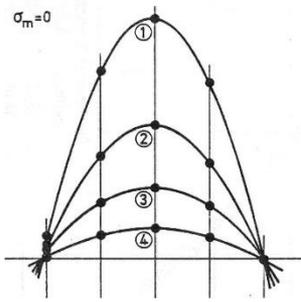
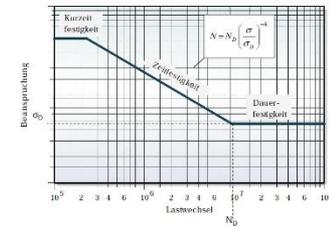


$\sigma_m = 0$ 

Herr Dr. Klaus F. Stärk zu „Quantitative Thermometrie, Dämpfung und Ermüdung“

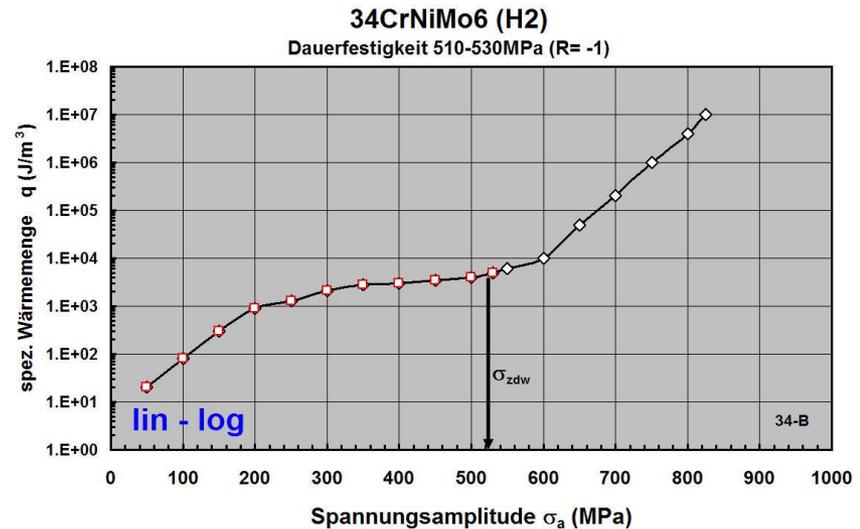
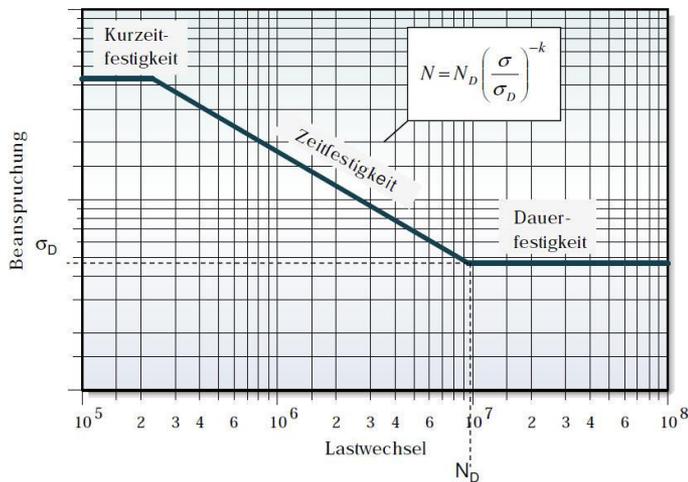
10.02.2022 - in News WPT



Herr Dr. Stärk hält am **Dienstag, dem 15. Februar 2022 um 13 Uhr** einen Vortrag. Er ist Experte auf dem Gebiet der mechanischen Werkstoffprüfung mit dem Fokus auf Thermometrie und Resistometrie. Das WPT lädt alle Interessierten herzlich zum Vortrag und der anschließender Diskussion ein. Eine Teilnahme ist unter folgendem Link möglich: <https://tu-dortmund.webex.com/tu-dortmund/j.php?MTID=m61bbe80eodde2b25c93e60f554a560c8>

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

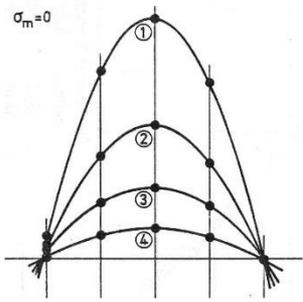


TU-Dortmund 15. Februar 2022

Lehrstuhl für Werkstoffprüftechnik (WPT)
Prof. Frank Walther

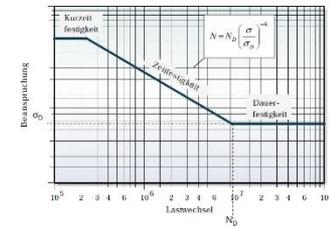
Dr.-Ing. Klaus F. Stärk
Untersiggenthal/Schweiz

$\sigma_m = 0$



Quantitative Thermometrie

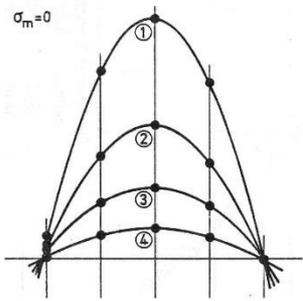
Dämpfung und Ermüdung



Gliederung

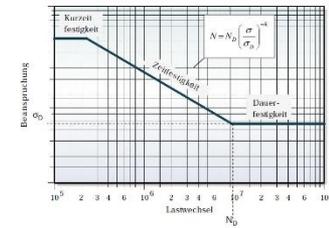
1. Werkstoff und Gefüge
2. Ermüdung LCF- HCF- VHCF
3. Quantitative Thermometrie
4. Energie-Hypothese
5. Messtechnik
6. Ausblick
7. Ihre Fragen, meine Fragen

$\sigma_m = 0$



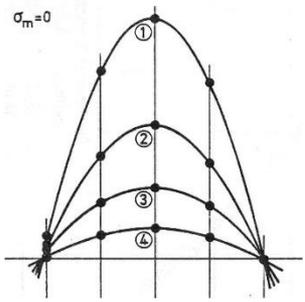
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



Gliederung

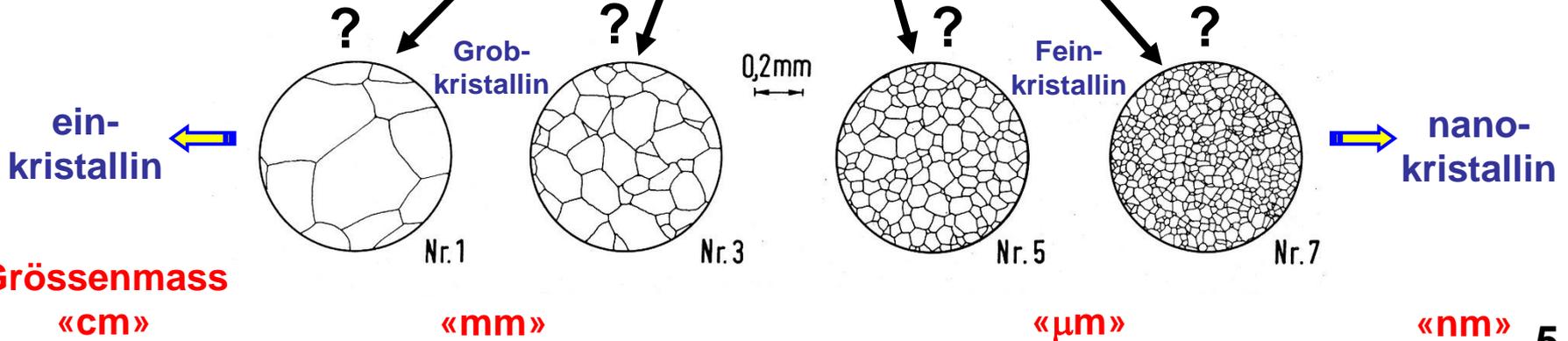
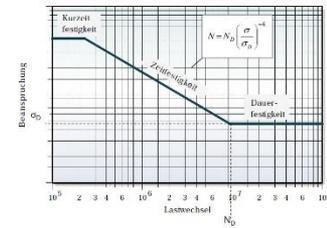
1. Werkstoff und Gefüge
2. Ermüdung LCF-HCF-VHCF
3. Quantitative Thermometrie
4. Energie-Hypothese
5. Messtechnik
6. Ausblick
7. Ihre Fragen, meine Fragen



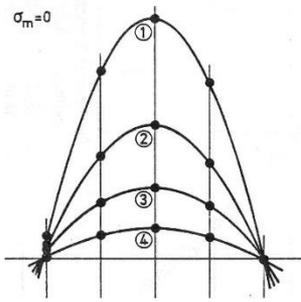
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

Werkstoff und Gefüge



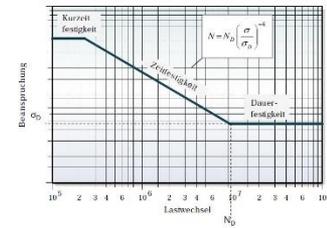
$\sigma_m = 0$



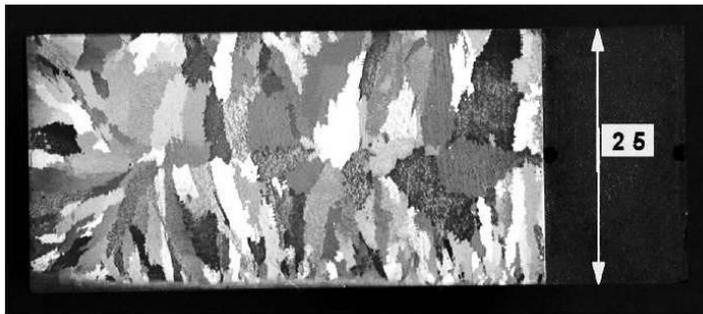
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

Werkstoff und Gefüge



Ni-Basis Leg. MarM247cc



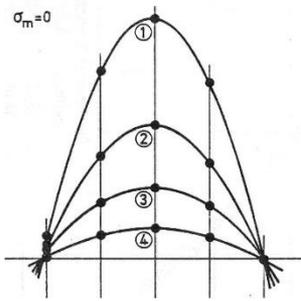
HT-Gasturbinenschaufel

OF-Cu



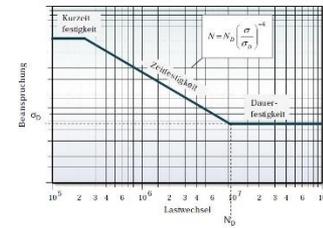
oxygen-free Kupfer

$\sigma_m = 0$



Quantitative Thermometrie

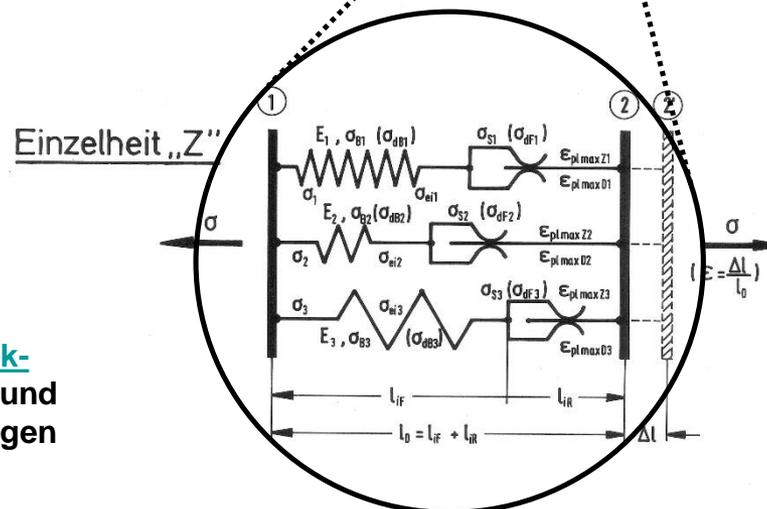
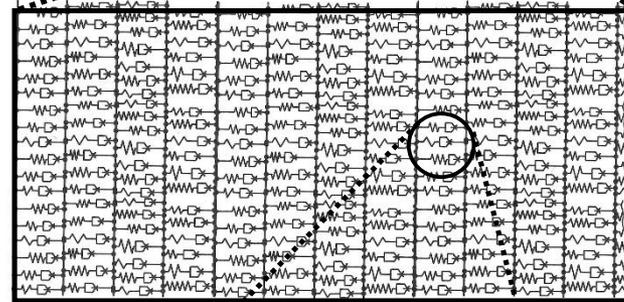
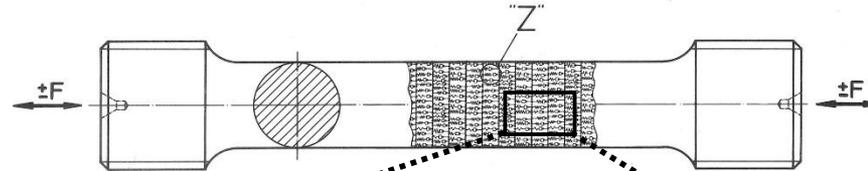
Dämpfung und Ermüdung



**Makroskopisch
homogen und
isotrop**

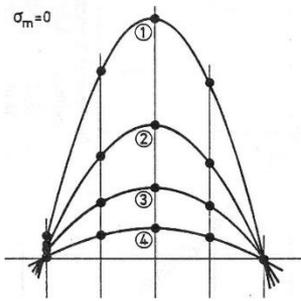
**Mikroskopisch
inhomogenes
Gefüge**

**Statistische
Werkstoff-
Simulation 1976
auf CDC**



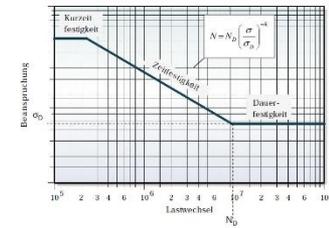
s.a. 1996 Werkstoffmodell, www.staerk-erdwaerme.ch unter «Berufliches» [16] und Gefügesimulation, neuere Untersuchungen Prof. S. Schmauder, Uni Stuttgart

$\sigma_m = 0$



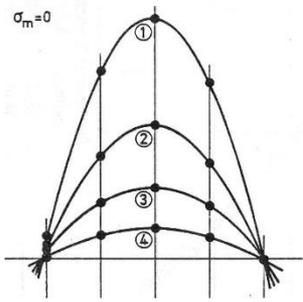
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



Gliederung

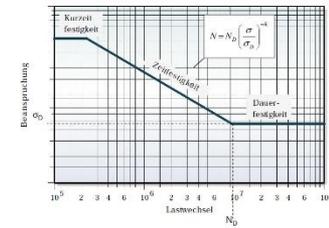
1. Werkstoff und Gefüge
2. Ermüdung LCF- HCF- VHCF
3. Quantitative Thermometrie
4. Energie-Hypothese
5. Messtechnik
6. Ausblick
7. Ihre Fragen, meine Fragen

$\sigma_m = 0$ 

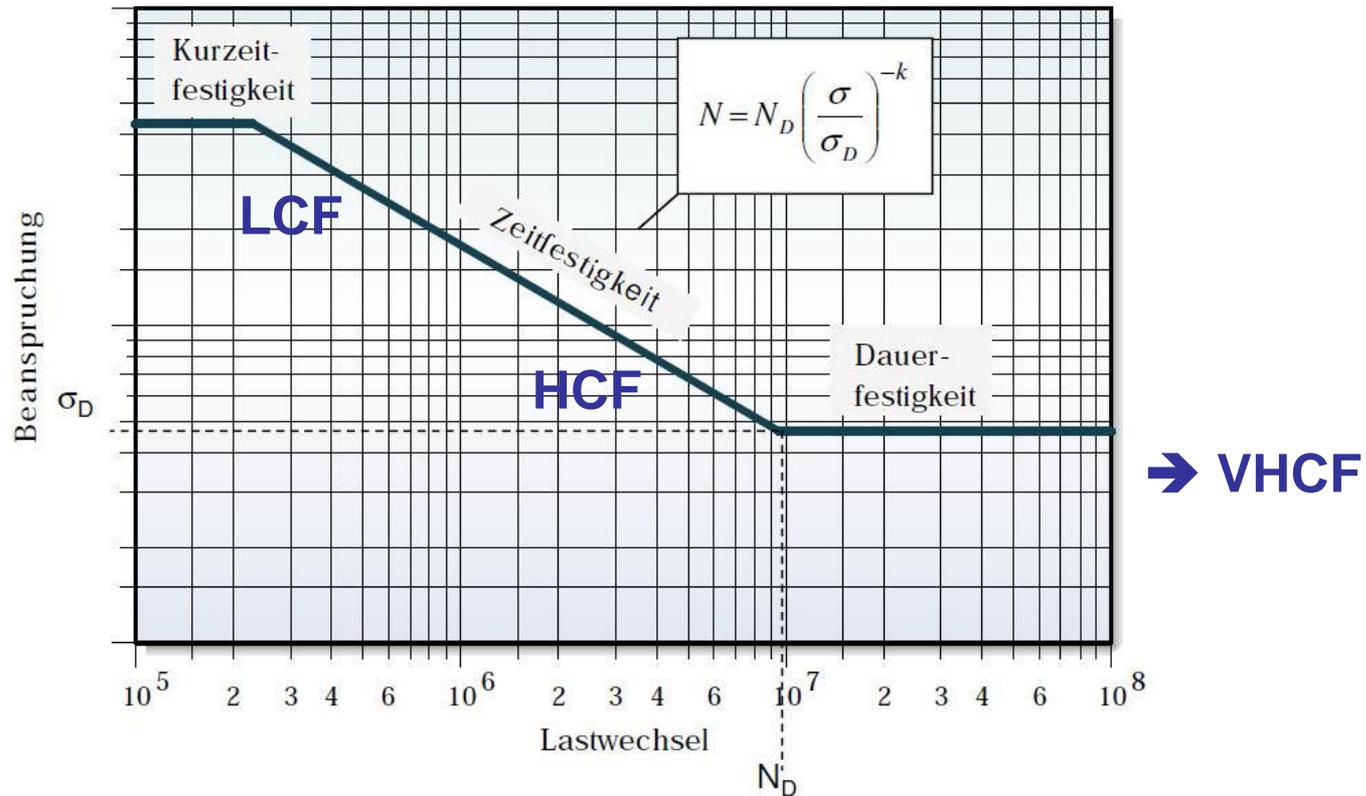
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

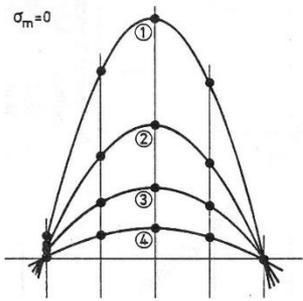
LCF → HCF → VHCF > 10¹⁰ cy



Die Wöhler-Linie

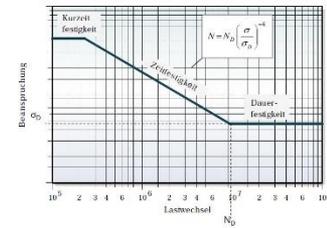


$\sigma_m = 0$



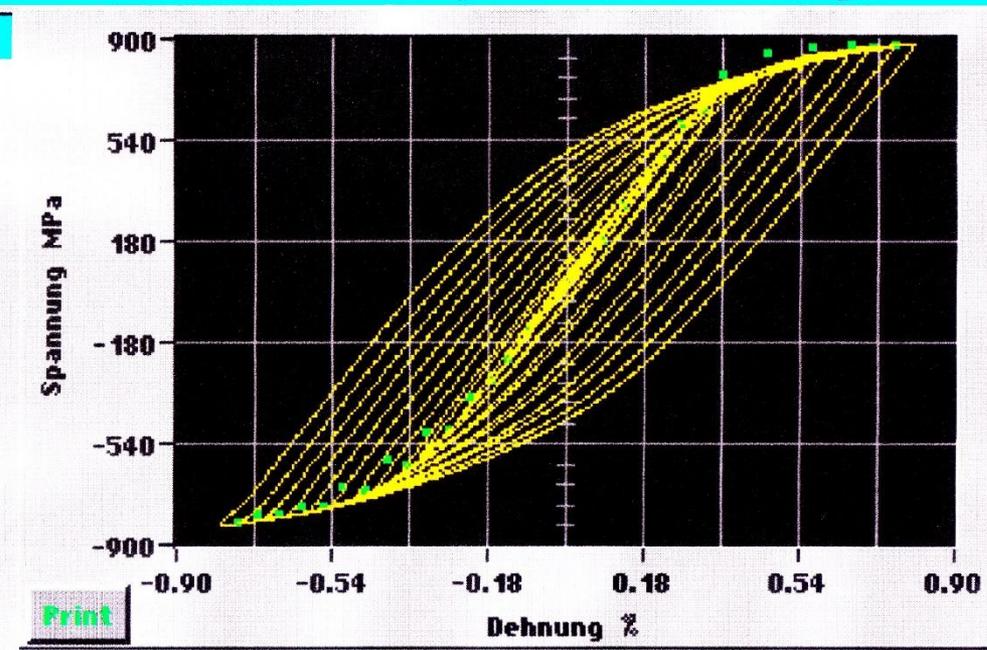
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



Hysterese, Gesamtdehnung, plastische Dehnungsamplitude

Testen Handsteuerung! Starten! Diagramm we

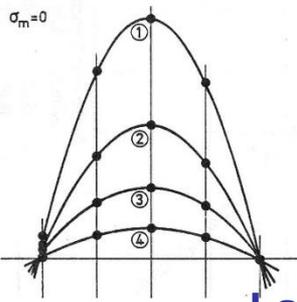


IST
Incremental
Step Test

LCF → HCF → VHCF

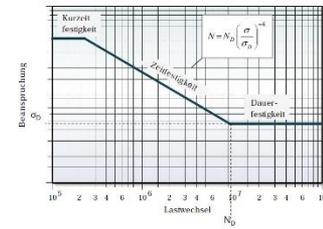
die
„elastische“
Hysterese

$\sigma_m = 0$

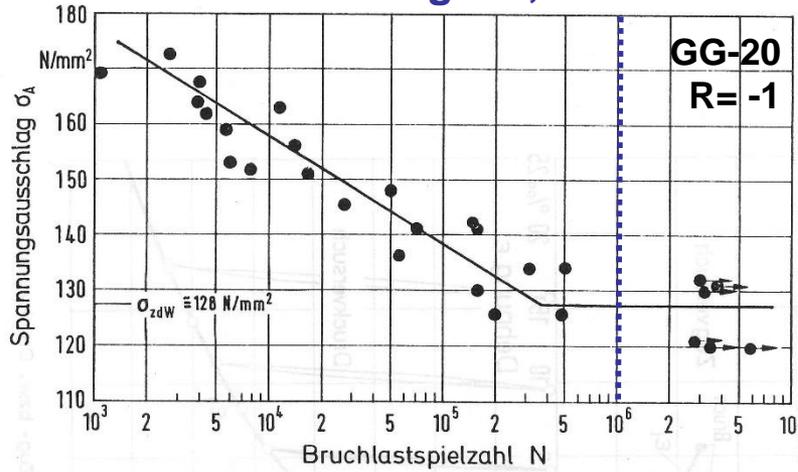


Quantitative Thermometrie

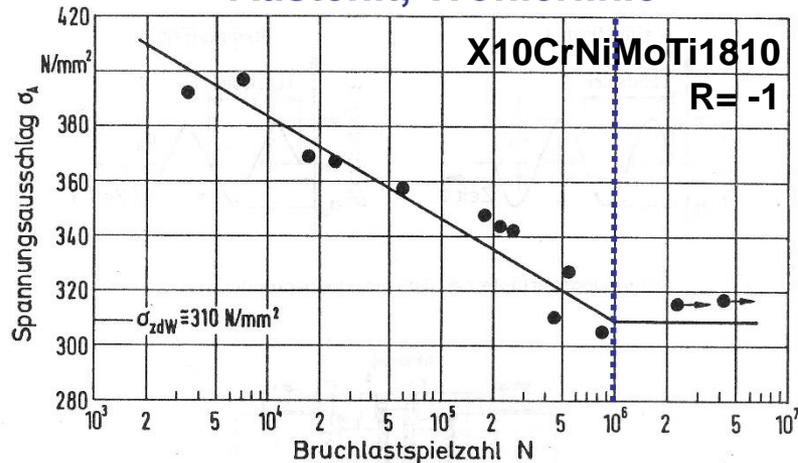
Dämpfung und Ermüdung



Lamellarer Grauguss, Wöhlerlinie



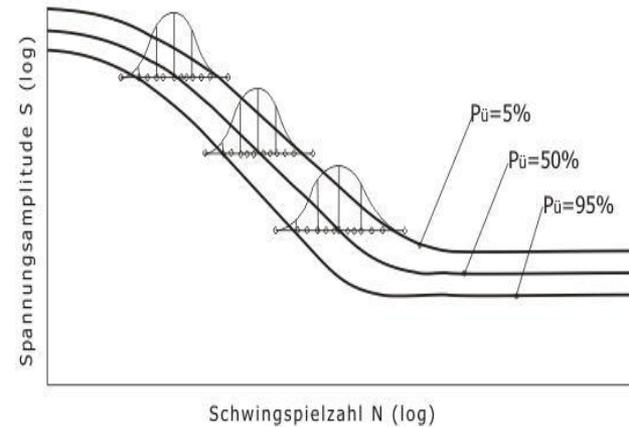
Austenit, Wöhlerlinie



Ermüdungslebensdauer

Streuungen

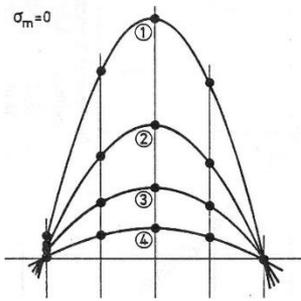
Statistik



Mass für die Ermüdungsschädigung?

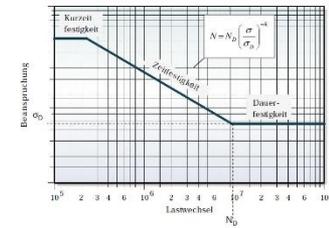
$(\sigma, \epsilon, \delta, \Omega, \lambda, E)$

$\sigma_m = 0$



Quantitative Thermometrie

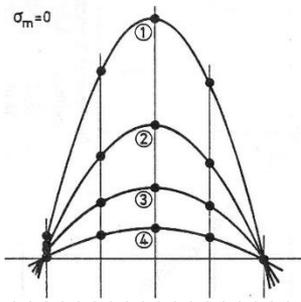
Dämpfung und Ermüdung



Gliederung

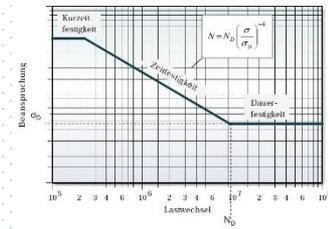
1. Werkstoff und Gefüge
2. Ermüdung LCF- HCF- VHCF
3. Quantitative Thermometrie
4. Energie-Hypothese
5. Messtechnik
6. Ausblick
7. Ihre Fragen, meine Fragen

$\sigma_m = 0$



Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



Die quantitative Thermometrie

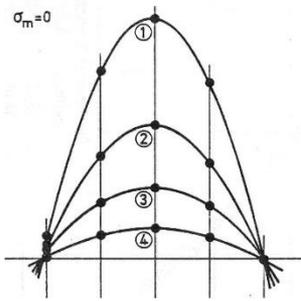
Methodik

- bereits bekannt, bereits versucht!
„gab es schon“, „geht nicht“ (1974)

**Mein
Professor**

- widerspricht es physikalischen Gesetzen?
- widerspricht es der Metallphysik?

$\sigma_m = 0$



Quantitative Thermometrie

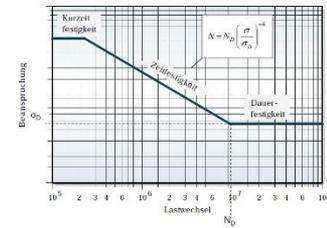
Dämpfung und Ermüdung

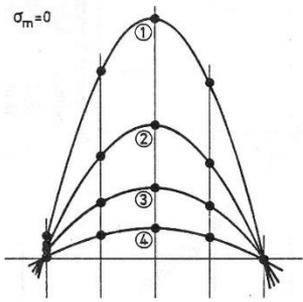
Die quantitative Thermometrie

Methodik

- gibt es neue Erkenntnisse?
- neue oder verbesserte Messtechnik?
- Streuung, Wiederholbarkeit und Auflösung?

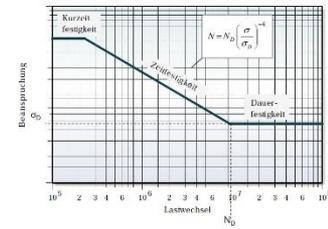
**Geht nicht –
gibt's nicht !!**



$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

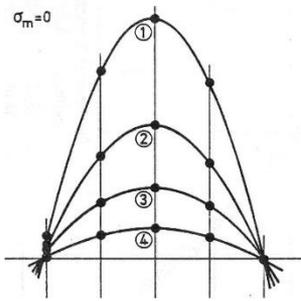
Dämpfung und Ermüdung



Zielsetzung

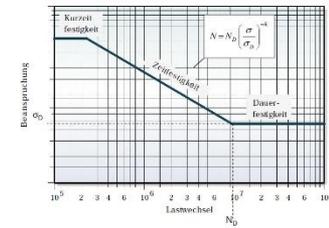
- Nicht «**nur**» Temperaturmessung
- Energie pro Volumeinheit und Lastspiel
- Wärmemenge q pro Lastspiel in J/m^3
= Quantitative Thermometrie

$\sigma_m = 0$



Quantitative Thermometrie

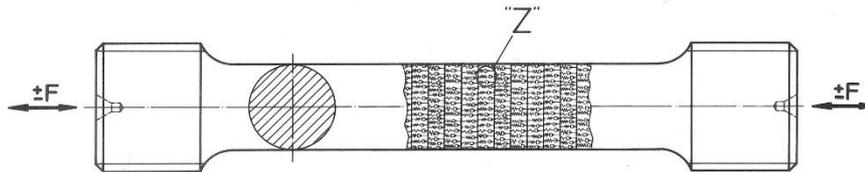
Dämpfung und Ermüdung



Methodik

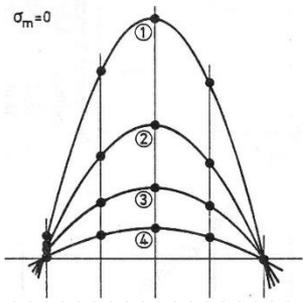


Homogene Spannung über dem Querschnitt und der Messlänge



Jedes Volumelement in der Messlänge produziert pro Lastspiel die gleiche Wärmeenergie q (J/m³)

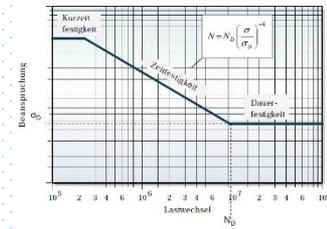
Was braucht es dazu noch?



Quantitative Thermometrie

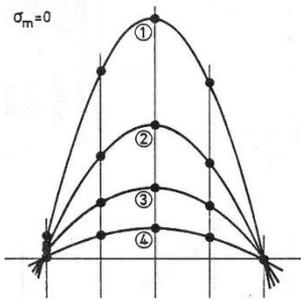
Dämpfung und Ermüdung

Die quantitative Thermometrie



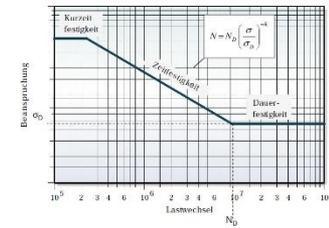
Methodik

- ✓ • Konstante Spannung über der Messlänge = zylindrische Messlänge und **axiale** Last
- ✓ • Wärmeabfuhr durch reine **axiale** Wärmeleitung und gute **radiale** Isolation
- ✓ • ungleichmässige Wärmeabfuhr über die Probeneinspannungen zugelassen
- ✓ • Konstante zyklische Ermüdungsbelastung mit bekannter, veränderbarer Prüffrequenz



Quantitative Thermometrie

was braucht's dazu?



Temperaturparabel
(Herleitung s. Diss.)

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

(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)
Gl. 3.13
(4 Messstellen)

Krümmung

der Temperatur-Parabel

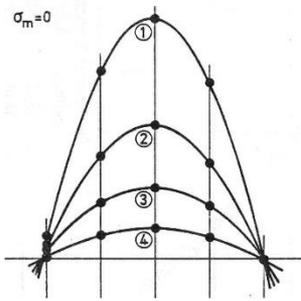
$$q = \frac{2\lambda * [(\vartheta_1 - \vartheta_7) * (x_1 - x_4) + (\vartheta_4 - \vartheta_1) * (x_1 - x_7)]}{f * (x_1 - x_4) * (x_4 - x_7) * (x_1 - x_7)}$$

(Weiblen)
Gl. 4.35
(3 Messstellen)

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)

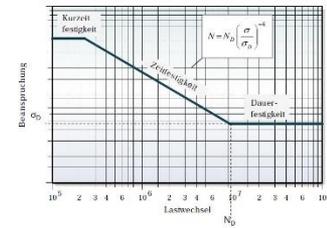
$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

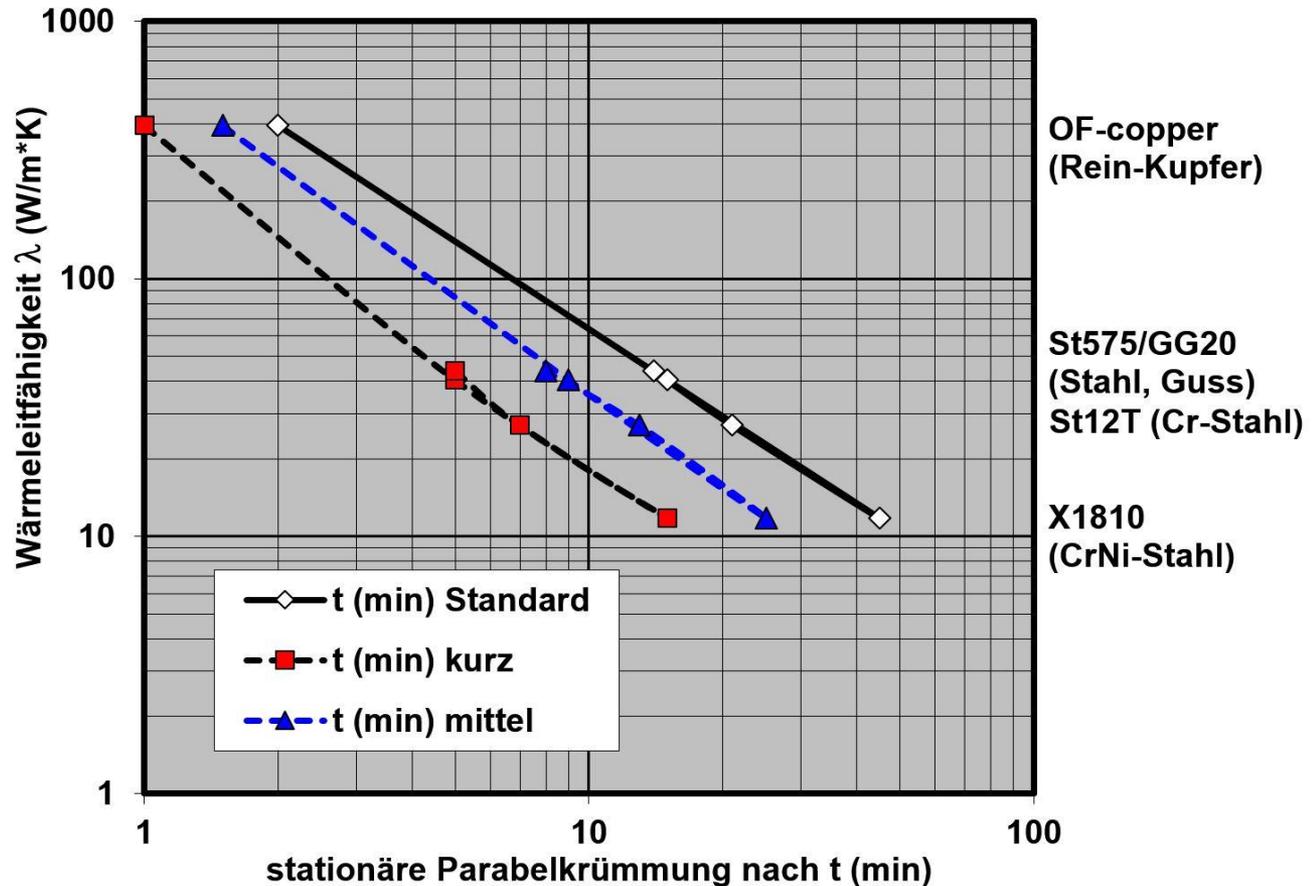
Dämpfung und Ermüdung

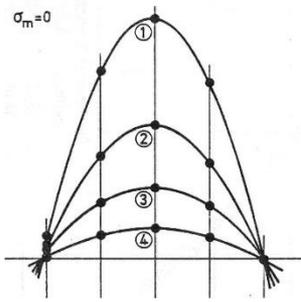
Konstante Wärmeerzeugung bzw.
stabile Parabelkrümmung \dot{q}

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



stabile
Parabel
entweder
experimentell
ermitteln
oder
instationäre
FE-Rechnung

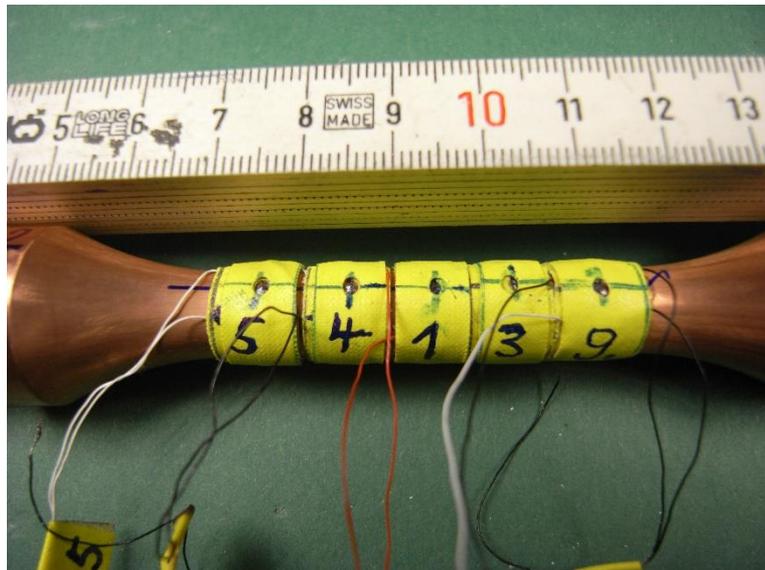
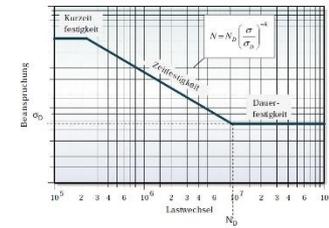


$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

Die quantitative Thermometrie

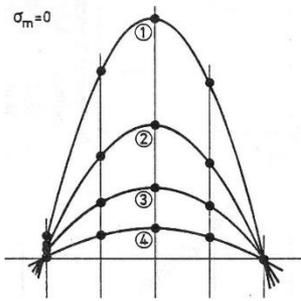


5 kalibrierte NTC-Thermistoren 12 k Ω
 1, 3, 4, 5, 9 im Abstand von ca. 10 mm
 Probendurchmesser 11.28 mm
 Konstantstrom 20 μ A in Serie
 (Präzisions-Stromquelle Digistant-Burster)

mit Schaumstoff
 radial isolierte Probe in
 Resonanzpulsler Mikrotron

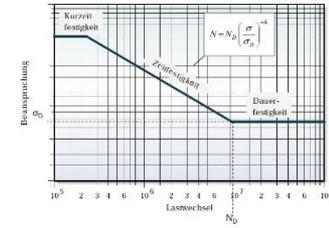


wassergekühlte
 Einspannungen



Quantitative Thermometrie

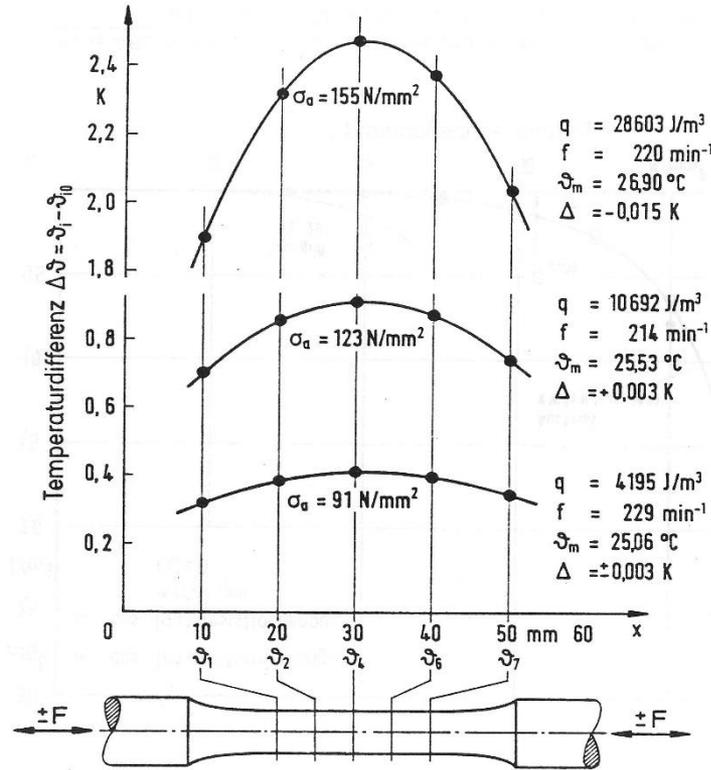
Dämpfung und Ermüdung



**quantitative
Thermometrie**

(Herleitung s. Diss.)

**etwas mehr
als nur
Temperatur-
messung**



**spez. Wärmemenge q
pro Lastspiel aus der**

Krümmung

der Temperatur-Parabel

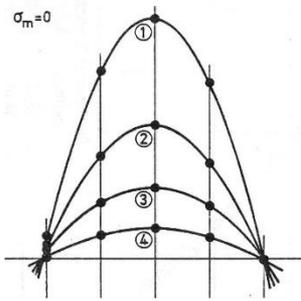
(Minimum 3 Temperaturen)

**Auflösung
mit NTC-
Halbleitern**

< 0.001 K = 1 mK



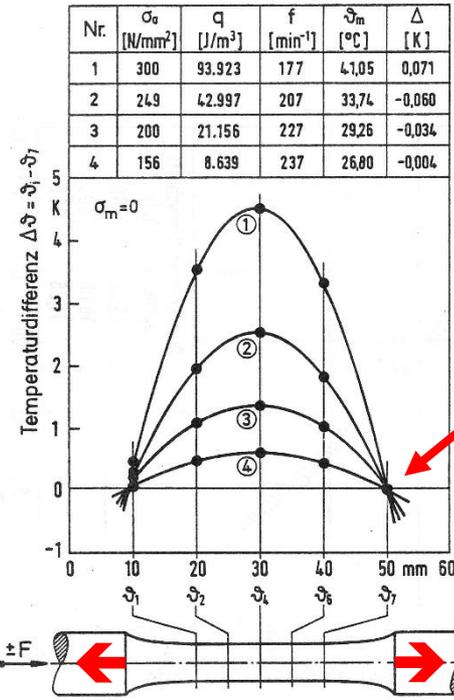
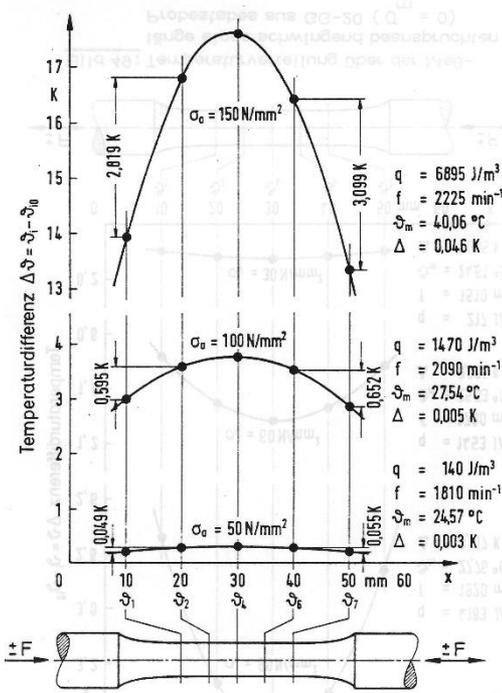
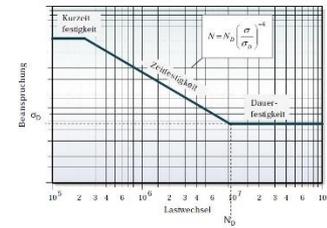
**Homogene
Spannung über
dem Querschnitt
und der Messlänge**



Quantitative Thermometrie

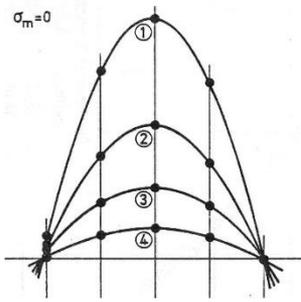
Dämpfung und Ermüdung

quantitative Thermometrie



z. B. Bezugspunkt

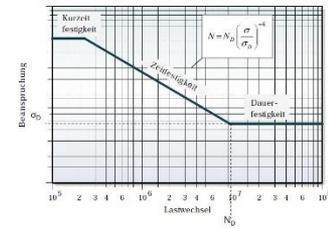
spez. Wärmemenge q pro Lastspiel ist **unabhängig** von der Prüffrequenz und der Wärmeabfuhr an den Einspannungen!



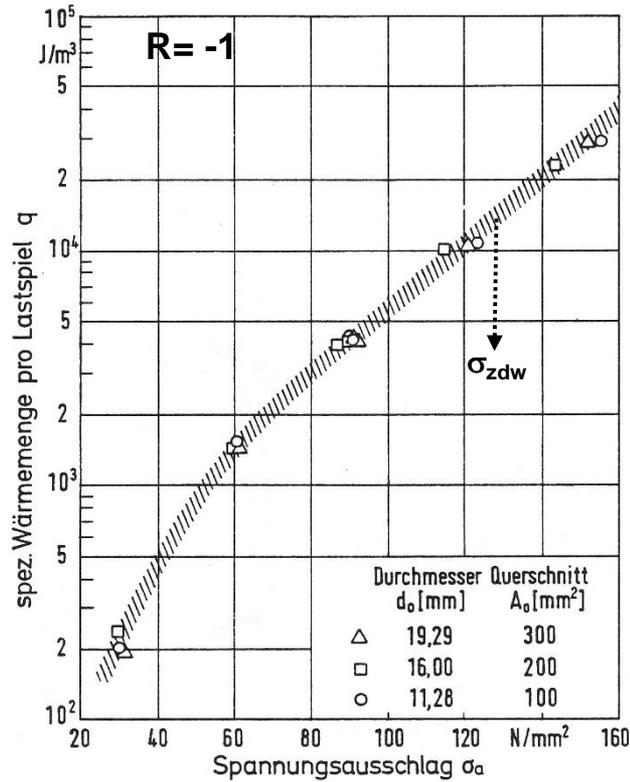
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

quantitative Thermometrie



GG-20



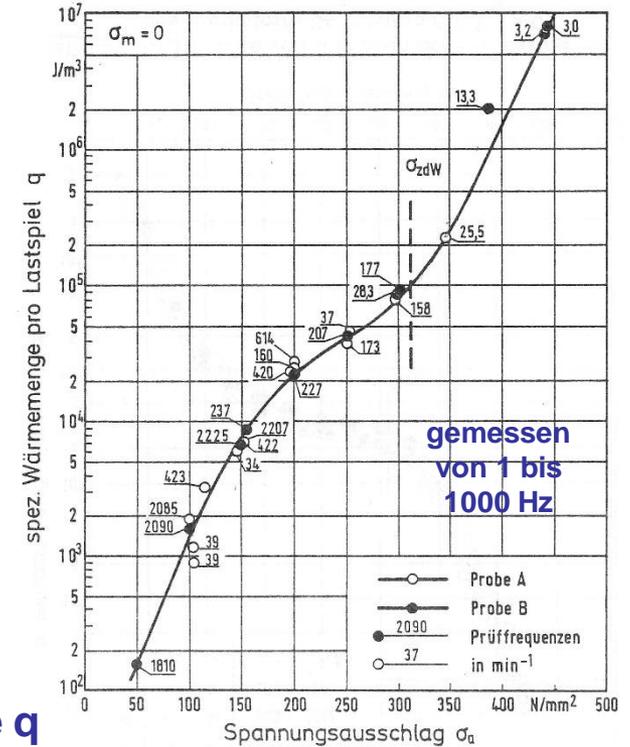
unabhängig vom Probendurchmesser!

q

[J/m³ und cy]

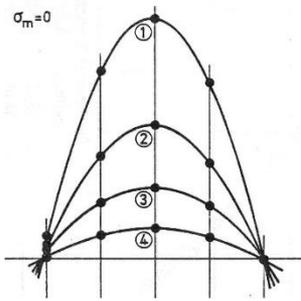
spez. Wärmemenge q pro Lastspiel ist:

X10CrNiMoTi1810



unabhängig von der Prüffrequenz!

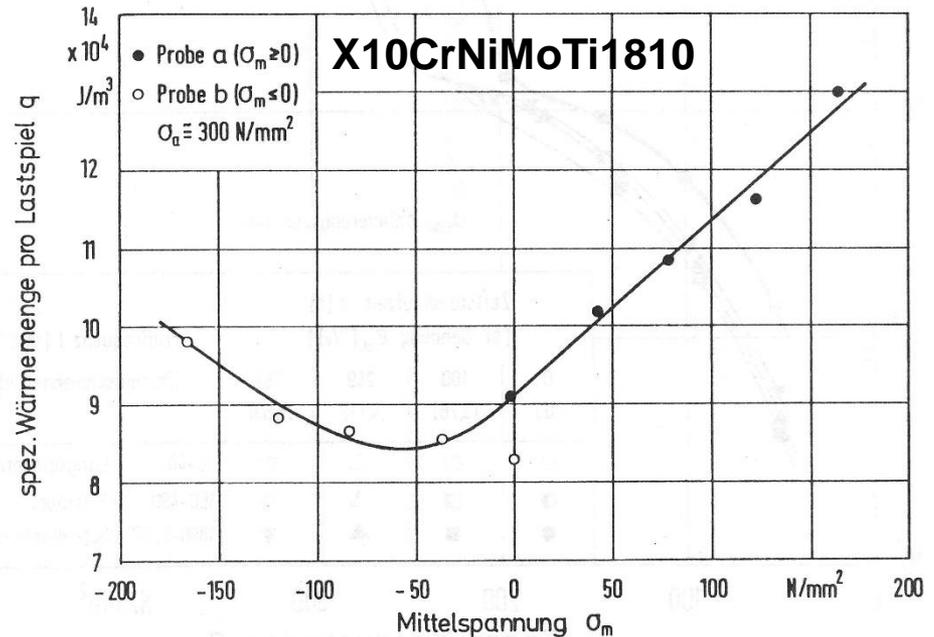
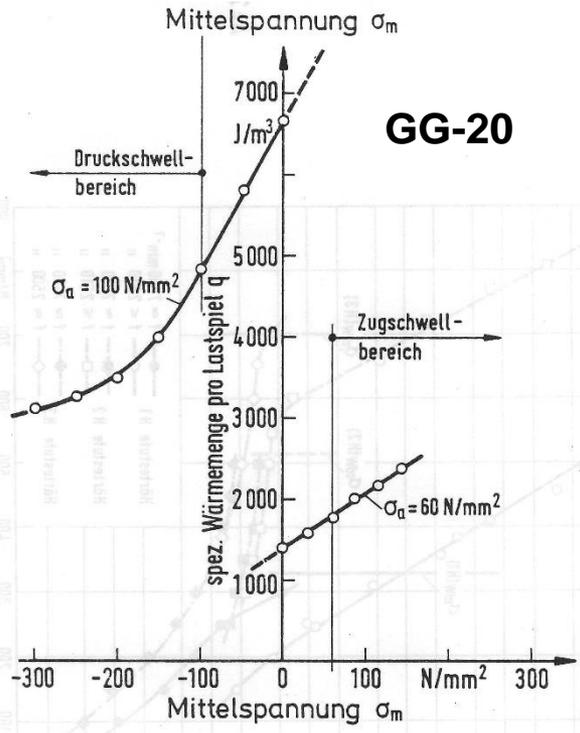
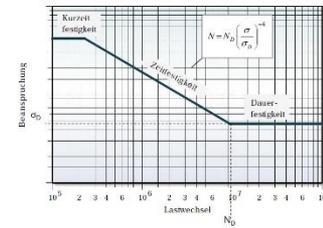
$\sigma_m = 0$



Quantitative Thermometrie

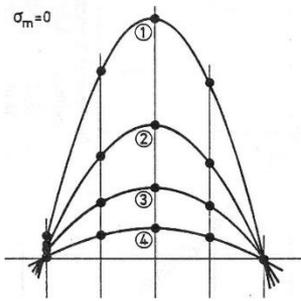
Dämpfung und Ermüdung

quantitative Thermometrie



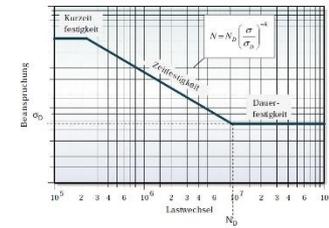
spez. Wärmemenge q pro Lastspiel **zeigt** den Einfluss von Mittelspannungen!

Wie auch die Ermüdungslebensdauer!



Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

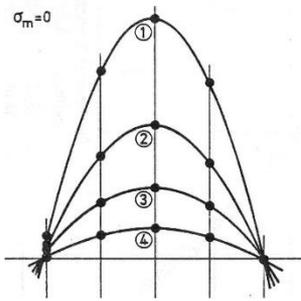


quantitative Thermometrie

die spezifische Wärmemenge q pro Lastspiel ist

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

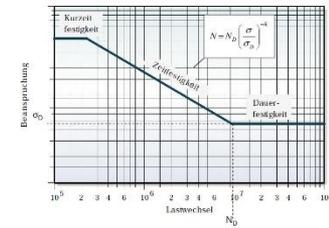
Die Messauflösung **reicht** vom Zeitfestigkeitsbereich bis weit unter den VHCF-Bereich (über 7 Dekaden)

$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

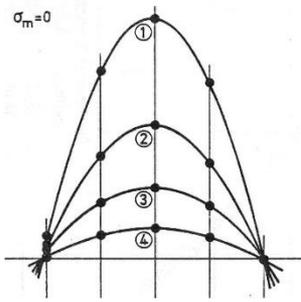
quantitative Thermometrie



die spezifische Wärmemenge q pro Lastspiel ist

- abhängig von der Mittelspannung ✓
- abhängig von der Spannungsfolge (Reihenfolge) ✓

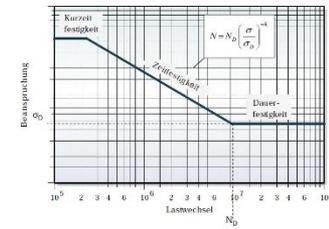
Wie auch die
Ermüdungsdauer



Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

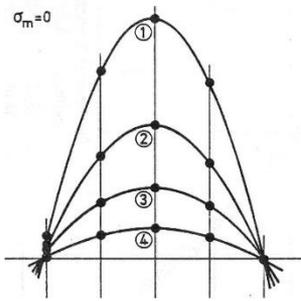
quantitative Thermometrie



die spezifische Wärmemenge q pro Lastspiel ist

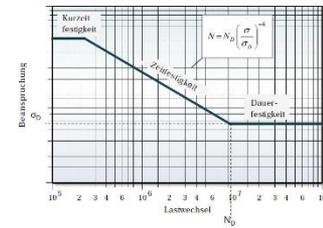
- abhängig von der Mittelspannung ✓
 - abhängig von der Spannungsfolge (Reihenfolge) ✓
 - abhängig von plastischen Vorverformungen ✓
 - abhängig von Kriechvorbelastungen ✓
- s.a. Einflüsse auf Dauerfestigkeit

→ Eignung zur Charakterisierung von Werkstoffzuständen!

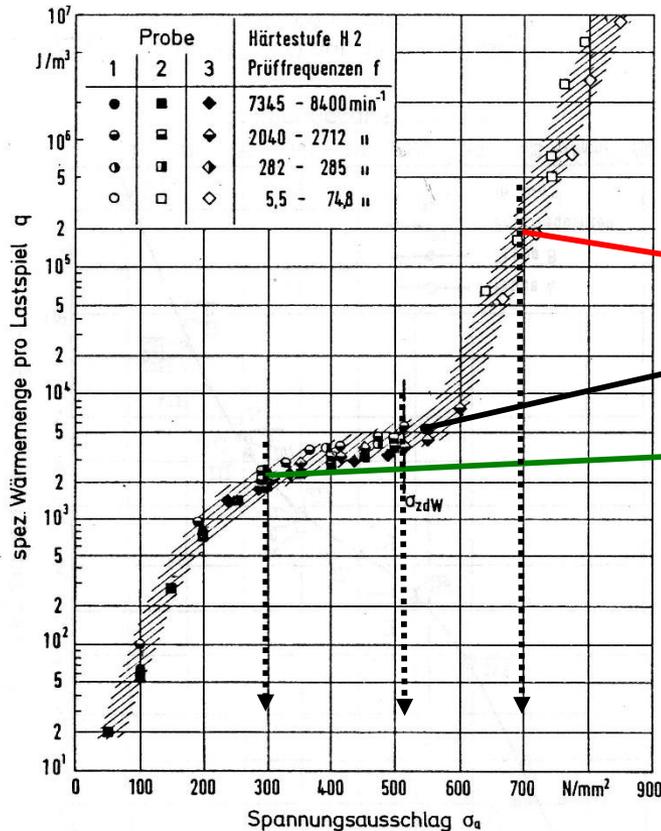


Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



34CrNiMo6 (H2)



Hysteresisfläche

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

Dehnungsschwingbreite

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

LCF und Zeitfestigkeit

HCF und Übergangsgebiet (-radius)

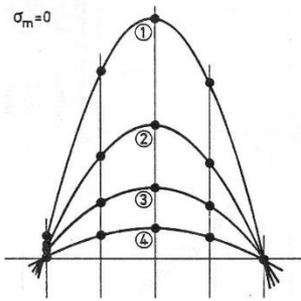
VHCF bis „Unendlich“
(lokale Inhomogenitäten)

quantitative
Thermometrie

6 Dekaden von q (J/m³)

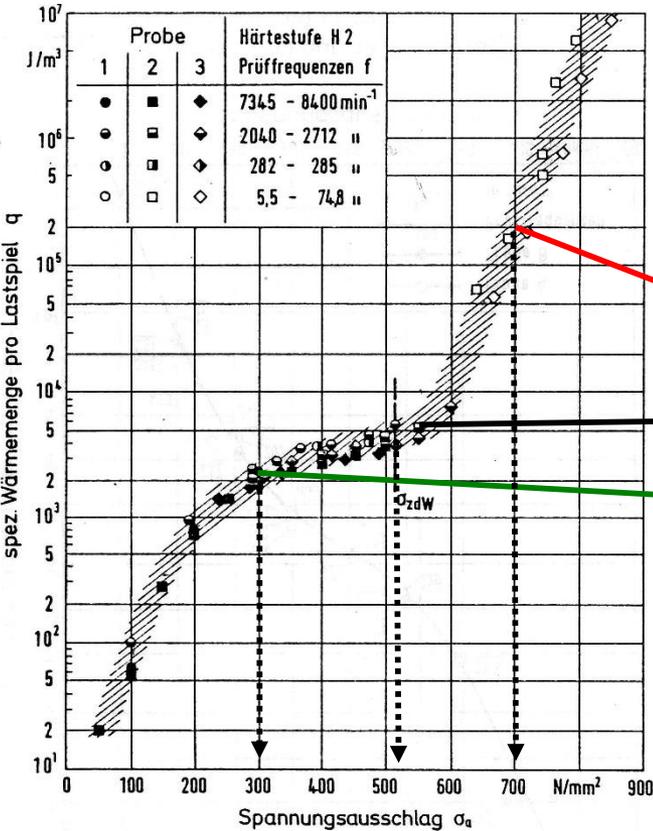
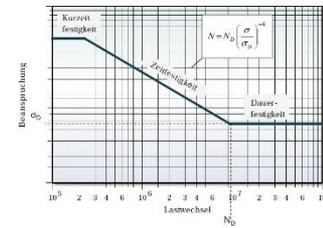
s. Spannungsbereich 50 – 700 MPa

Laststeigerungsverfahren mit $\Delta\sigma = +50$ MPa



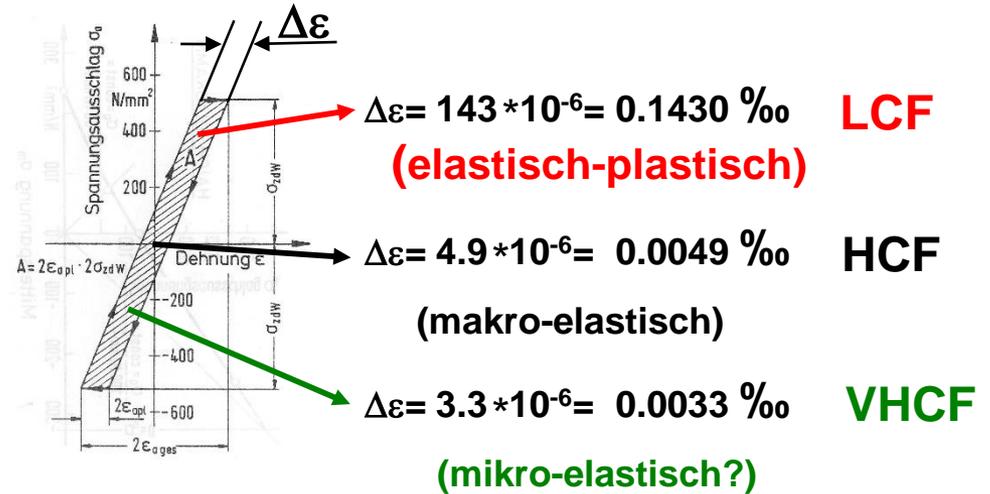
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



34CrNiMo6 (H2)

Geht es auch mit Dehnungsmessungen?

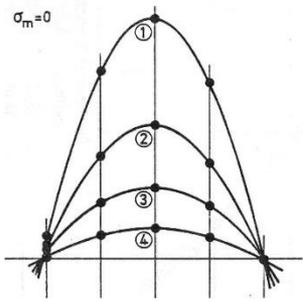


Hysterese-Fläche $A = q \approx \Delta \sigma * \Delta \epsilon$

plast. Dehnungsschwingbreite

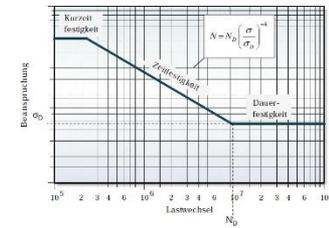
$$\Delta \epsilon = q / \Delta \sigma$$

Was ist Schädigung?

$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

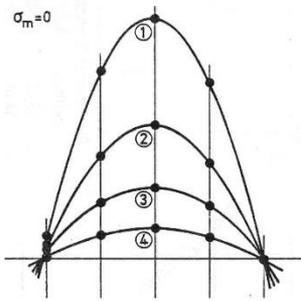
Dämpfung und Ermüdung



Gliederung

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

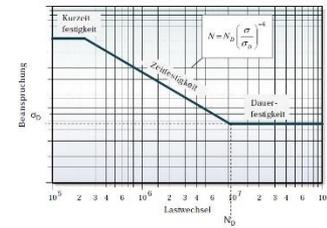
$\sigma_m = 0$



Quantitative Thermometrie

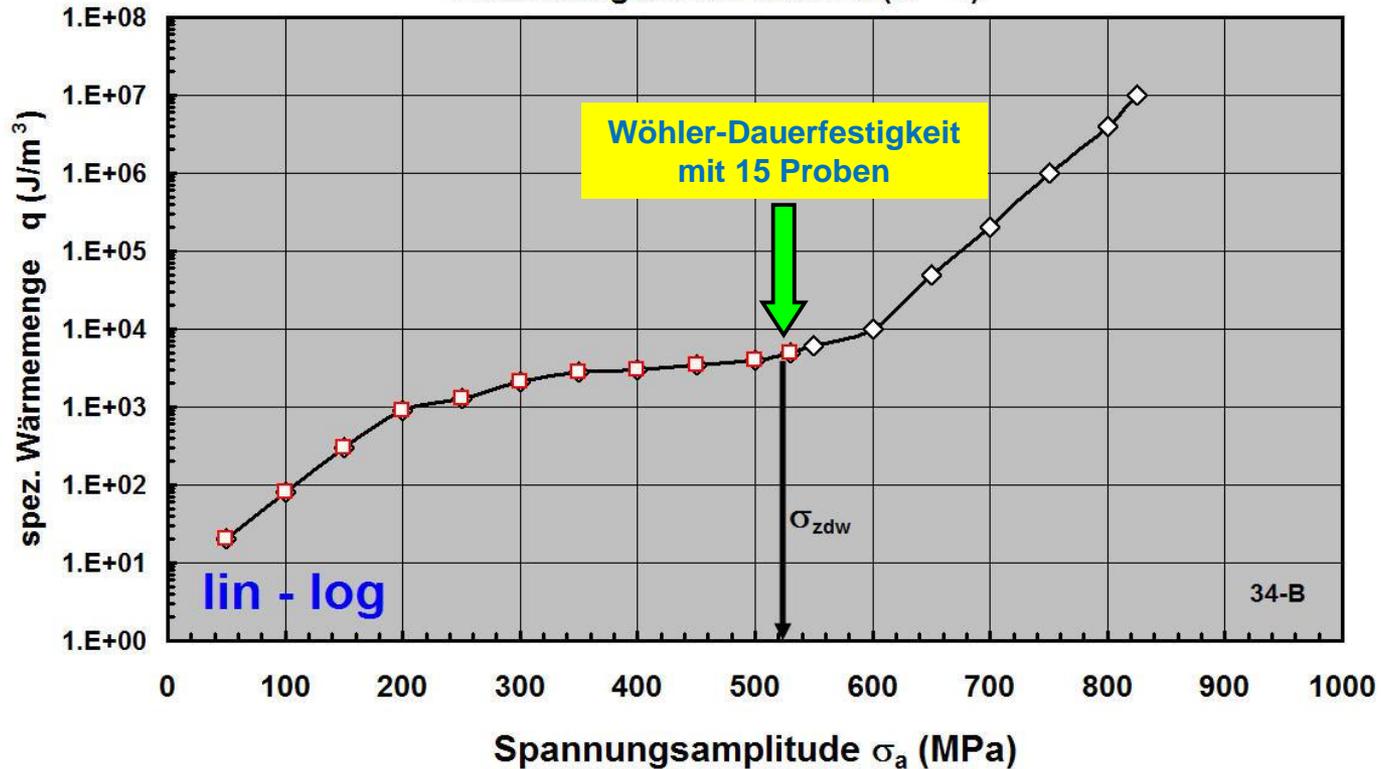
Dämpfung und Ermüdung

quantitative Thermometrie

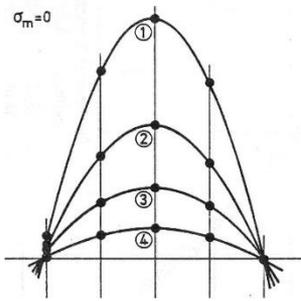


34CrNiMo6 (H2)

Dauerfestigkeit 510-530MPa (R= -1)



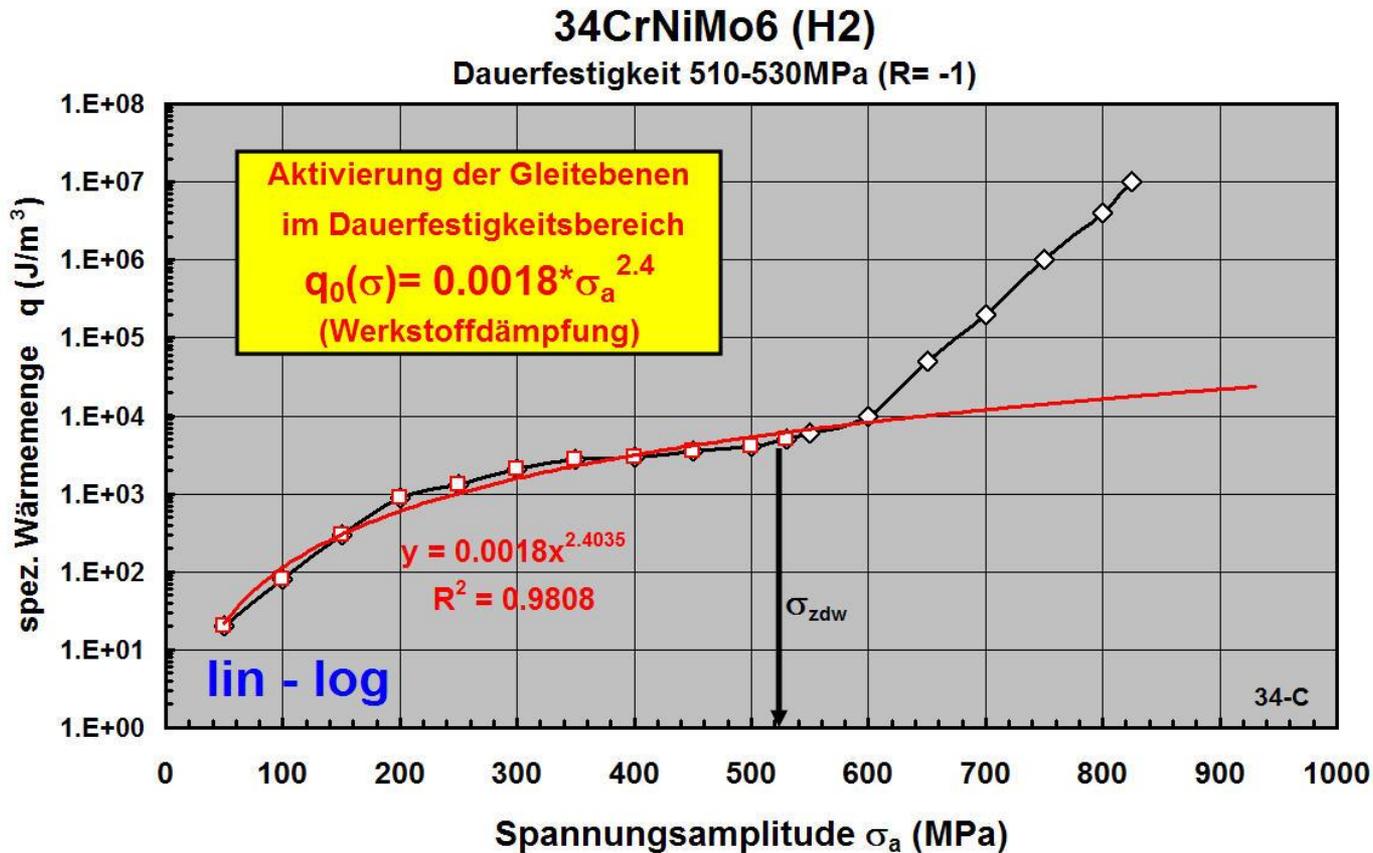
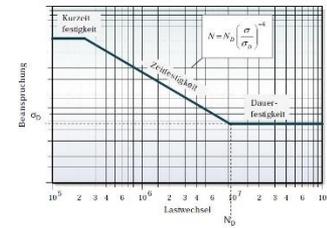
lin - log



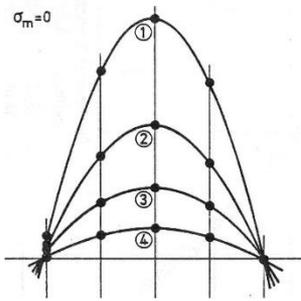
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

quantitative Thermometrie



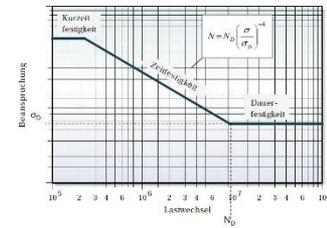
lin - log



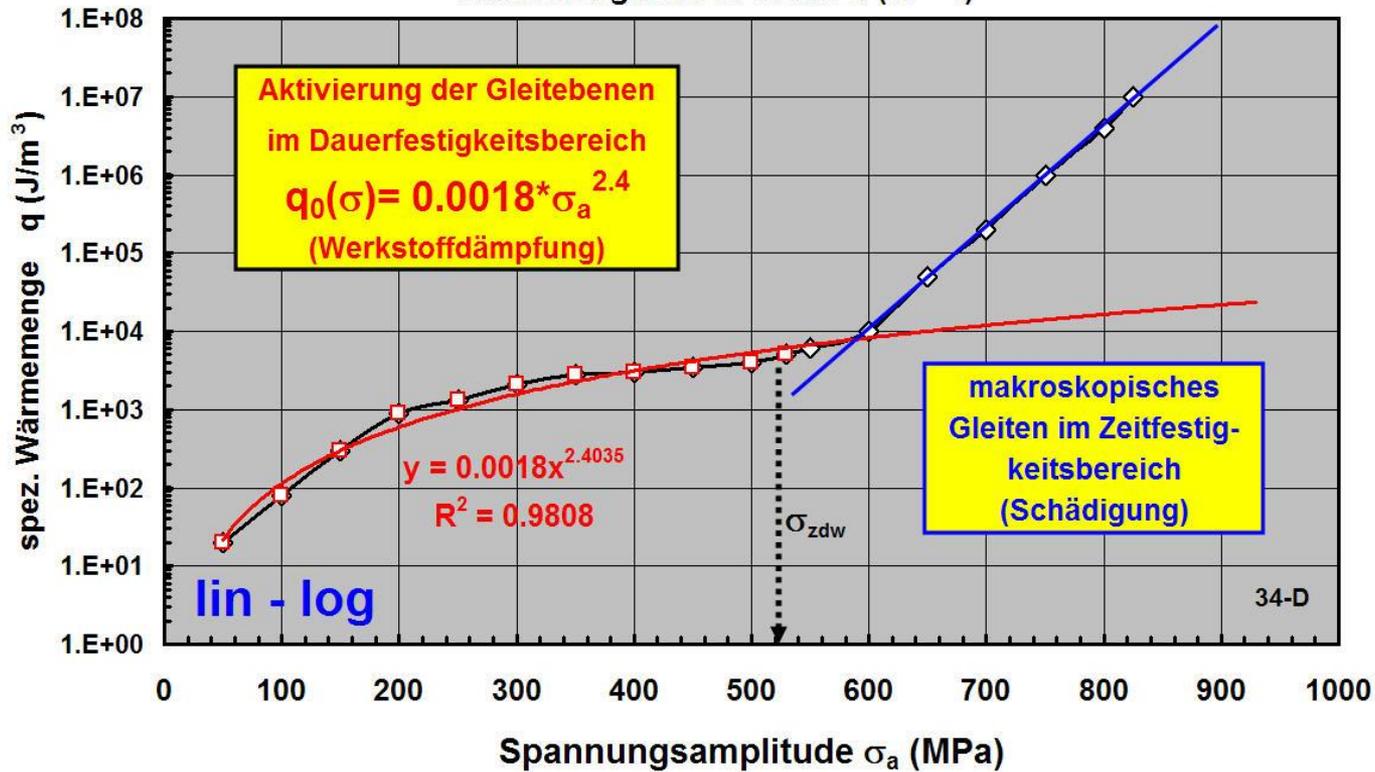
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

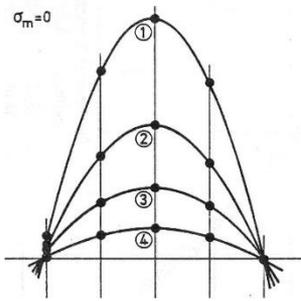
quantitative Thermometrie



34CrNiMo6 (H2)
Dauerfestigkeit 510-530MPa (R= -1)



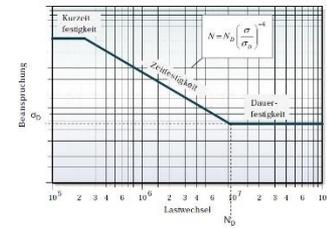
lin - log



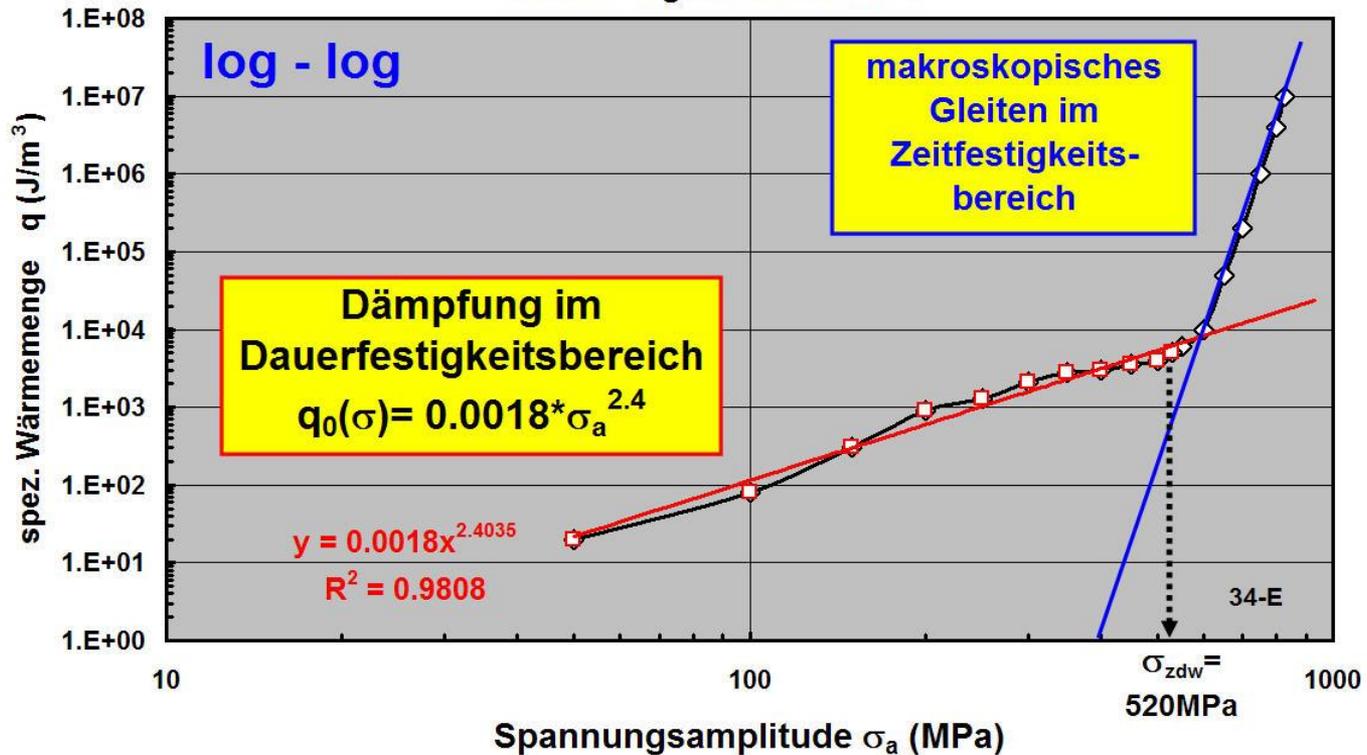
Quantitative Thermometrie

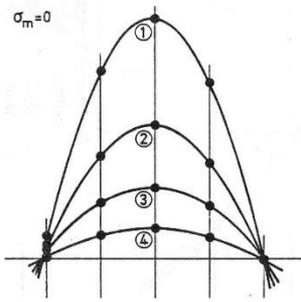
Dämpfung und Ermüdung

quantitative Thermometrie



34CrNiMo6 (H2)
Dauerfestigkeit 510-530MPa

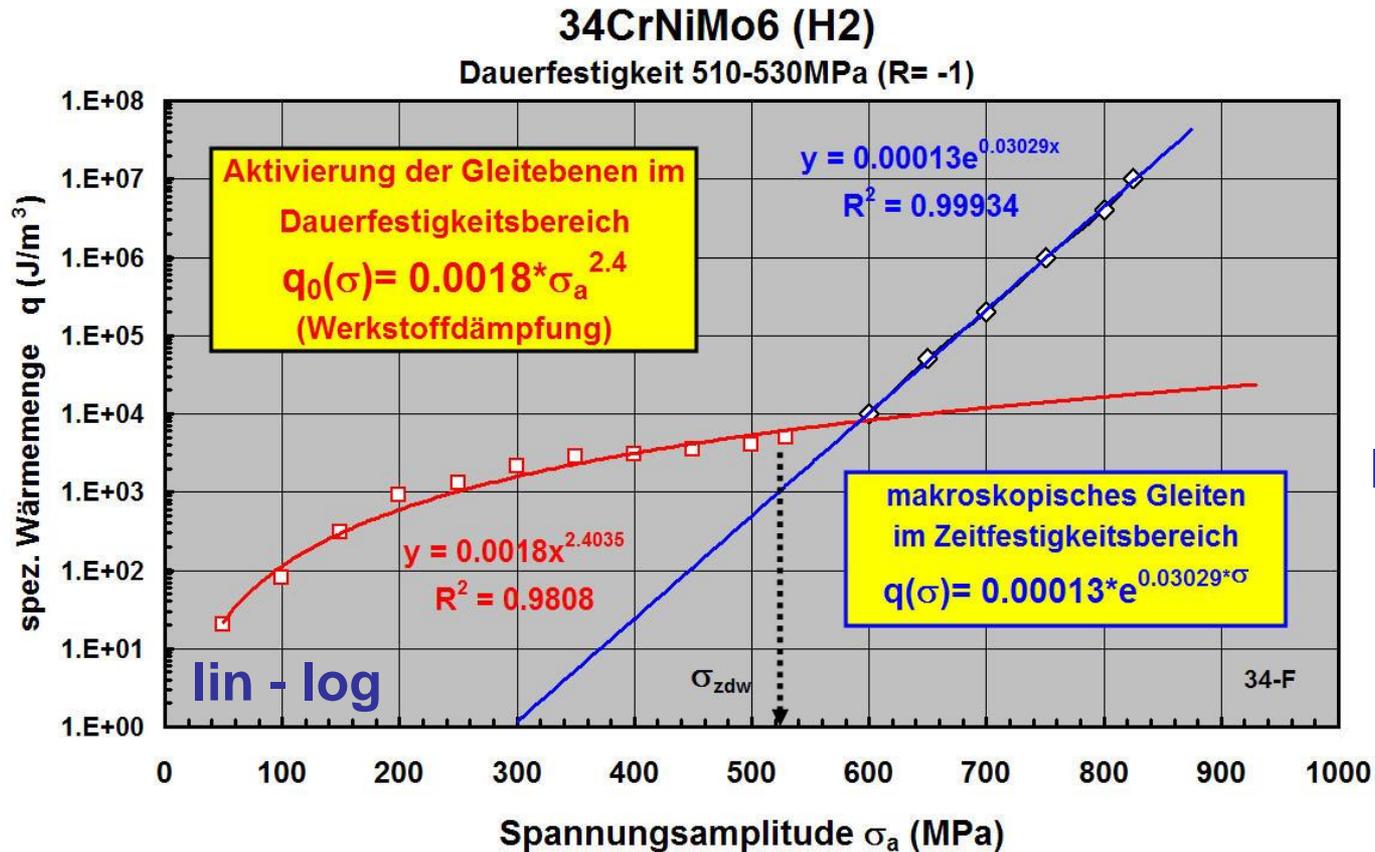
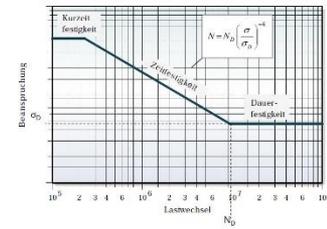


$\sigma_m = 0$ 

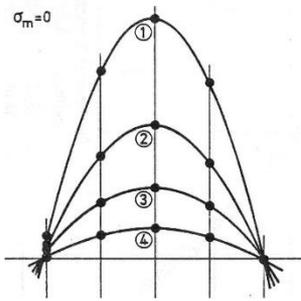
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

quantitative Thermometrie



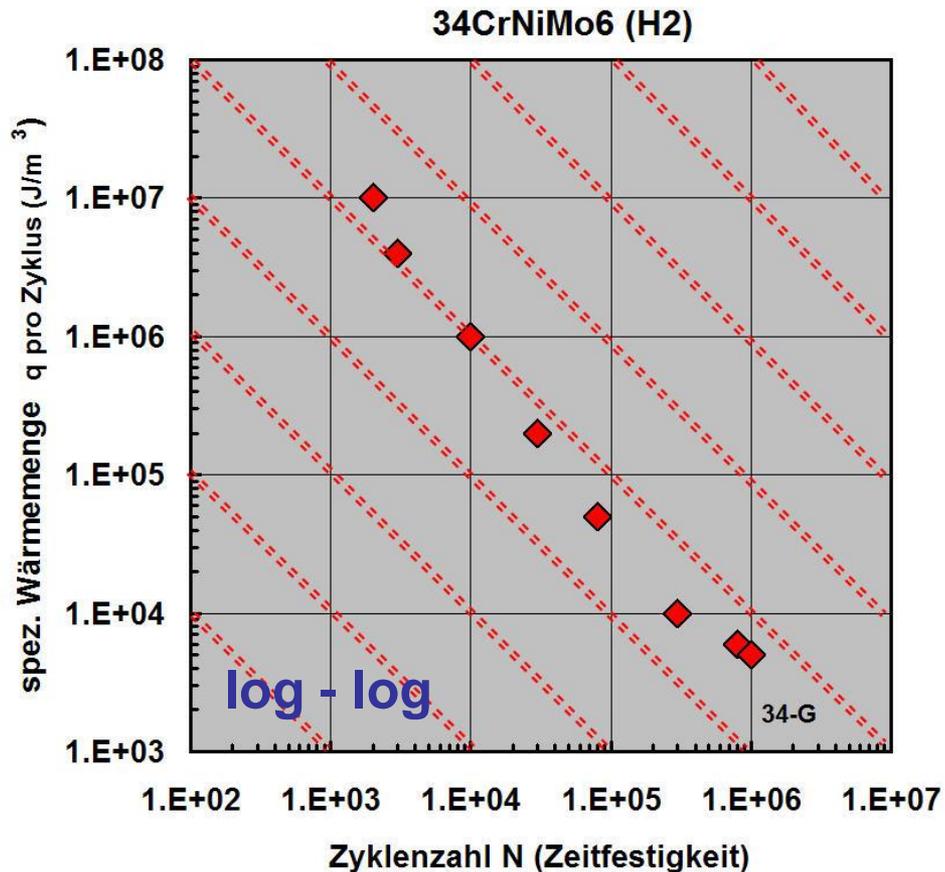
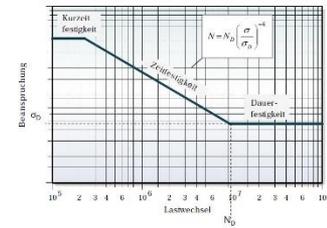
lin - log



Quantitative Thermometrie

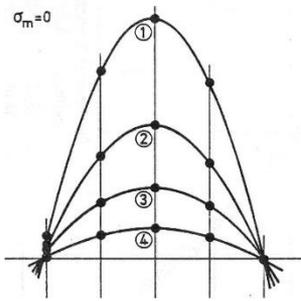
Dämpfung und Ermüdung

quantitative Thermometrie



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

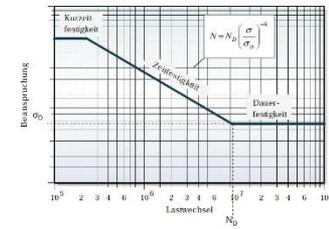
(Näherung aus
Stufenversuchen)

$\sigma_m = 0$ 

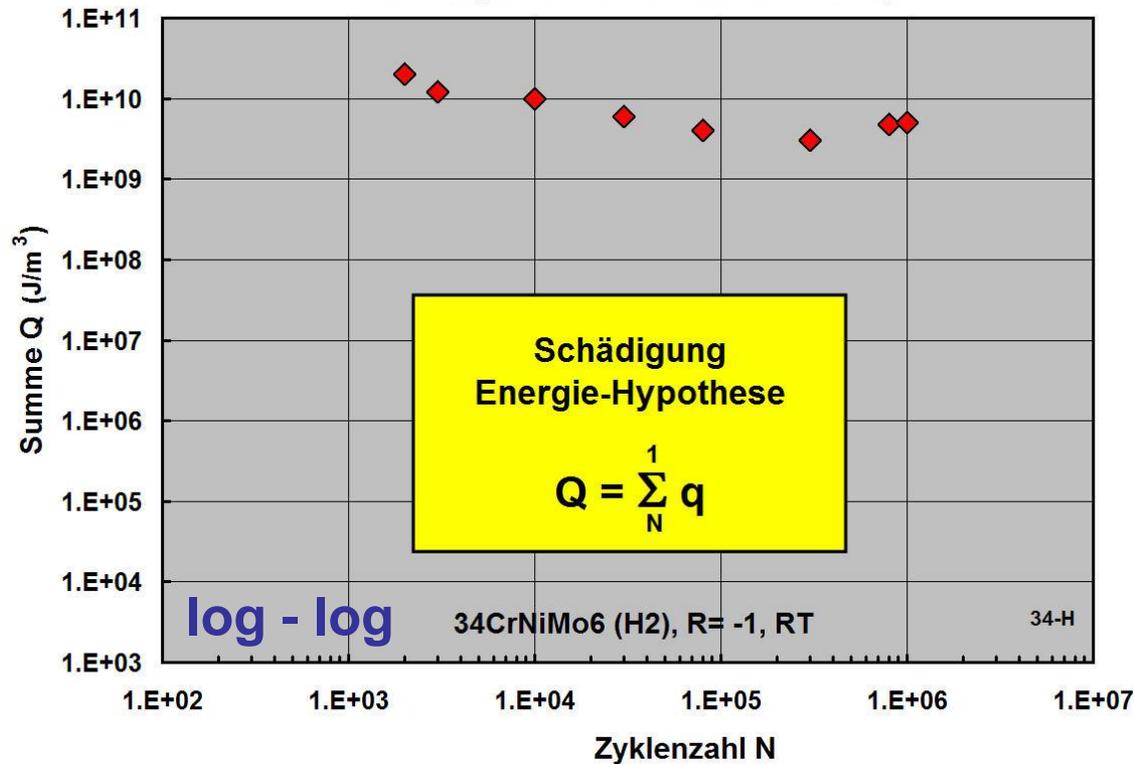
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

quantitative Thermometrie



Näherung aus Stufenversuch $Q = q \cdot N$



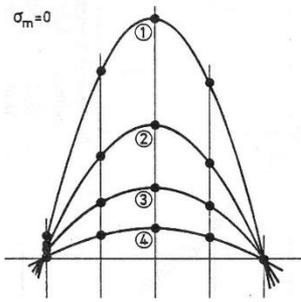
Wieviel Gesamt-
Wärmeentwicklung

Q_{ges}

bei welcher Anriss-
Lebensdauer?

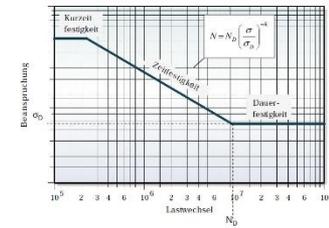
(erste Näherung aus
Stufenversuchen)

$\sigma_m = 0$



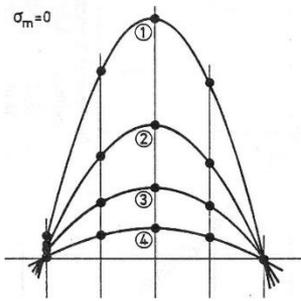
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



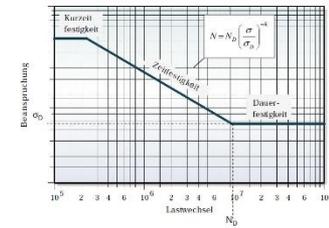
Gliederung

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



Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



Temperatur-Messtechnik (Stand 1975)

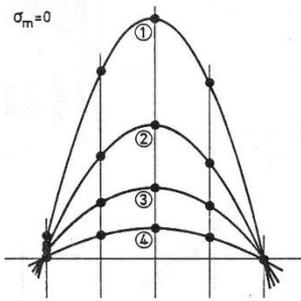
Temperatur-Messfühler

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)

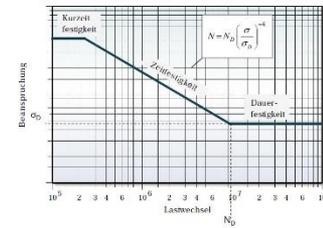
Beste Anwendung abhängig von:

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

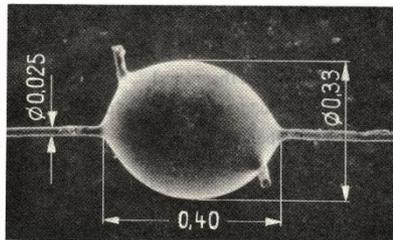


Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



Temperatur-Messtechnik

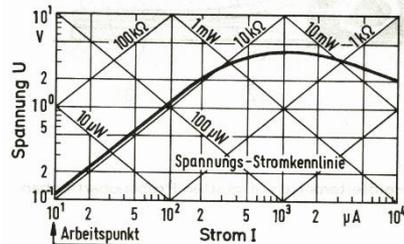


Heißleiter K 19,
Typ K 19/10 %/12 kΩ
(goldbedampft,
REM-Aufnahme)

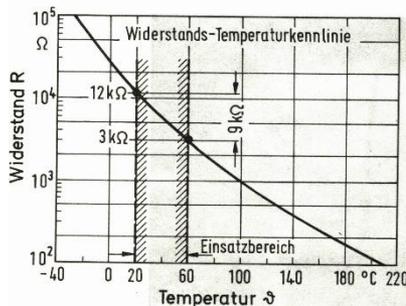
Heißleiter-Miniatur- Widerstandsfühler 12 kΩ

Konstantstrom 10-20 μA

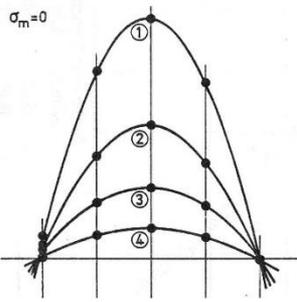
(Präzisions-Stromquelle
Digistant-Burster)



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

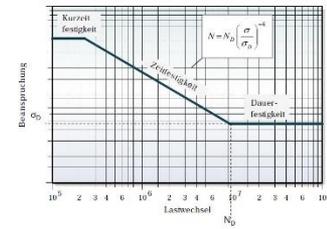


(NTC-Miniatur-
Widerstandsfühler
Negative Temperature
Coefficient, ca. 12 kΩ
bei Raumtemperatur)



Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



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

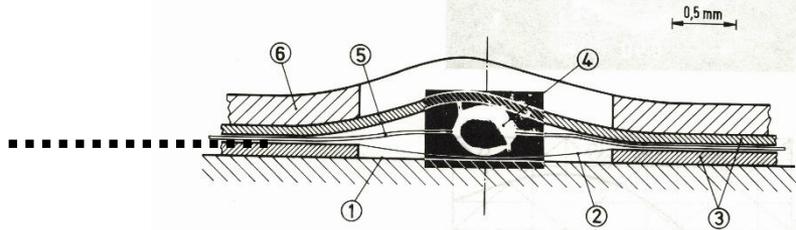


Bild 23: Applikationsaufbau der Heißleiterperle auf glatten Probenoberflächen

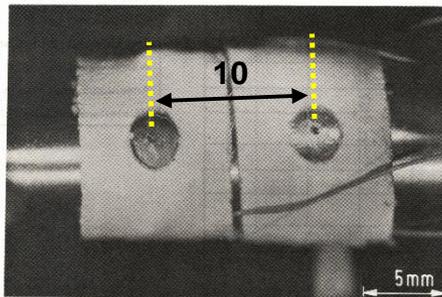
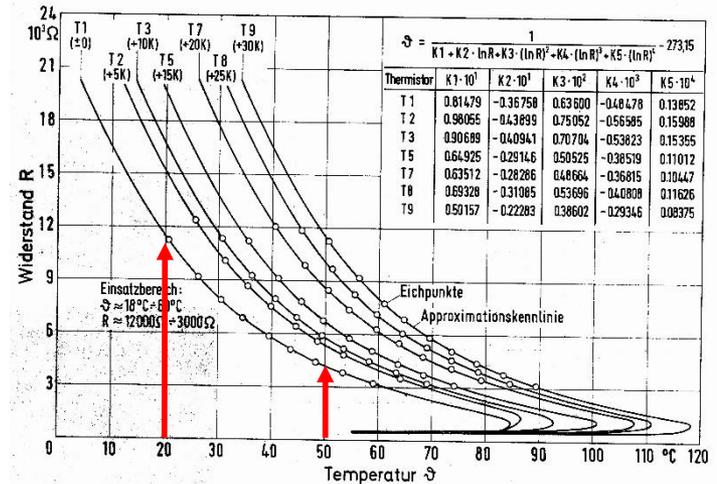


Bild 24: Zwei applizierte Thermistortemperaturfühler auf einer glatten Probe

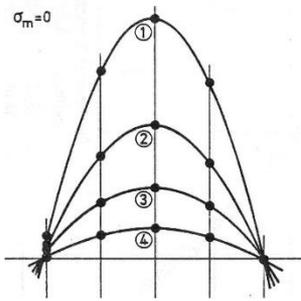
Heissleiter-Miniatur-Widerstandsfühler

individuelle Kennlinie (lnR)⁴



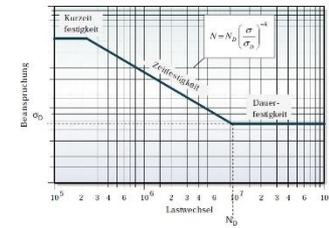
Auflösung mit NTC-Halbleitern

< 0.001 K = 1 mK

$\sigma_m = 0$ 

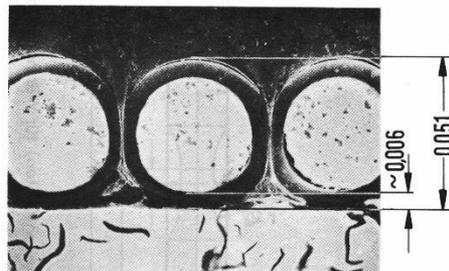
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



Temperatur-Messtechnik

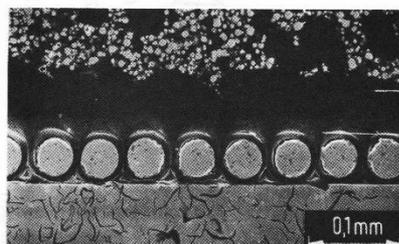
Durchmesser $d = 0,05 \pm 0,055 \text{ mm}$	Streckgrenze $\sigma_{0,2} = 140 \text{ N/mm}^2$
Isolierung: Vielschichtverfahren, Polyurethan, mod.	Zugfestigkeit $\sigma_B = 300 \text{ N/mm}^2$
Grenztemperatur $\vartheta_G = 130^\circ\text{C}$	E-Modul $E = 125.000 \text{ N/mm}^2$
Löttemperatur $\vartheta_L \approx 350^\circ\text{C}$	Bruchdehnung $\delta_5 \approx 18 \%$
	Biegeradius $r \approx d = 0,05 \text{ mm}$



Querschliff, goldbedampft (Aufnahme Rasterelektronenmikroskop, REM)

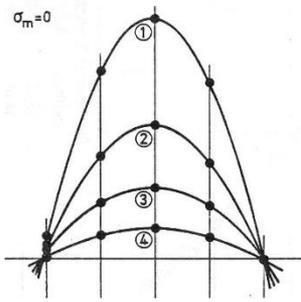
Bild 13: Kupferlackdraht für Oberflächentemperaturmessungen
(Hersteller: Fa. Synflex, Erich Hasse GmbH & Co. KG, Lügde/Westf.)

alternative
Temperaturmessung
mit Kupfer-Lackdraht-
Widerstandsfühler
(Dehnungsmessbrücke)



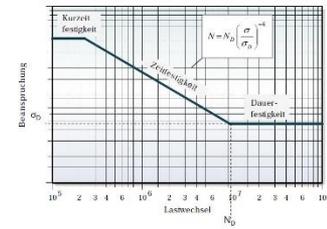
Einbettmittel
Abdeck- und Fixierlack
Kupfermeßwicklung
Grauguß GG 20

10 Windungen= 0.5 mm Breite



Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



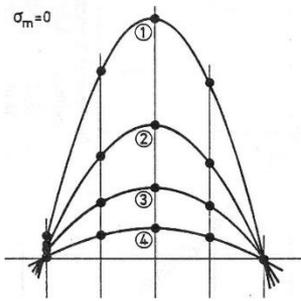
Temperatur-Messtechnik

1979:

- Kein PC
- Kein Taschenrechner
- Kein Internet
- **Dehnungsmessbrücke**
- **Millivoltmeter**
- **DEC PDP 11/23 mit Magnetband und Fortran-Programmierung**
- **Schreibmaschine**

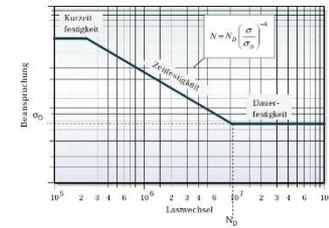
2015:

- PC mit Messinterface
- Präzisionsverstärker
- DasyLAB / LabView
- Finite elemente (FE)
- Resonanzpulser und Servohydrauliken mit PC-Steuerung
- Excel
- Internet
- Smartphone

$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



HCF-Dauerfestigkeitsbestimmung Vergleich 15 Wöhlerversuche mit einer Probe und Laststeigerungsverfahren

Einprobenverfahren

Dauerfestigkeit (RT, R= -1)

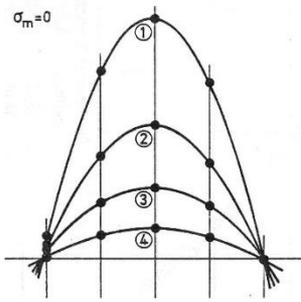
Prüfverfahren	Werkstoffe	Rein-Kupfer oxygen-free coarse grain	Grauguss lamellar GGL-20	Vergütungs- stahl (St575)	12%-Cr- Stahl (St12T)
	OF-Co	EN-GJL-200	42CrMo4	X22CrMoV121	
Wöhler (Einstufenversuche)	50 ± 5	128 ± 5	560 ± 10	495 ± 10	
Quantitative Thermometrie	55	127	560	485	
Leistungsmessung	45	102	560	500	
Temperaturmessung	52	-	550	500	
Laststeigerung (LSV)	51	132	577	479	

45-55

102-132

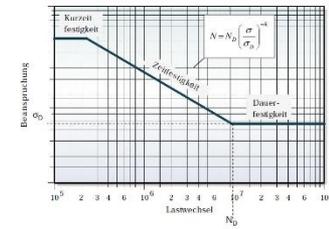
550-577

479-500

$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

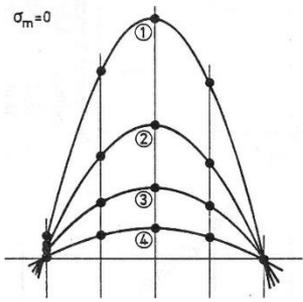


Verwendete Prüfmaschinen 1974-2015

- | | | |
|----------------------------|--------|-------------|
| • Schenck-Pulser PVT | 100 kN | 20-50 Hz |
| • Schenck-Pulser-Hydraulik | 100 kN | 0.04-0.6 Hz |
| • Amsler-Pulser | 100 kN | 85-130 Hz |
| • Rumul Testronik | 100 kN | 50-150 Hz |
| • Rumul Mikrotron | 100 kN | 80-200 Hz |
| • Rumul Gigaforte | 50 kN | 1000 Hz |
| • Schenck-Servohydraulik | 100 kN | 1-60 Hz |
| • MTS-Servohydraulik | 100 kN | 1-50 Hz |

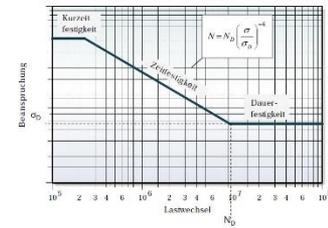
**Maximale Parabel-
temperatur ca. 50°C**

$\sigma_m = 0$



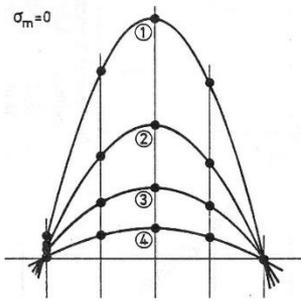
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



Gliederung

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

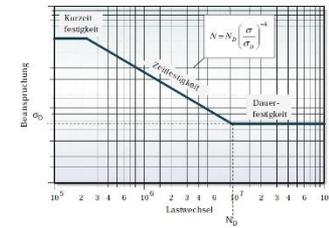


Quantitative Thermometrie

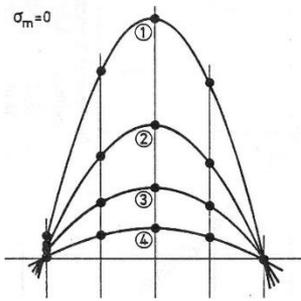
Dämpfung und Ermüdung

Ausblick aus meiner Berufszeit und 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)
- Dauerfestigkeit (schnell und genau) mit einer Probe im Laststeigerungsverfahren (LSV)

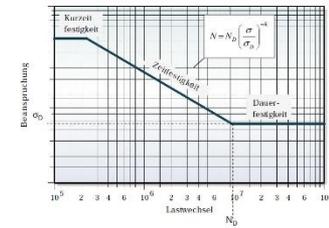


$\sigma_m = 0$



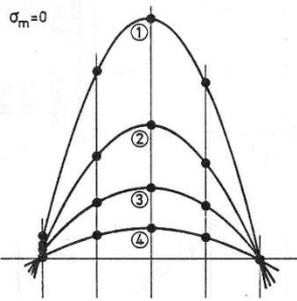
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



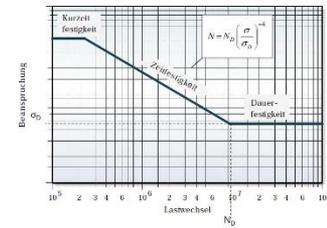
Gliederung

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

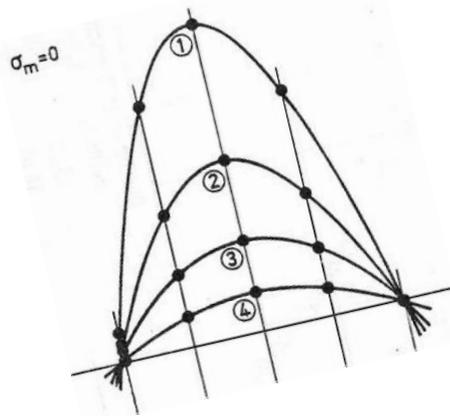


Quantitative Thermometrie

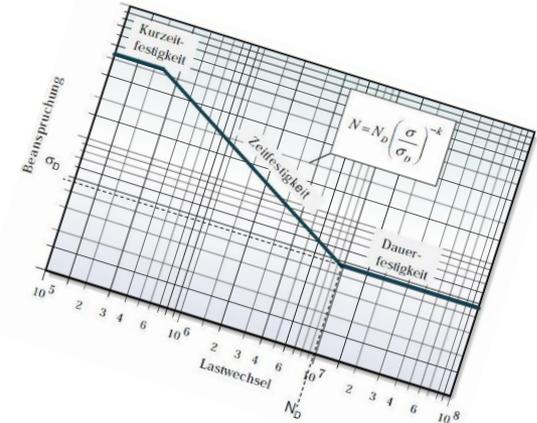
Dämpfung und Ermüdung



Vielen Dank!



Fragen?
Anregungen?
Beiträge?



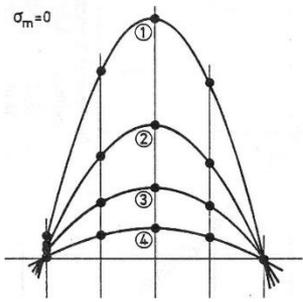
Nun sind Sie dran !!

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



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

pdf unter «Berufliches»



Quantitative Thermometrie

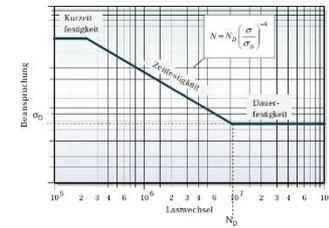
Dämpfung und Ermüdung

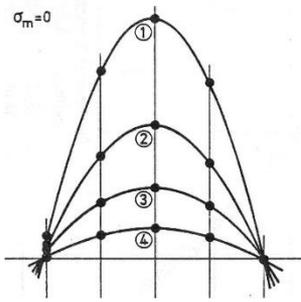
quantitative Thermometrie

Energie-Hypothese

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

- Ist „ q “ als Schadigungsparameter 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?

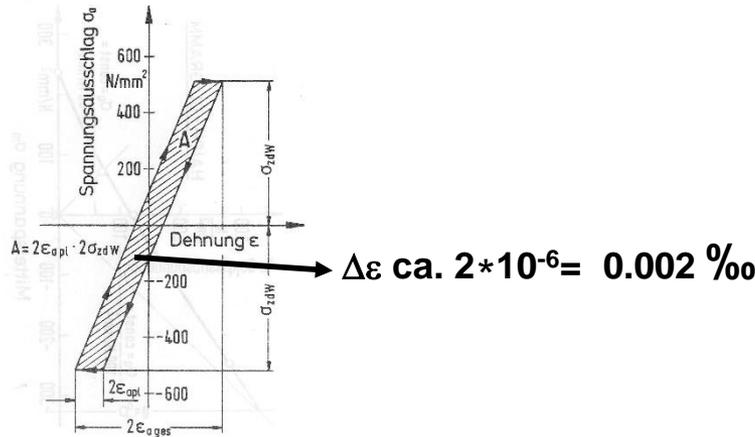
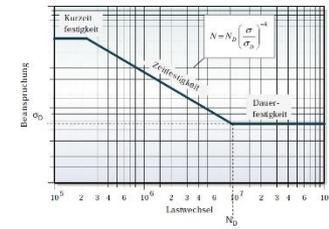


$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

Ihre Fragen, meine Fragen



HCF/VHCF

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

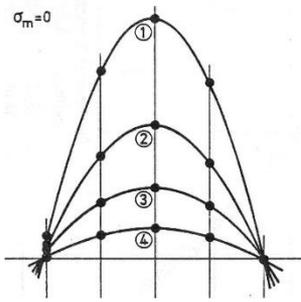
Dehnungsschwingbreite

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

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

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

$\sigma_m = 0$

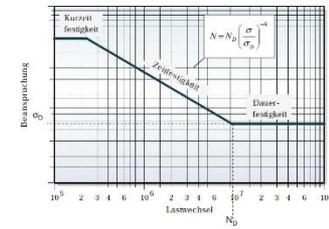


Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

quantitative Thermometrie

Ihre Fragen, meine Fragen

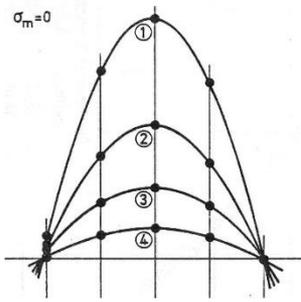


Gibt es eine Dauerfestigkeit und einen threshold-Wert?

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?

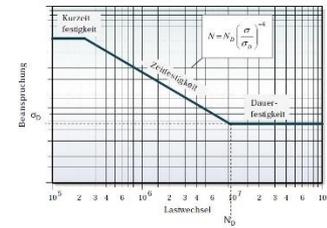


Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

quantitative Thermometrie

Ihre Fragen, meine Fragen



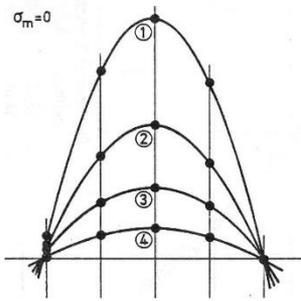
Gibt es einen Schädigungsgrenzwert q_0 bzw. die unendliche Schädigungsakkumulation?

Gibt es eine Schädigungssumme

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

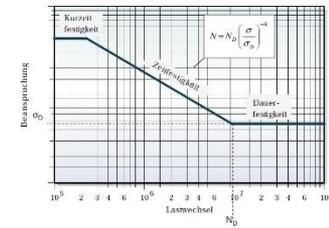
für Anriss?

Kann man aus der Wärmeentwicklung q auf eine Vorschädigung schliessen?

$\sigma_m = 0$ 

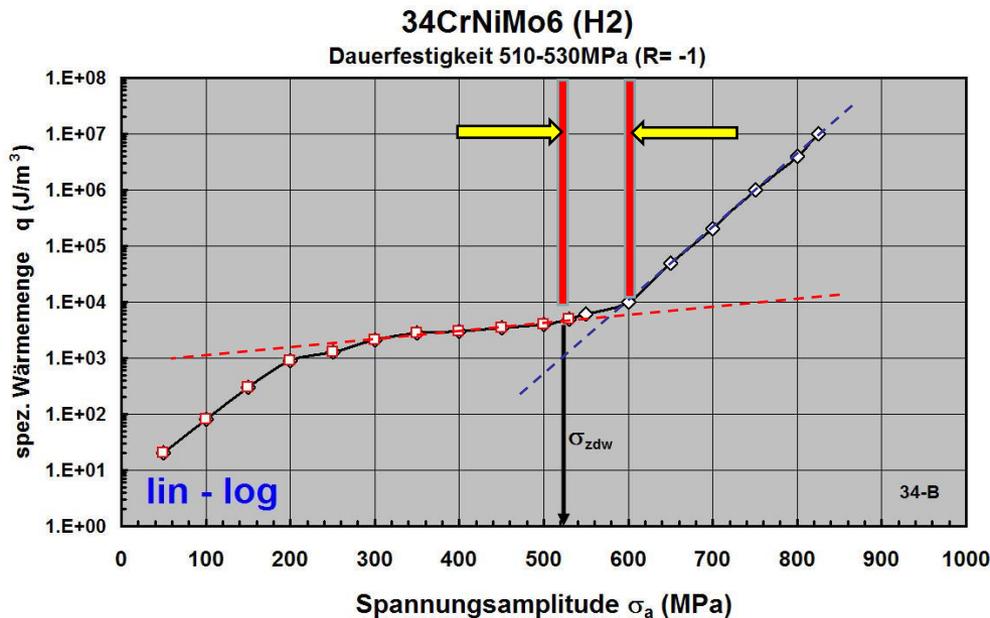
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung



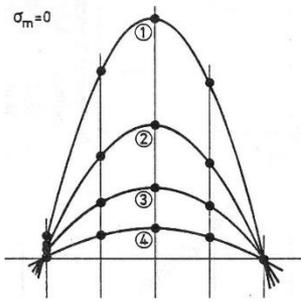
Dauerfestigkeit

Streuung im Übergangsbereich HCF- LCF



abhängig von:

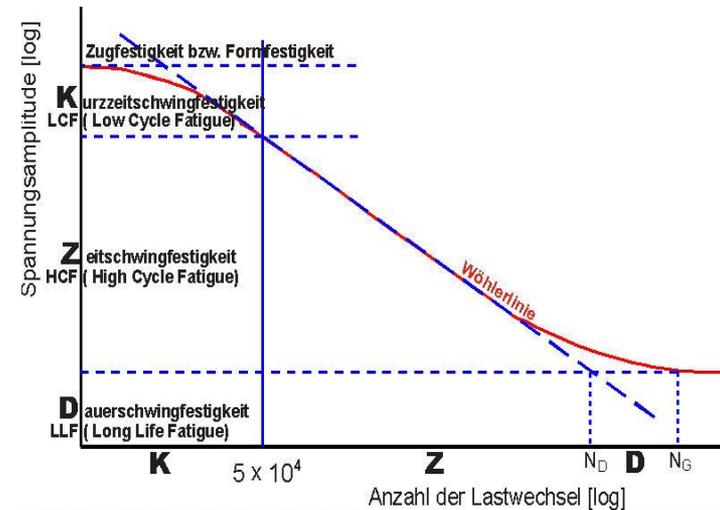
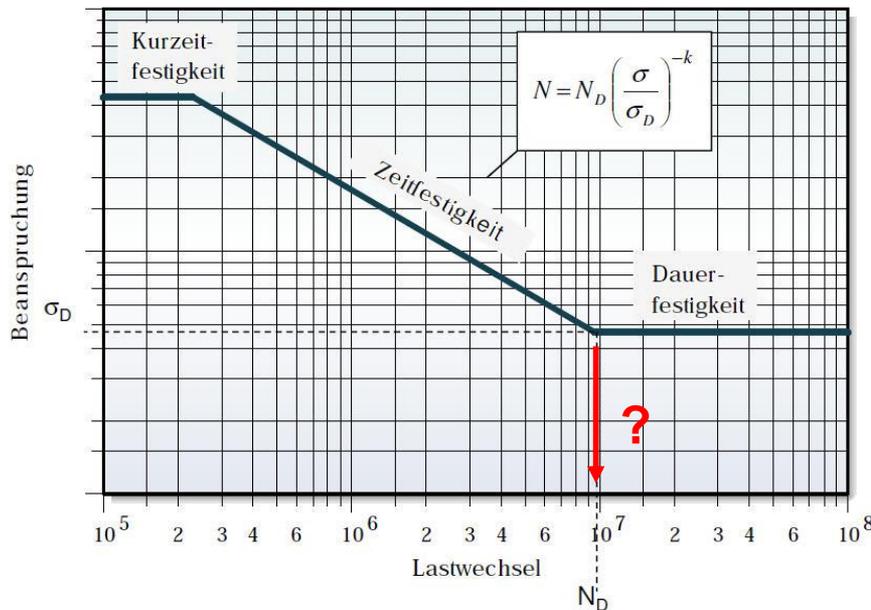
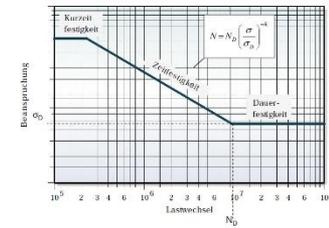
- Werkstoff-Gefüge?
- Werkstoff-Homogenität?
- Wärmebehandlung?
- Fließgrenze $R_{p0.2}$ bzw. R_e

$\sigma_m = 0$ 

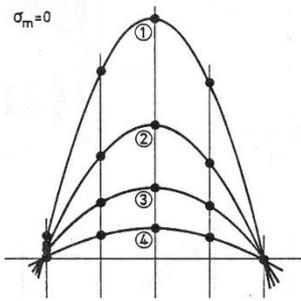
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

Wöhlerlinie, Dauerfestigkeit?



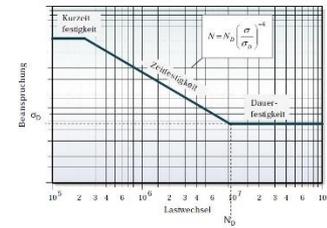
- Gibt es eine Dauerfestigkeit? Wenn ja, wieso?
- Bei wieviel Lastwechseln ist der Übergang von zeit- zu dauerfest?
- Ist der Übergang werkstoffabhängig?



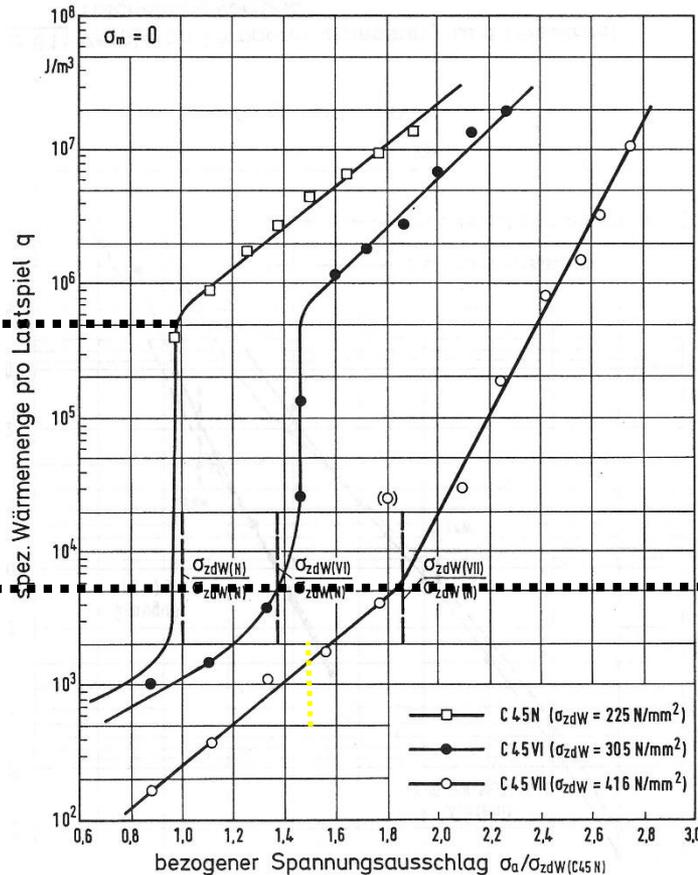
Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

quantitative Thermometrie

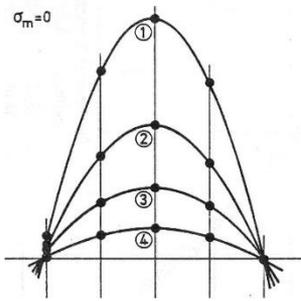


2 Dekaden



ca. 5000 J/m³

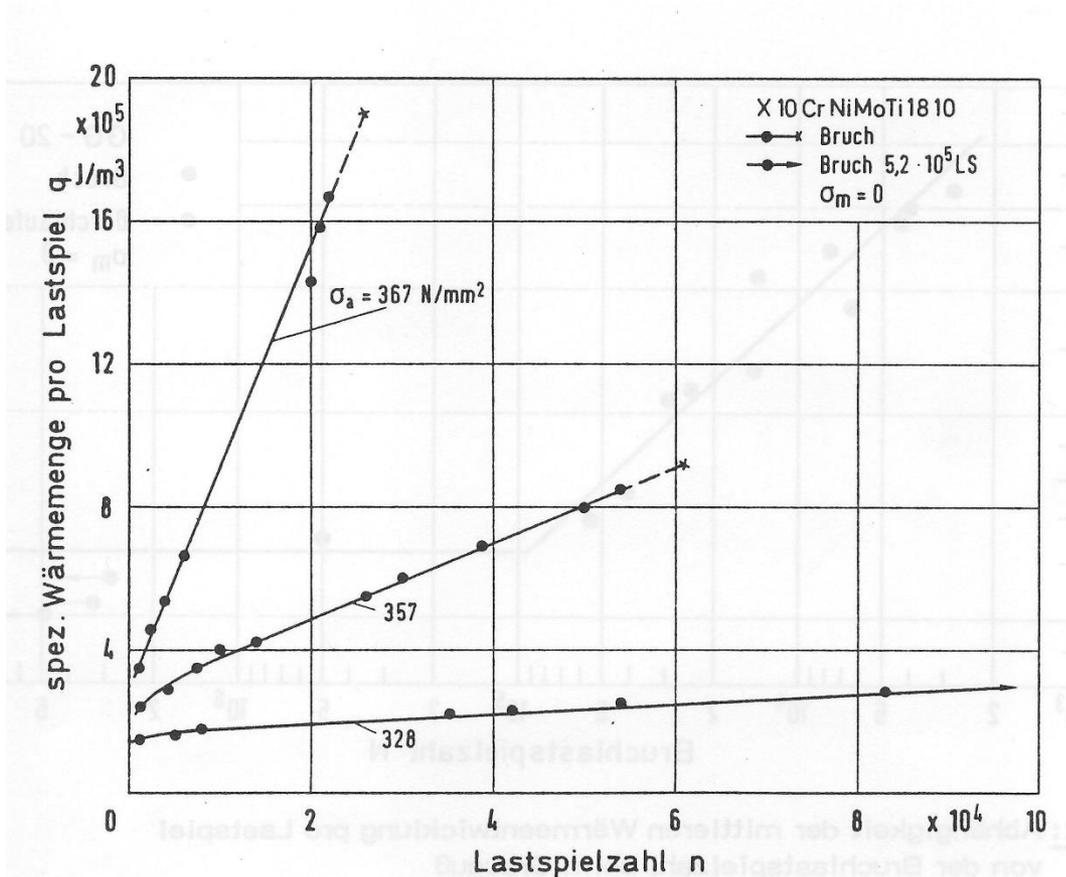
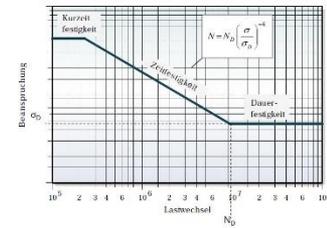
Abhängigkeit
von der
Wärmebehandlung
bzw. Festigkeit beim
Ck45



Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

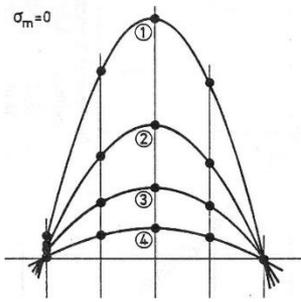
quantitative Thermometrie



Abhängigkeit von der Zyklenzahl im Zeitfestigkeitsgebiet

(Dauerfestigkeit ca. 310 MPa)

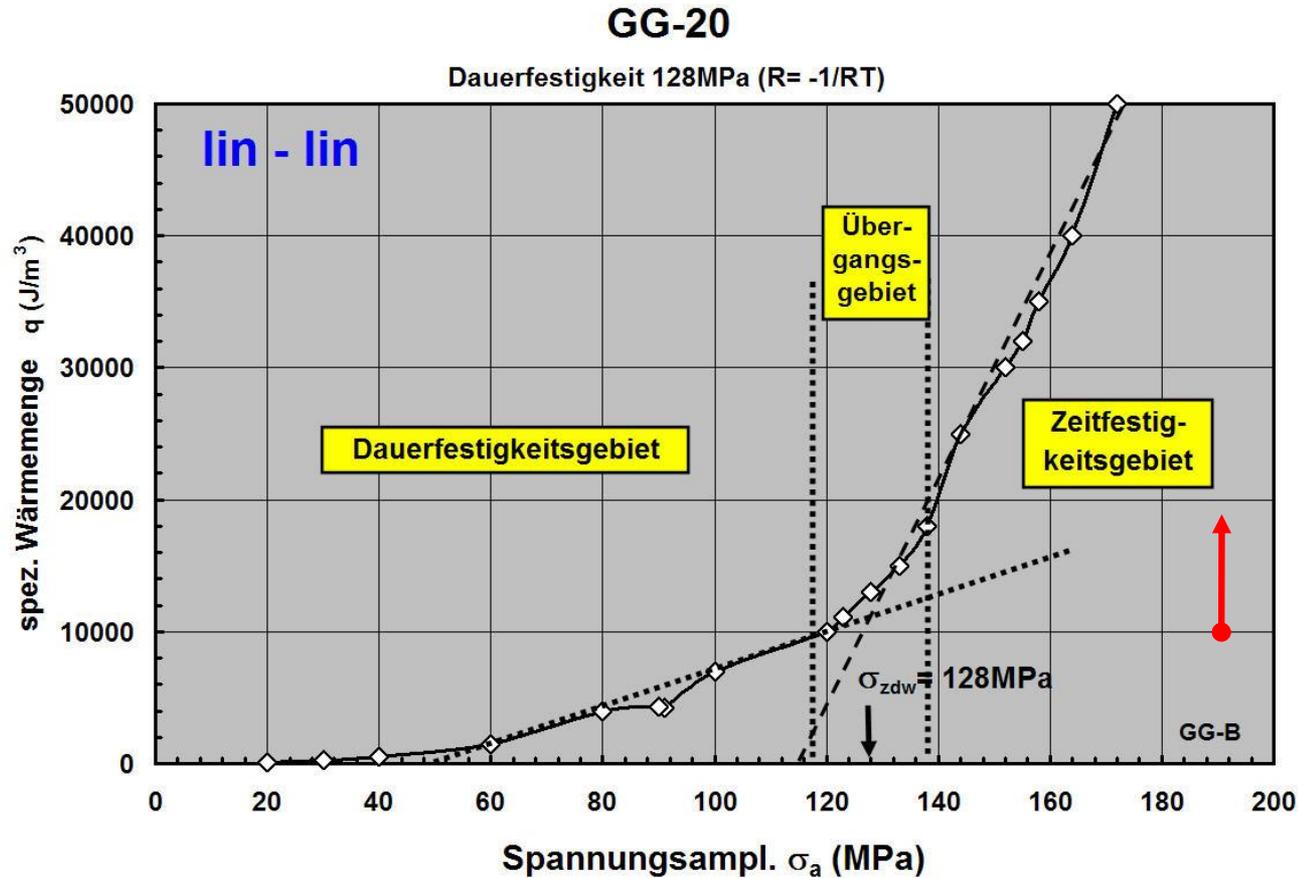
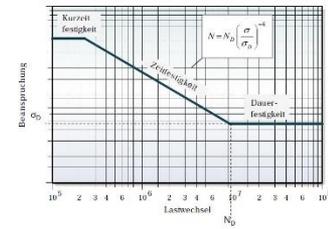
Anwendung:
 Kurzzeitbestimmung der Dauerfestigkeit im Laststeigerungsversuch (LSV)
 Reihenfolgeeffekt

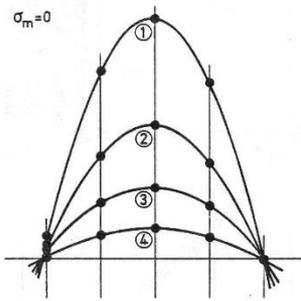
$\sigma_m = 0$ 

Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

quantitative Thermometrie

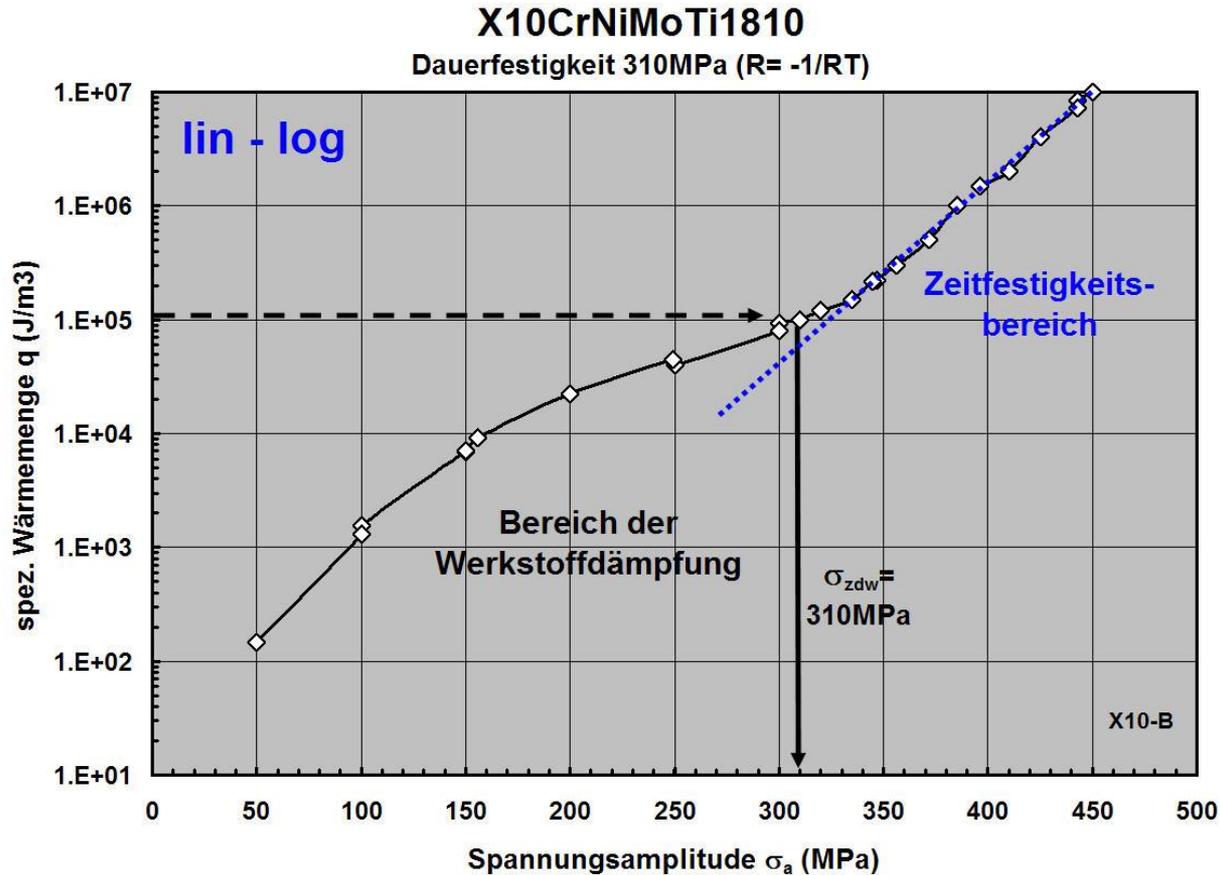
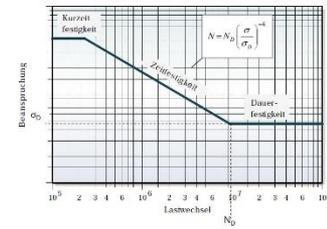




Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

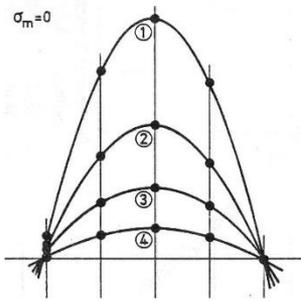
quantitative Thermometrie



hoch-
dämpfender
Austenit

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

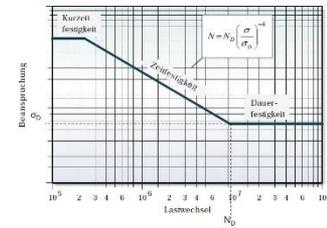
$\sigma_m = 0$



Quantitative Thermometrie

Dämpfung und Ermüdung

quantitative Thermometrie



X10CrNiMoTi1810
Dauerfestigkeit 310MPa (R= -1/RT)

