



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

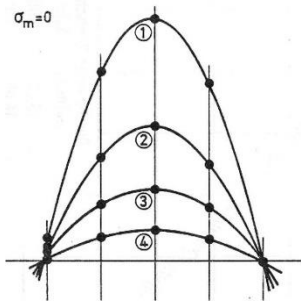
Gibt es eine  
Schädigungssumme

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

für Anriss?

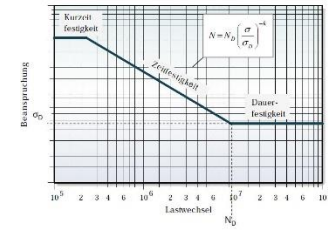
Kann man aus der Wärmeentwicklung  $q$  auf eine  
Vorschädigung schliessen?

$\sigma_m = 0$



# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

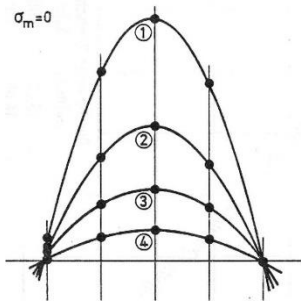


## Gliederung

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



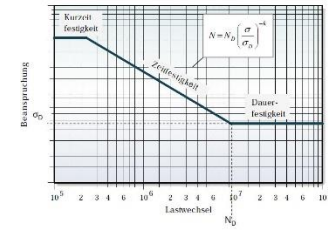
$\sigma_m = 0$



# Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Schädigung

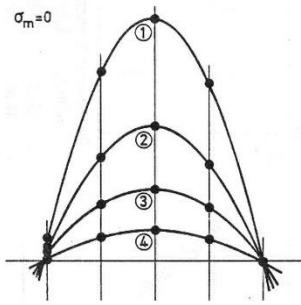
quantitative Thermometrie



# Upgrade

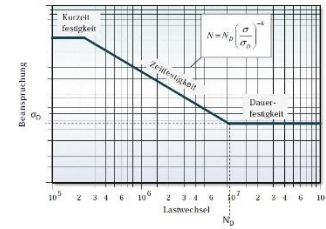
**Ermüdungsrisswachstum  
und  
diverse thermometrische  
Messungen**

$\sigma_m = 0$

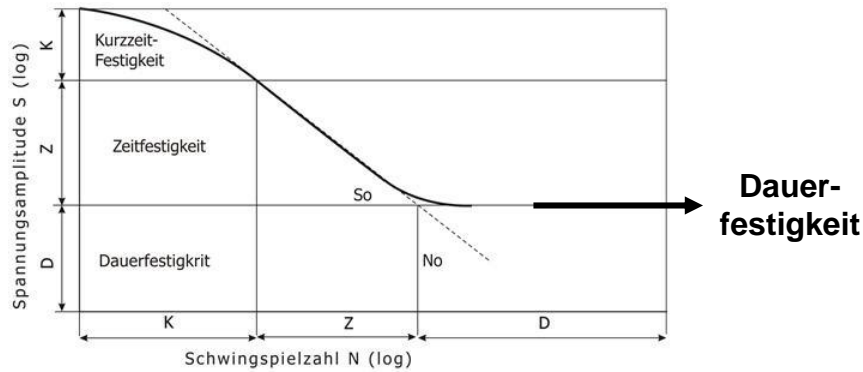


# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

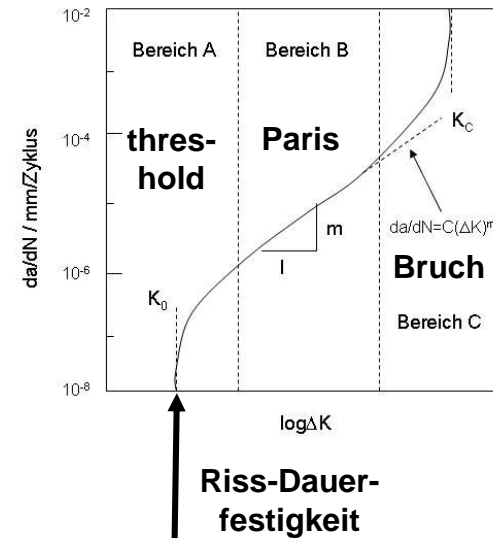


### Ermüdung

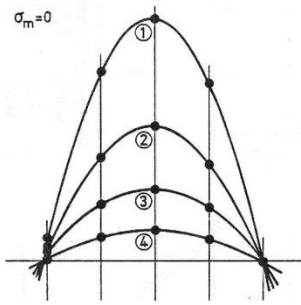


### Schwingfestigkeit

### Risswachstum



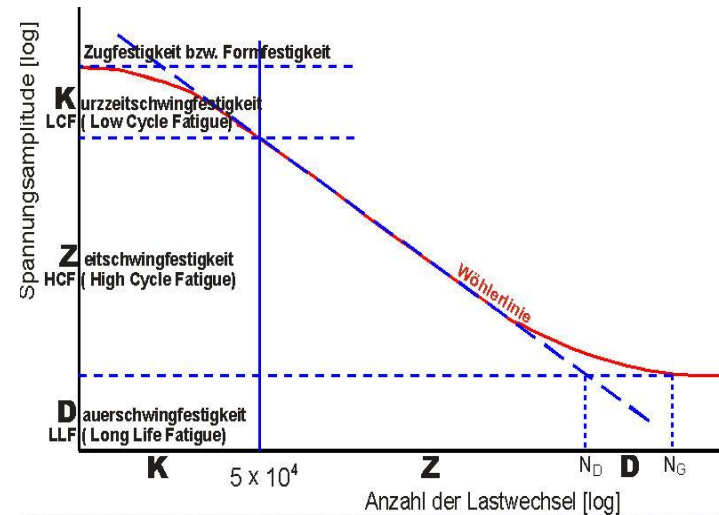
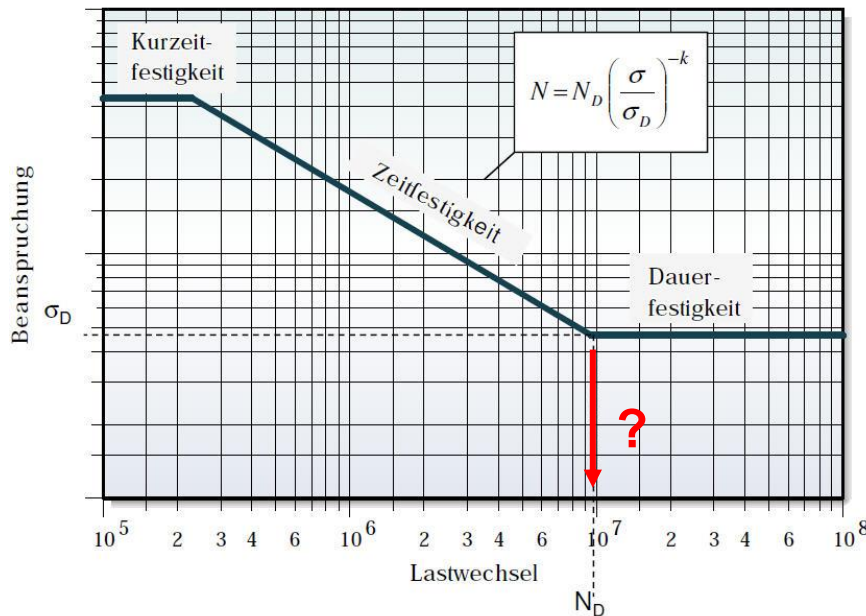
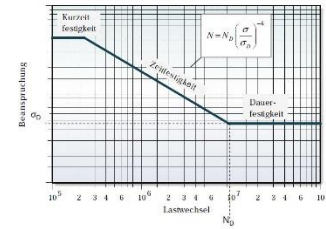
### Bruchmechanik

$\sigma_m = 0$ 

# Quantitative Thermometrie

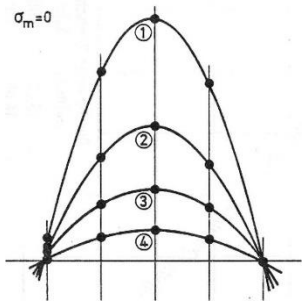
## Dämpfung und Schädigung

### Wöhlerlinie, Dauerfestigkeit?



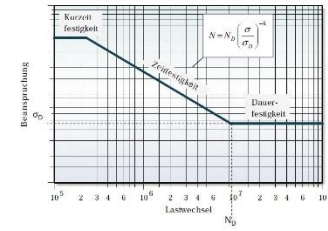
- Gibt es eine Dauerfestigkeit?
- Bei wieviel Lastwechseln ist der Übergang zeit-dauerfest?
- Ist der Übergang werkstoffabhängig?

$\sigma_m = 0$

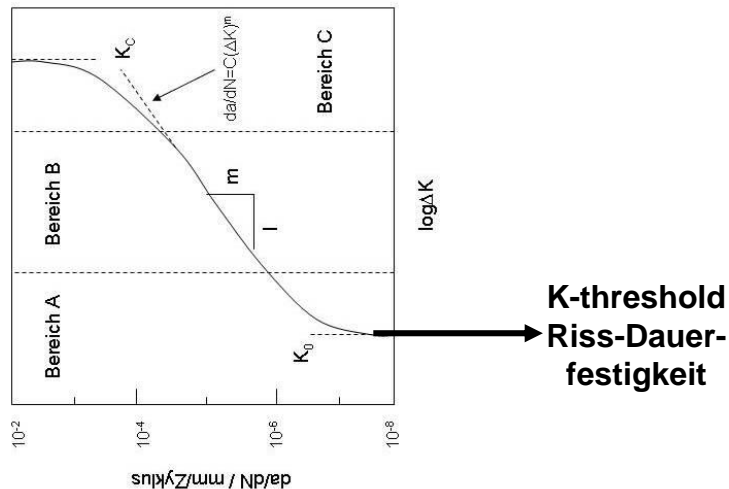
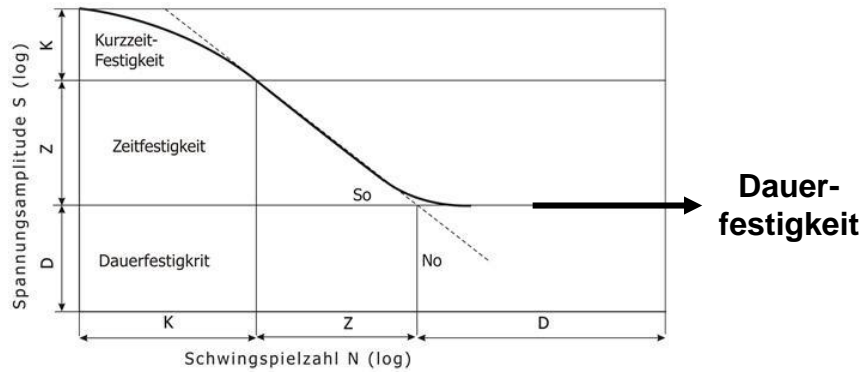


# Quantitative Thermometrie

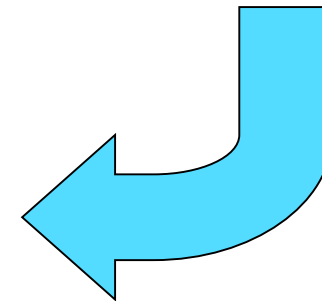
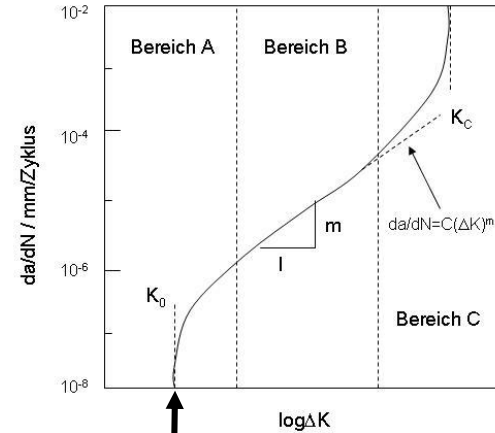
## Dämpfung und Schädigung



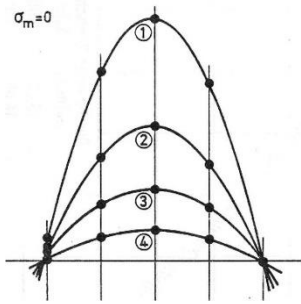
### Ermüdung



### Risswachstum



$\sigma_m = 0$

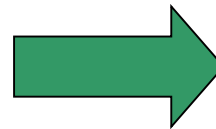
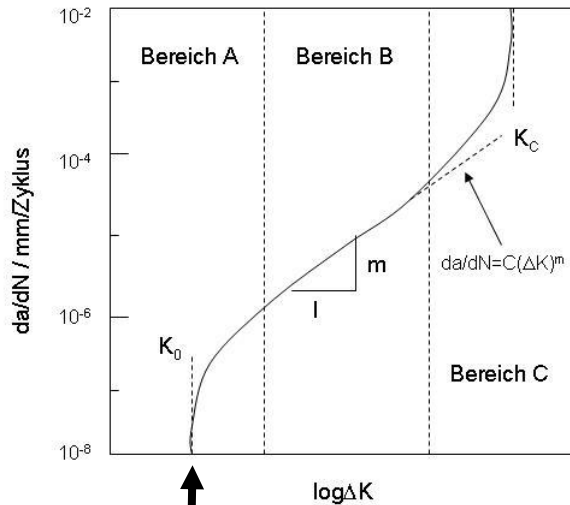
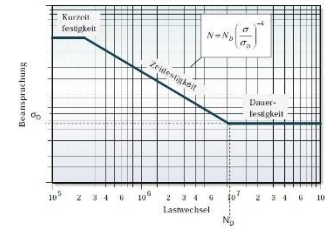


# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

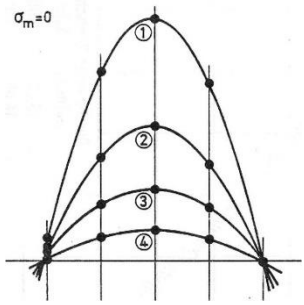
threshold Riss-Stopp

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



„Riss-Dauerfestigkeit“

„Oberflächenriss“

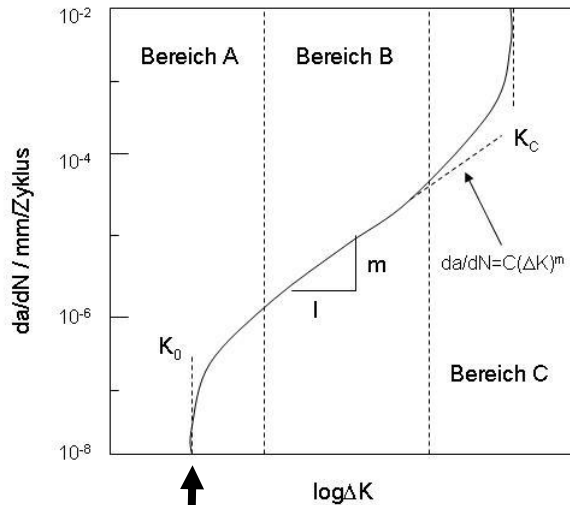
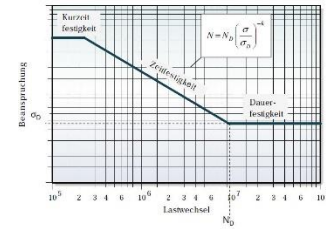


# Quantitative Thermometrie

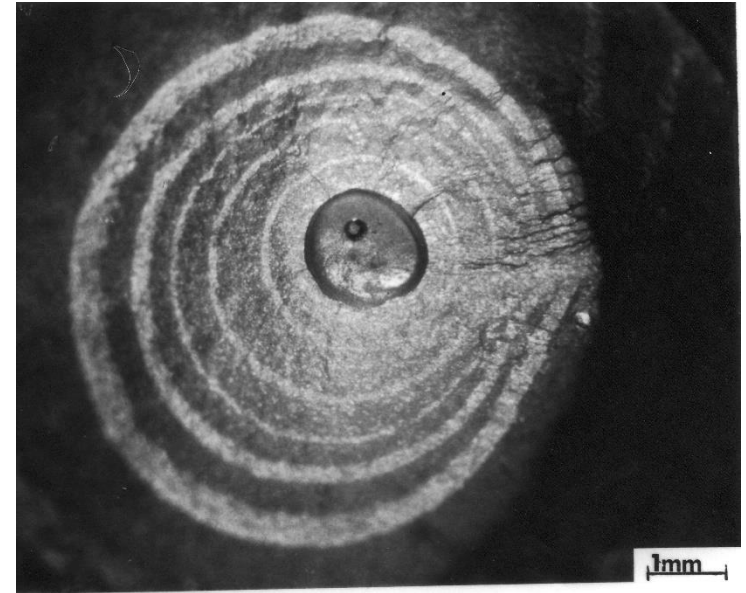
## Dämpfung und Schädigung

threshold Riss-Stopp

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

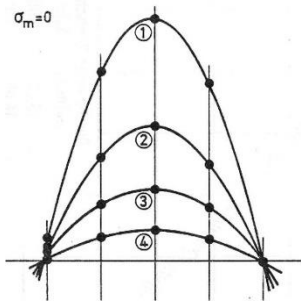


Riss-Dauerfestigkeit



„innenliegender Fehler“

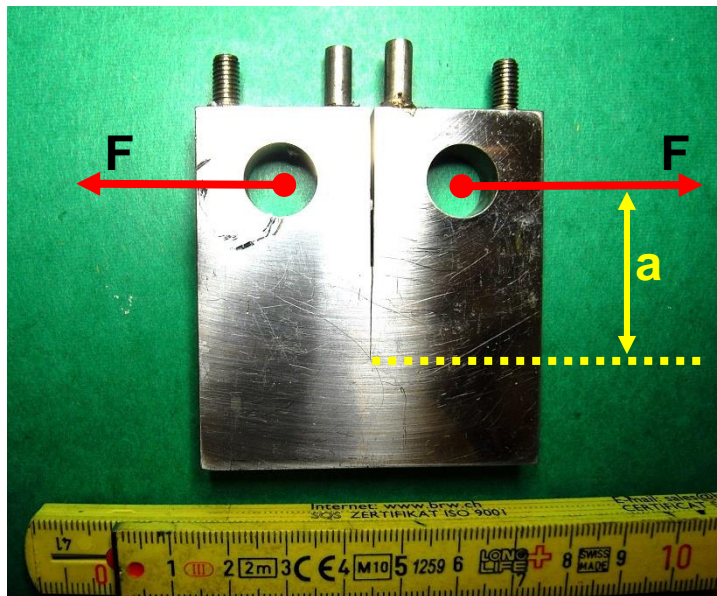
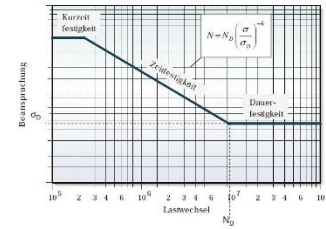
HCF-Blöcke mit beach marks an Schweisspore

$\sigma_m = 0$ 

# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

### Ermüdungsrisswachstum im VHCF (threshold)



→ Innenliegende Fehlstelle  
(Riss) unter Ermüdung  
(Abschätzung)

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

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

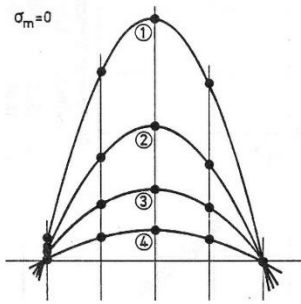
→ Fehlerdurchmesser  
 $2a \approx 16 \mu m$

#### Beispiel:

Werkstoff 12%-Cr-Stahl

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

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

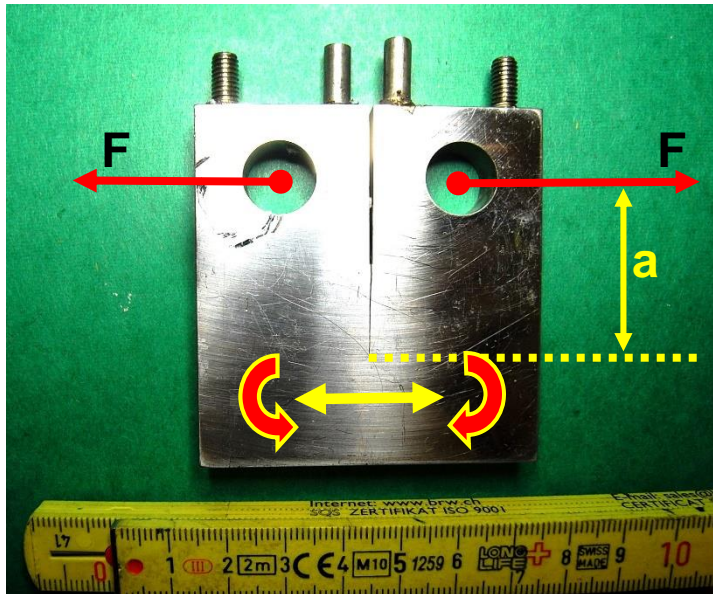
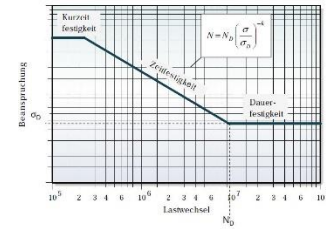
$\sigma_m = 0$ 

# 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 $\sqrt{m}$

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

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

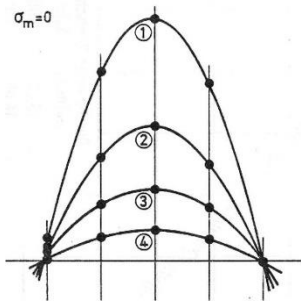
$$\Delta \sigma_n = 4.8 \text{ MPa} + 35.9 \text{ MPa} = 40.7 \text{ MPa}$$

### Kerb- bzw. Risswirkungszahl

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



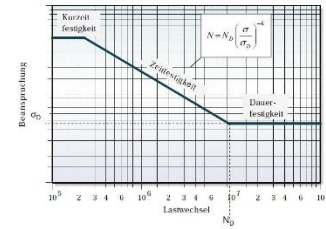
$\sigma_m = 0$



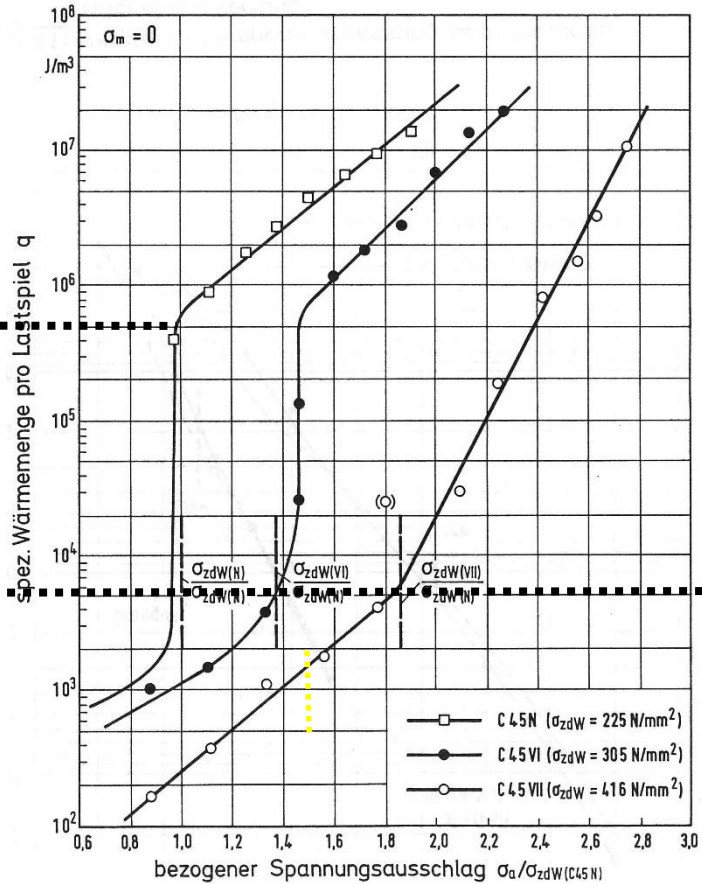
# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

### quantitative Thermometrie

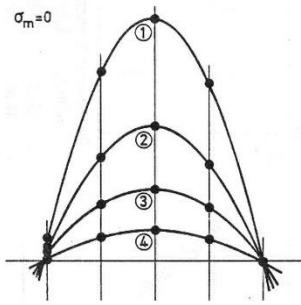


2 Dekaden



Abhängigkeit  
von der  
Wärmebehandlung  
bzw. Festigkeit beim  
Ck45

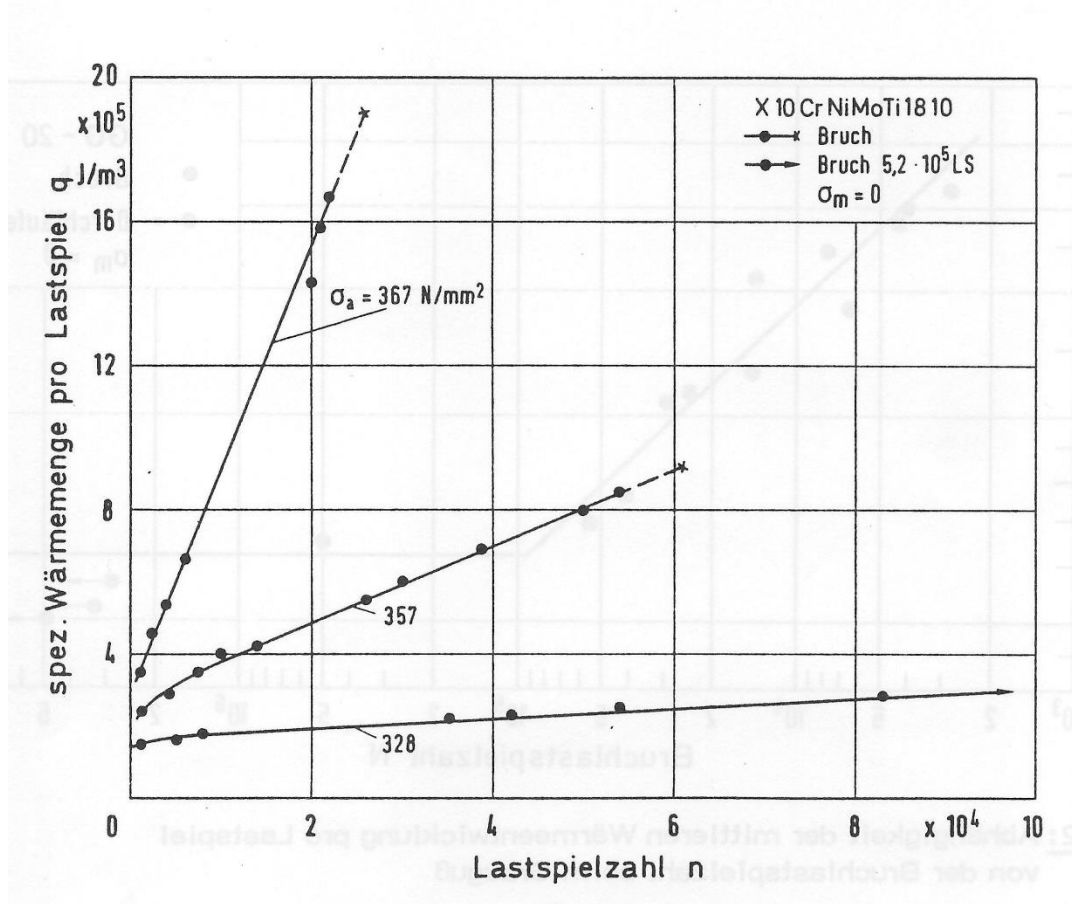
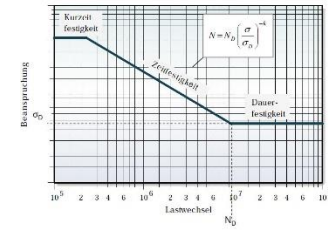
ca. 5000 J/m<sup>3</sup>

$\sigma_m = 0$ 

# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

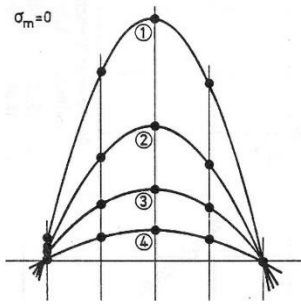
### quantitative Thermometrie



## Abhängigkeit von der Zyklenzahl im Zeitfestigkeitsgebiet

(Dauerfestigkeit ca. 310 MPa)

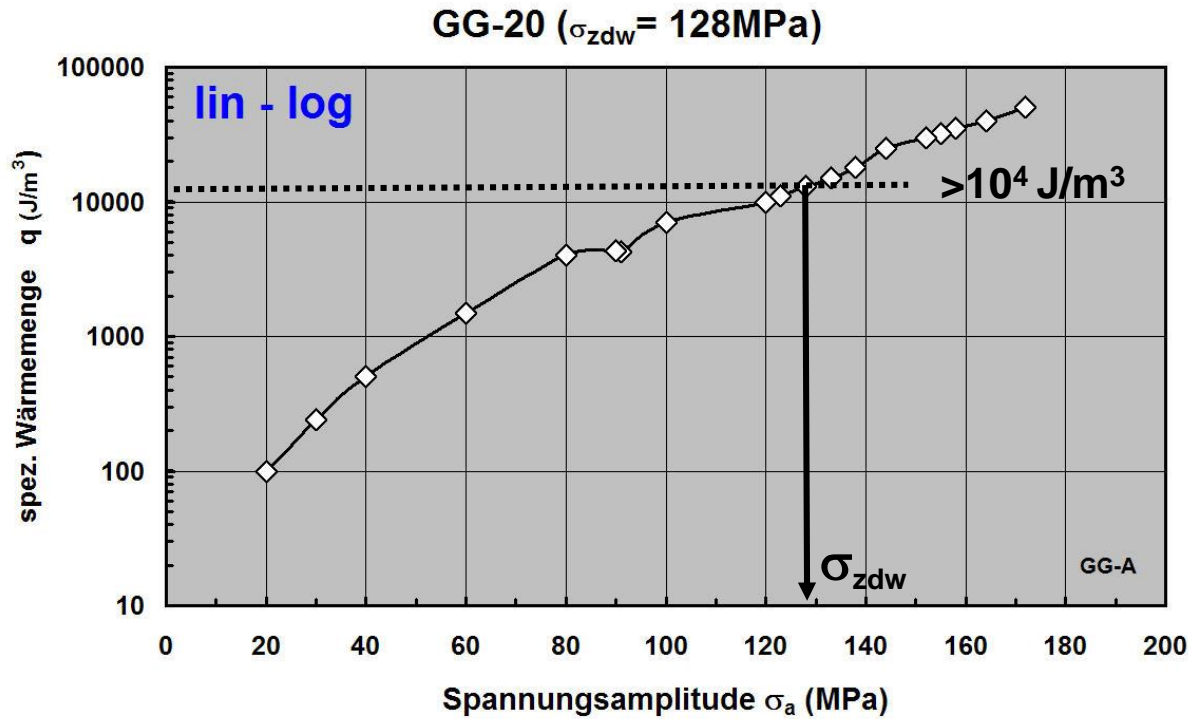
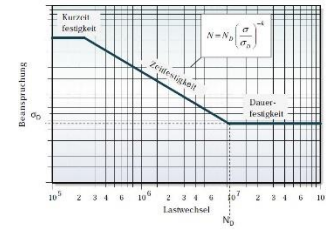
Anwendung:  
 Kurzzeitbestimmung der Dauerfestigkeit im Laststeigerungsversuch (LSV)  
 Reihenfolgeeffluss



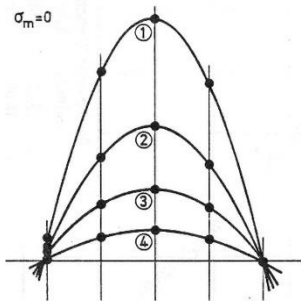
# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

### quantitative Thermometrie



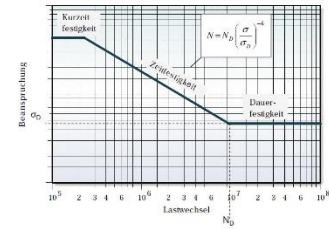
hoch-  
dämpfender  
lamellarer  
Grauguss

$\sigma_m = 0$ 

# Quantitative Thermometrie

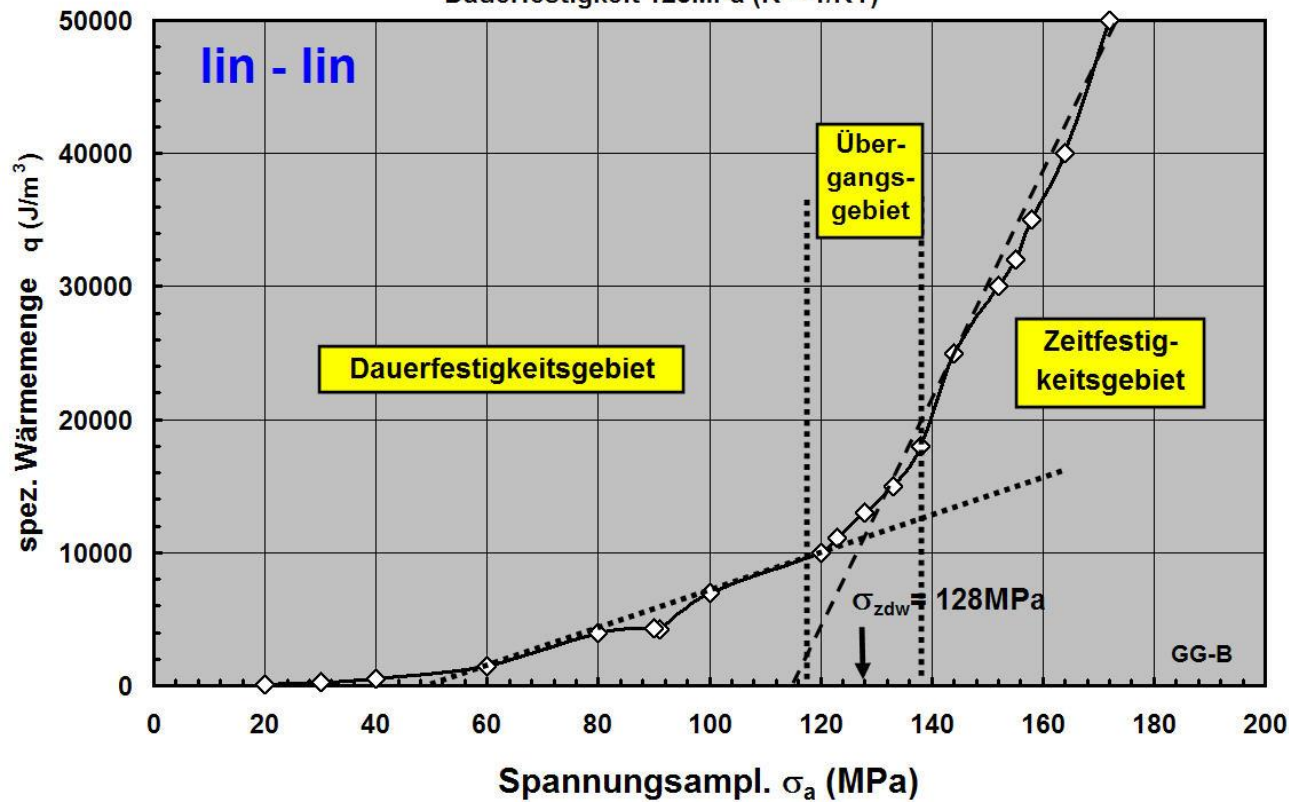
## Dämpfung und Schädigung

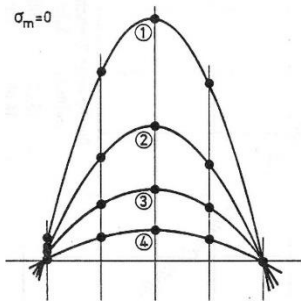
### quantitative Thermometrie



GG-20

Dauerfestigkeit 128MPa ( $R = -1/RT$ )

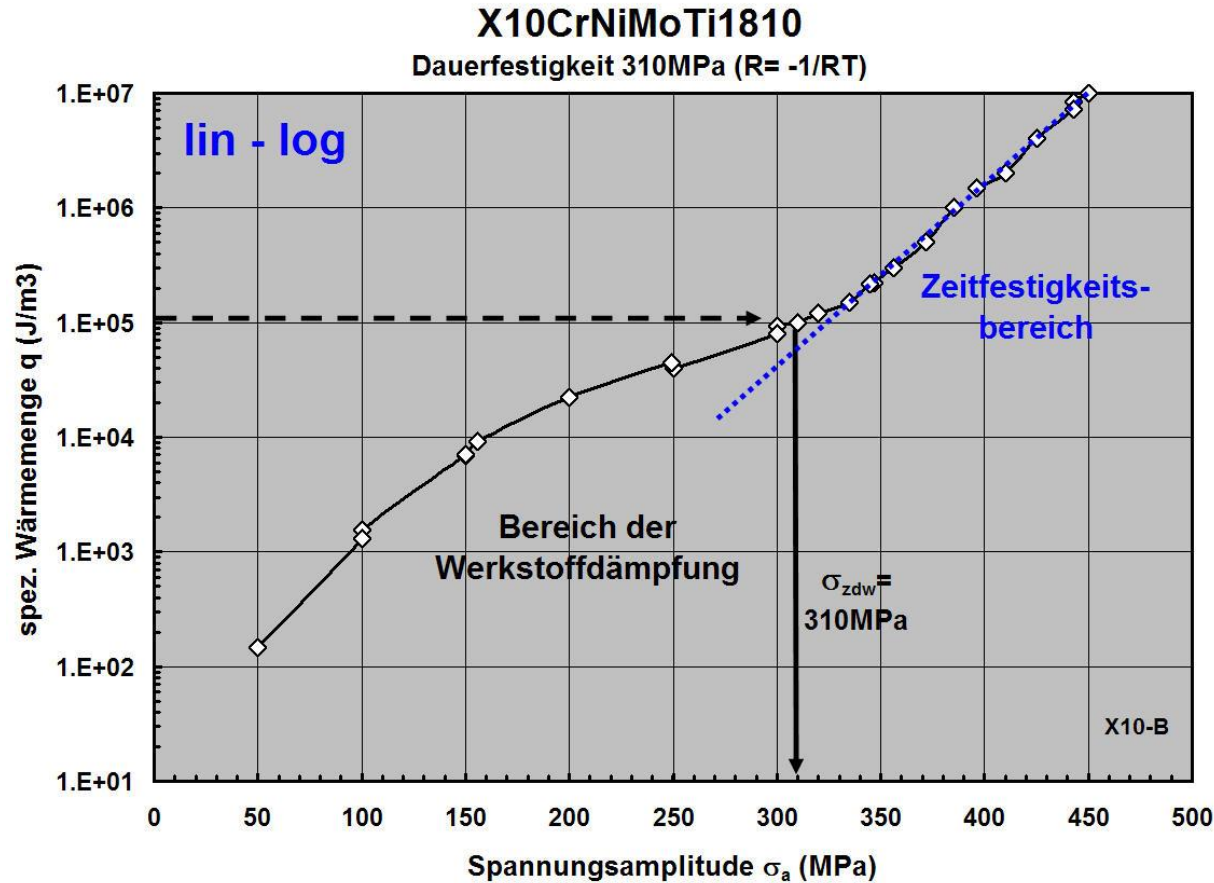
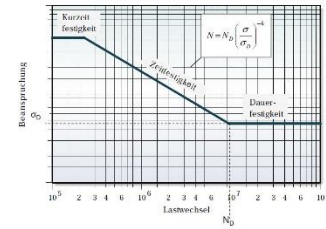




# Quantitative Thermometrie

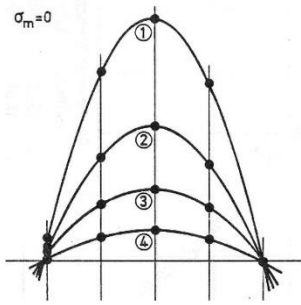
## Dämpfung und Schädigung

### quantitative Thermometrie



hoch-  
dämpfender  
Austenit

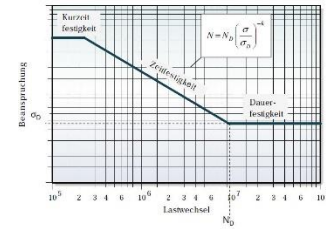
$>10^5 \text{ J/m}^3$   
an der  
HCF-Dauer-  
festigkeits-  
grenze

$\sigma_m = 0$ 

# Quantitative Thermometrie

## Dämpfung und Schädigung

### quantitative Thermometrie



### X10CrNiMoTi1810

Dauerfestigkeit 310MPa (R= -1/RT)

