

# Untersuchung metallischer Werkstoffe mit thermometrischen Methoden

Von Karl Kussmaul, Stuttgart, und Klaus Stärk, Baden/Schweiz

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Heinrich Wiegand zur Vollendung seines 75. Lebensjahres gewidmet

## Examination of metallic materials with thermometric methods

## Essais des matériaux métalliques dans méthodes thermométriques

Die irreversible Formänderungsarbeit als eine wesentliche Kenngröße für die Ermüdung der metallischen Werkstoffe bei Schwingbeanspruchung läßt sich mit Hilfe einer genauen Analyse der Temperaturverteilung der beanspruchten Probe ermitteln. Als Meßfühler wurden Kupferdrahtwicklungen und Heißleiter (Thermistoren) eingesetzt.

Manuskript-Eing. 22. Juni 1981

### 1. Einführung

Aussagen zum Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe bei schwingender Beanspruchung basieren im wesentlichen auf der Größe der je Schwingspiel aufgetragenen Spannungsschwingbreite bzw. auf der Auswertung von Spannungs-Dehnungs-Messungen. Auswertungen von zyklischen Spannungs-Dehnungsverläufen ergeben als Grundlage für die Werkstoffbeanspruchung zusätzlich die elastischen und plastischen Dehnungsschwingbreiten, die Hysterisisfläche und spezielle Schädigungsparameter. Die Hysterisisfläche (Fig. 1), als Maß für die irreversible Formänderungsarbeit, entsteht als Folge aller im örtlichen Werkstoffvolumen ablaufenden mikroskopischen und makroskopischen plastischen Wechselverformungen.

Als kennzeichnende Größe für die Werkstoffbeanspruchung wird die irrever-

sible Formänderungsarbeit kaum genutzt, da u.a. ihre Ermittlung bei kleinen und kleinsten Hysterisisflächen mit den derzeit bekannten Meß- und Versuchstechniken kaum oder nur sehr ungenau möglich ist. Da die irreversible Formänderungsarbeit praktisch vollständig in Wärme dissipiert, schien mit Hilfe der Thermometrie eine genaue quantitative Bestimmung der bei einer gegebenen Werkstoffbeanspruchung pro Volumeneinheit und pro Schwingspiel erzeugten Wärmemenge möglich.

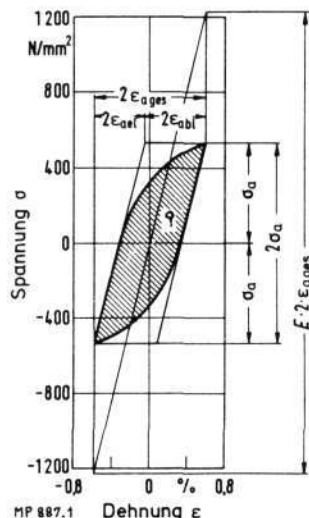


Fig. 1: Hysterisischleife und irreversible Formänderungsarbeit  $q$  für 1 Schwingspiel bei Zug-Druck-Wechselbeanspruchung

### 2. Temperaturänderungen mechanisch beanspruchter Proben

#### 2.1. Thermoelastischer Effekt

Der thermoelastische Effekt, schon im 19. Jahrhundert von Thomson [1] untersucht, beschreibt die spannungssynchrone Temperaturänderung metallischer Werkstoffe bei elastischer Beanspruchung. In einem adiabatischen System erhält man im wesentlichen aufgrund der Dichteänderung des beanspruchten Volumenelementes

$$\Delta T = - \frac{\alpha_1 T_0}{c \varrho} \Delta \sigma = - \frac{\alpha_1 T_0 E}{c \varrho} \cdot \Delta \epsilon \quad (1)$$

( $\alpha_1$  linearer Wärmeausdehnungskoeffizient,  $T_0$  absolute Temperatur,  $E$  Elastizitätsmodul,  $c$  spez. Wärmekapazität,  $\varrho$  Dichte).

Diese zyklische Temperaturänderung überlagert sich bei Schwingbeanspruchung den Änderungen der mittleren Proben temperatur (Wärmetönungen) aus plastischen Verformungen.

#### 2.2. Dissipation

Rein elastische Beanspruchungen sind nur bei fehlerfreiem Kristallaufbau denkbar. Der Realkristall und vor allem der für die praktische Materialprüfung interessante polykristalline Zustand der technischen Metalle weist zahllose Gitterbaufehler auf, die schon bei kleinsten Beanspru-

chungen örtliche mikroskopische und submikroskopische plastische Verformungen bewirken. Diese Vorgänge, die makroskopisch u.U. nicht in Erscheinung treten, führen zu einer Energiedissipation, d. h. zu einer praktisch vollständigen Überführung der irreversiblen Formänderungsarbeit in Wärme und damit zu nachweisbaren Temperaturänderungen der Probe oder des Bauteils [2; 3]. Zur Ermittlung der in einem zyklisch beanspruchten Werkstoffvolumen vorhandenen Wärmequellen sind genaue Temperaturmeßverfahren erforderlich und möglichst überschaubare Verhältnisse anzustreben:

- makroskopisch homogener (nicht unbedingt auch isotroper) Werkstoffzustand
- makroskopisch homogene Beanspruchung.

Während der homogene Werkstoffzustand durch Herstellung und Verarbeitung sichergestellt werden kann, wird eine homogene Beanspruchung durch eine rein axial beanspruchte Probe ermöglicht, die im Bereich der z. B. zylindrischen Meßlänge eine homogene Verteilung gleicher Wärmequellen gewährleistet. Durch zusätzliche radiale Wärmeisolation läßt sich in gut wärmeleitenden Werkstoffen (wie den Metallen) ein eindimensionaler Wärmestrom in axialer Probenrichtung erzwingen. Nach den Gesetzen der Thermodynamik entspricht die Temperaturverteilung in der Probe der einer ebenen Wand mit Wärmequellen.

### 2.3. Kurzzeitbeanspruchung mit instationärer Temperaturverteilung

Wird eine Probe innerhalb weniger Sekunden mit nur wenigen Schwingspielen belastet, erhält man nach der Beanspruchung in der Probenmitte für eine kurze Zeitspanne eine konstante Temperaturerhöhung, Fig. 2. Die pro Schwingspiel in Wärme umgewandelte spezifische Verlustarbeit ergibt sich zu

$$q = \frac{\rho c}{n} \Delta \vartheta_{\text{ges}} \quad (2)$$

( $n$  Anzahl der aufgetragenen Schwingspiele,  $\Delta \vartheta_{\text{ges}}$  gemessene Gesamttemperaturerhöhung).

### 2.4. Kurzzeitbeanspruchung mit stationärer bzw. quasistationärer Temperaturverteilung

Ist durch gute Wärmeleitfähigkeit des Probenwerkstoffs und durch radiale Isolation eine rein axiale Wärmeleitung in der Probe gewährleistet, fließt die im Werk-

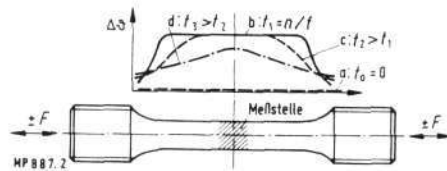


Fig. 2: Stadien der Temperaturverteilung in einer mit gleichmäßig verteilten Wärmequellen kurzzeitig erwärmten Probe (schematisch)

- konstante Temperatur über der Probe vor der Belastung
- Temperaturverteilung nach einem oder mehreren sehr schnell mit der Frequenz  $f$  ausgeführten Schwingspiel(en)
- beginnender Wärmeabfluß über die Einspannteile
- fortgeschrittener Wärmeabfluß über die Einspannteile

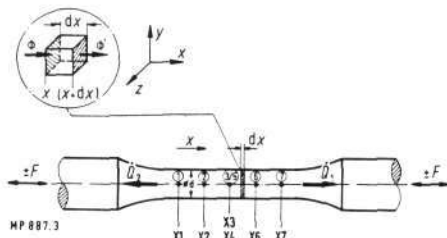


Fig. 3: Meßstellenanordnung bei einer zylindrischen Probe mit gleichmäßig verteilten Wärmequellen

stoff entstehende Wärme vollständig über die Einspannenden der Probe ab. Für den sich nach einiger Beanspruchungsdauer einstellenden stationären Betriebszustand vereinfacht sich die Wärmequellenberechnung (s. Fig. 3) zu

$$\phi(x) = -\lambda \frac{d\vartheta}{dx} = \Phi$$

und

$$\phi' - \phi = \dot{q} dx \quad (3)$$

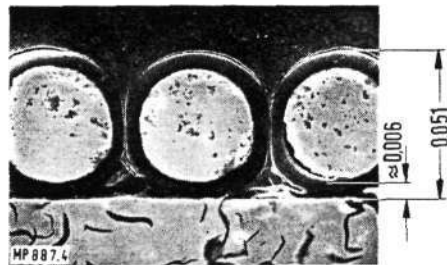


Fig. 4: Kupferlackdraht für Oberflächentemperaturmessungen<sup>1)</sup>

Querschliff auf GG-20 goldbedampft  
 Durchmesser  $d = 0,05 \div 0,055$  mm  
 Isolierung: Vielschichtverfahren, Polyurethan, mod.  
 Grenztemperatur  $\vartheta_{\text{G}} = 130$  °C  
 Löttemperatur  $\vartheta_{\text{L}} \approx 350$  °C  
 Streckgrenze  $R_{\text{pl},2} = 140$  N/mm<sup>2</sup>  
 Zugfestigkeit  $R_{\text{m}} = 300$  N/mm<sup>2</sup>  
 E-Modul  $E = 125000$  N/mm<sup>2</sup>  
 Bruchdehnung  $A_5 \geq 18\%$   
 Biegeradius  $r \geq d = 0,05$  mm

<sup>1)</sup> Hersteller: Fa. Synflex, Erich Hasse GmbH & Co. KG, Lügde/Westf.

Man erhält für die Ergiebigkeit der Wärmequellen:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{d^2\vartheta}{dx^2} \quad (4)$$

und hieraus für temperaturunabhängige Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  als Lösung die parabolförmige Temperaturverteilung über der zylindrischen Meßlänge

$$\vartheta(x) = -\frac{\dot{q}}{2\lambda} x^2 + \alpha x + b. \quad (5)$$

Mit Hilfe von Temperaturmessungen an vier definierten Stellen der schwingend beanspruchten Probe und der Kenntnis der Prüffrequenz  $f$  ergibt sich die pro Volumelement in Wärme umgewandelte Formänderungsarbeit zu

$$q = 2\lambda \frac{(\vartheta_1 - \vartheta_2)(x_6 - x_7) + (\vartheta_6 - \vartheta_7)(x_2 - x_1)}{(x_2 - x_1)(x_6 - x_7)(x_1 - x_6 + x_2 - x_7)f} \quad (6)$$

### 2.5. Langzeitbeanspruchung mit quasistationärer Temperaturverteilung

Gl. (6) ist sowohl für Kurzzeitversuche, d. h. für Versuche mit stufenweise veränderten Beanspruchungen, als auch für Langzeitversuche zur Ermittlung der schwingenspielzahlabhängigen Veränderungen der irreversiblen Formänderungsarbeit gültig. Auf jeder Laststufe muß vor der Meßwertfassung ein stationärer bzw. quasistationärer Temperaturzustand erreicht sein; die Einstellzeit ist vor allem von der Wärmeleitfähigkeit des Probenwerkstoffes abhängig.

## 3. Temperaturmeßverfahren

Grundlegende Voraussetzung für die Anwendung thermometrischer Verfahren sind genaue Temperaturmessungen. Bei der gewählten direkten Meßmethode an der schwingbeanspruchten Probe kamen zwei parallel verfolgte und dem Meßproblem speziell angepaßte Meßfühler zum Einsatz:

- Kupferlackdrahtwicklungen von je 10 Windungen mit einer axialen Integrationsbreite von 0,5 mm (Fig. 4) sowie
- Heißleiter (Thermistoren) mit ca. 0,4 mm Durchmesser (Fig. 5).

Beide Meßfühler erlaubten Temperaturdifferenzmessungen mit einer Auflösung besser als 0,01 K. Insbesondere die Thermistoren ermöglichten genaue und zuverlässige Messungen, nachdem die Kennlinien in einer Eichung im applizierten Zustand individuell mit Hilfe einer Approxi-

mation ermittelt und die gesamte Versuchsauswertung mit einem Rechner (pdp 11/50) ausgeführt wurde. Da nur Differenzmessungen, einmal zwischen verschiedenen  $x$ -Koordinaten auf der Probe sowie auch zwischen der Nullmessung bei unbeanspruchter Probe und dem jeweiligen stationären Betriebszustand, erforderlich sind, wird die Genauigkeit und die quantitative Ermittlung der Wärmemengen pro Schwingspiel gegenüber anderen Verfahren wesentlich verbessert [4].

#### 4. Werkstoffe und Untersuchungsprogramm

Zur prinzipiellen Erprobung und Absicherung der vorgeschlagenen thermometrischen Prüfmethode und Temperaturmeßverfahren wurden folgende Untersuchungen bei Raumtemperatur und in spannungskontrollierten Versuchen (in Klammern die eingesetzten Werkstoffe) vorgenommen:

- statische und zyklische Spannungs-Dehnungs-Messungen (Grauguß GG-20, Austenit X10 CrNiMoTi 1810 und Vergütungsstahl 34 CrNiMo 6),
- Hysteresisflächenauswertungen (GG-20, X10 CrNiMoTi 1810 und Kohlenstoffstahl C45 in 3 Wärmebehandlungszuständen),
- Messung des thermoelastischen Effektes (GG-20 und X10 CrNiMoTi 1810),
- Messung der spezifischen Wärmemenge (bzw. der irreversiblen Formänderungsarbeit) pro Schwingspiel bei Kurzzeitbeanspruchung mit instationärer Temperaturverteilung (GG-20 und X10 CrNiMoTi 1810),
- Messung der spezifischen Wärmemenge pro Schwingspiel in Stufenversuchen bei (quasi-)stationärer Kurzzeitbeanspruchung zur Überprüfung der Temperaturparabel und den Parametern, Spannungsausschlag (GG-20, X10 CrNiMoTi 1810, 34CrNiMo6, C45, warmfester Kesselbaustahl 13 CrMo 44), Probenquerschnitt (GG-20), Prüffrequenz (GG-20, X10 CrNiMoTi 1810, 34 CrNiMo 6), Mittelspannung (GG-20, X10 CrNiMoTi 1810), Zeitstandvorbeanspruchung (13 CrMo 44), Vorbelastung (13 CrMo 44, GG-20, X10 CrNiMoTi 1810, C45), Formzahl bei der Übertragung auf gekerbte Proben (X10 CrNiMoTi 1810),
- Messung der Veränderung der spezifischen Wärmemenge pro Schwingspiel

in (quasi-)stationären Langzeitschwing-(Wöhler-)versuchen (GG-20, X10 CrNiMoTi 1810).

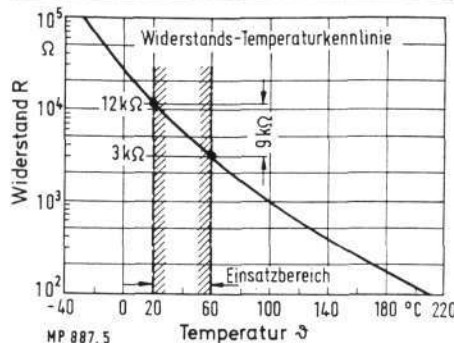
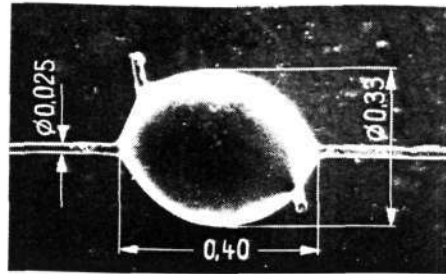


Fig. 5: Genutzter Einsatzbereich des Heißleiters K 19<sup>2)</sup> zur Temperaturmessung

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  $25\ \mu\text{m}\ \varnothing$   
 Halbleitoberfläche: glasbedampft

<sup>2)</sup> Hersteller: Firma Siemens AG

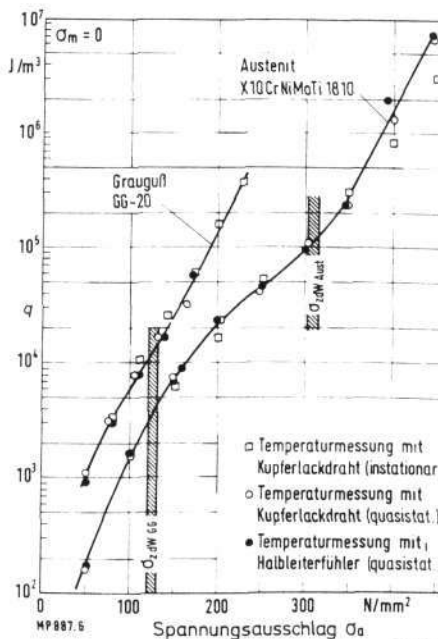


Fig. 6: Vergleich der Ergebnisse bei verschiedenen Meßverfahren

## 5. Ergebnisse

### 5.1. Thermoelastischer Effekt bei zügiger Beanspruchung

Im makroskopisch elastischen Verformungsbereich unterhalb der Dauerschwingfestigkeit der Werkstoffe erhält man eine zur Beanspruchung um  $180^\circ$  phasenverschobene Temperaturänderung von

$$\frac{\Delta\vartheta}{\Delta\sigma} = -1,22 \cdot 10^{-3}\ \text{K}/(\text{N}/\text{mm}^2)$$

beim Austenit X10 CrNiMoTi 1810 und

$$\frac{\Delta\vartheta}{\Delta\sigma} = -0,87 \cdot 10^{-3}\ \text{K}/(\text{N}/\text{mm}^2)$$

beim Grauguß GG-20, die gut mit den von Harig [5] durchgeführten Untersuchungen und den dort angegebenen Werten übereinstimmen. Beide Temperaturmeßverfahren bewiesen ihre hohe Auflösung und Zuverlässigkeit. Bei niederfrequenten Schwingversuchen und den eingesetzten Temperaturmeßfühlern mit kleinen Zeitkonstanten wird eine exakte Bestimmung der mittleren Probestemperatur bzw. deren Änderung erschwert. Die Überlagerten Temperaturschwankungen aufgrund des thermoelastischen Effektes betragen in Höhe der Zug-Druck-Wechselfestigkeit beim Grauguß ca. 0,2 K und beim Austenit ca. 0,8 K.

### 5.2. Dissipation bei zyklischer Beanspruchung

Die Ermittlung der pro Schwingspiel in Wärme umgesetzten Formänderungsarbeit zeigte sowohl bei der stationären als auch der instationären Kurzzeitschwingprüfung mit beiden Meßfühlersystemen praktisch die gleichen Ergebnisse, Fig. 6. Überprüfungen durch parallel vorgenommene Hysteresisflächenauswertungen ergaben bei größeren plastischen Wechselverformungen eine gute Übereinstimmung zwischen der daraus ermittelten irreversiblen Formänderungsarbeit und der spezifischen Wärmemenge pro Schwingspiel. Grundlegende Voraussetzung und gleichzeitig eine Überprüfungsmöglichkeit für die Genauigkeit der ermittelten Wärmemengen war bei der (quasi-)stationären Messung der Nachweis der zugrunde gelegten eindimensionalen Wärmeleitung in der Probe, d.h. die Bestätigung der parabelförmigen Temperaturverteilung über der Meßlänge. In Fig. 7 sind die Ergebnisse der Messungen für drei Spannungsausschläge aufgezzeichnet. Die  $\Delta$ -Werte geben die maximale Temperaturdifferenz an den Meßstellen

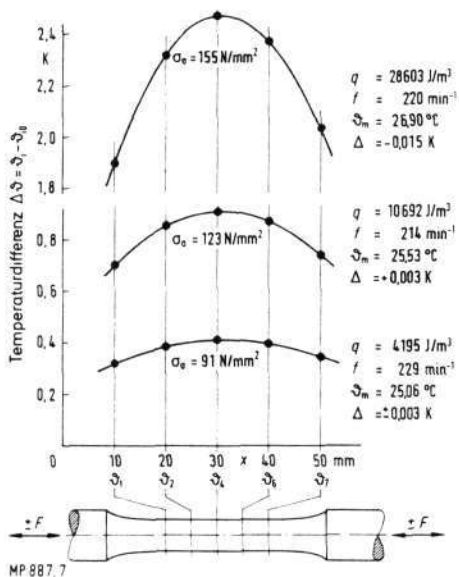


Fig. 7: Abhängigkeit des Temperaturprofils vom Spannungsausschlag am Beispiel des GG-20 ( $\sigma_m = 0$ )

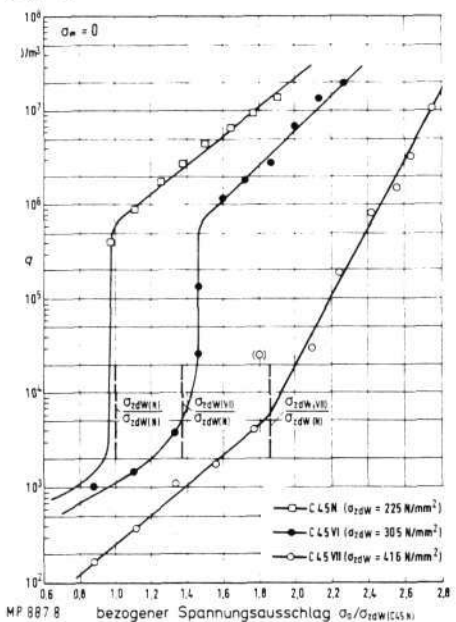


Fig. 8: Abhängigkeit der spez. Wärmemenge pro Schwingung  $q$  vom bezogenen Spannungsausschlag

zwischen den Meßwerten und dem aus drei Meßpunkten berechneten Parabelverlauf an.

Die Abweichungen sind so gering, daß der Rechenansatz einer ebenen Wand mit Wärmequellen als in hohem Maß erfüllt angesehen werden kann.

Es konnte nachgewiesen werden, daß die spezifische Wärmemenge pro Schwingung unabhängig vom Proben-durchmesser ist. Die Frequenzabhängigkeit ist insbesondere unterhalb der Dauerfestigkeit und bei Prüffrequenzen unter 50

Hz gering. Stärker ausgeprägt ist der Frequenzeinfluß bei höheren Prüffrequenzen und Beanspruchungen mit größeren plastischen Wechselverformungen. Die Abhängigkeit vom Spannungsausschlag ist außerordentlich hoch. Die Wärmemenge  $q$  pro Schwingung erstreckt sich über bis zu 5 Zehnerpotenzen und ermöglicht damit eine sehr feinfühligere Differenzierung von Beanspruchungsänderungen und Werkstoffzuständen (s. Fig. 6 und Fig. 8). Während Werkstoffe ohne ausgeprägte Fließgrenze einen stetigen Verlauf  $q=f(\sigma_a)$  aufweisen (z. B. Grauguß, Austenit, hochvergüteter Kohlenstoffstahl C 45), zeigen die normalisierten und niedrigvergüteten Werkstoffzustände im Bereich der Dauerfestigkeit einen sprunghaften Anstieg der Wärmeentwicklung um bis zu 2 Zehnerpotenzen. Im Kennlinienverlauf des hochvergüteten Zustandes tritt ein Knick im Gebiet der Wechselfestigkeit auf. Übereinstimmend zeigen alle Versuchswerkstoffe oberhalb der Dauerfestigkeit bei halblogarithmischer Auftragung einen linearen Kurvenverlauf; dies erinnert an prinzipielle Zusammenhänge für die Abhängigkeit der Anrißschwingspielzahl von der plastischen Dehnungsschwingbreite und der Zeitfestigkeitsgeraden im Wöhler-Diagramm bzw. der Anrißkennlinie. Außer vom Werkstoffzustand wird die spezifische Wärmeentwicklung pro Schwingung deutlich von statischen oder zyklischen Vorbeanspruchungen, Mittelspannungen und Zeitstandsbeanspruchungen beeinflusst. Die Übertragung des Verfahrens auf gekerbte Proben wurde versucht und wird z. Z. noch weiterentwickelt.

In quasistationären Langzeit-(Wöhler-)Versuchen im Zeitfestigkeits- bzw. im Dauerfestigkeitsgebiet lassen sich die schwingungszahlabhängigen Veränderungen der Wärmeentwicklung bzw. der plastischen Dehnungsschwingbreite erfassen. Beim Gußeisen zeigte sich eine mit der Schwingungszahl leicht fallende Wärmeentwicklung, wobei bei einer Unterschreitung eines Grenzwertes von  $1,1 \cdot 10^4$  J/m<sup>3</sup> pro Schwingung mit der Dauerschwingfestigkeit der Probe zu rechnen war, Fig. 9. Bei dem austenitischen Werkstoff wurde oberhalb der Zug-Druck-Wechselfestigkeit im Wöhlerversuch eine z. T. beträchtliche Zunahme der Wärmemenge pro Schwingung festgestellt, Fig. 10. Trägt man die kurz vor dem Schwingbruch der Probe entwickelte spezifische Wärmemenge über der Bruchschwingungszahl in doppellogarithmischem Maßstab auf, erhält man eine Versagerkennlinie, wie sie in Fig. 11 dargestellt ist.

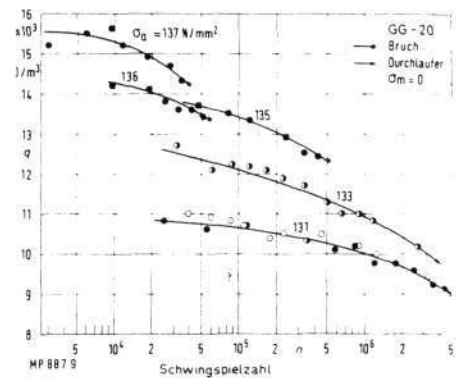


Fig. 9: Veränderung der Wärmeentwicklung bei einstufiger Zug-Druck-Wechselbeanspruchung in der Nähe der Dauerfestigkeit beim Grauguß (halblogarithmische Darstellung)

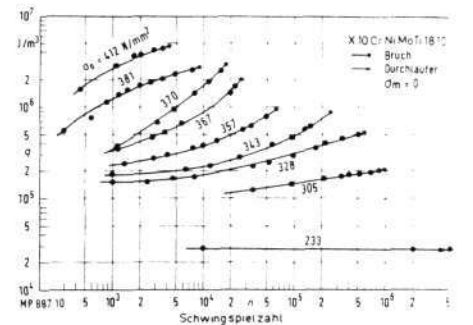


Fig. 10: Abhängigkeit der Wärmeentwicklung vom Spannungsausschlag und der Schwingungszahl beim Austenit (doppellogarithmische Darstellung)

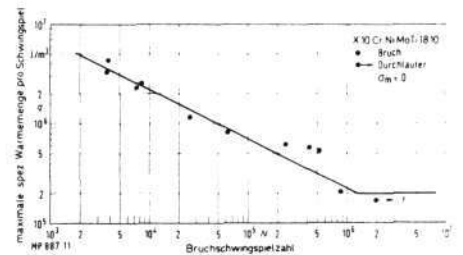


Fig. 11: Abhängigkeit der Wärmeentwicklung vor dem Bruch der Probe von der Bruchschwingungszahl beim Austenit

Generell kann festgestellt werden, daß mit der vorgeschlagenen thermometrischen Meßmethode eine genaue Untersuchung der mikroskopischen und makroskopischen plastischen Wechselverformungen und ihrer Veränderungen im Schwingversuch möglich ist. Das Einsatzgebiet reicht von Spannungsausschlägen weit unterhalb der Dauerschwingfestigkeit bis ins hohe Zeitfestigkeitsgebiet, womit unter anderem die These untermauert werden konnte, daß Ermüdungs- und Zerrüttungsvorgänge grundsätzlich durch - wenn auch oft nur kleine - plastische Wechselverformungen verursacht werden.

## 6. Anwendungen, Ausblick

Mit der spezifischen Wärmemenge pro Schwingspiel  $q$  scheint eine gute quantitative Bewertung der Einflüsse von Prüffrequenz, Beanspruchungsreihenfolge, Mittelspannung und Vorbeanspruchung auf die Schwingfestigkeit möglich. Hierzu müssen grundsätzliche Untersuchungen klären, ob und inwieweit die dissipierte Energie als Maß für die Werkstoffermüdung, d. h. als maßgebende Größe für eine Akkumulationshypothese, dienen kann.

Die meßtechnischen Voraussetzungen zum Einsatz der Thermometrie zur Werkstoffdifferenzierung und zur weiteren Untersuchung der mikroskopischen und makroskopischen plastischen Wechselbeanspruchungen und deren Einfluß auf Zeit- und Dauerfestigkeit, Rißbeginn und -wachstum sind gegeben. Weitere Anwendungen werden in Untersuchungen zu den werkstoffmechanischen Ursachen der erst bei hohen Schwingspielzahlen vermuteten Dauerfestigkeit der Leichtmetalle, in der Übertragung der Thermometrie auf gekerbte Proben sowie der Bestimmung der Anrißschwingspielzahl durch Temperaturmessungen im Kerbgrund gesehen.

## 7. Zusammenfassung

Für den speziellen Fall einer rein axial zyklisch belasteten Probe erhält man bei statistisch homogen verteilten Wärmequellen im stationären Betriebszustand eine parabelförmige Temperaturverteilung über der zylindrischen Meßlänge, auf deren Grundlage die Ermittlung der je Volumeneinheit und Schwingspiel in Wärme umgesetzten Formänderungsarbeit vorgenommen wurde.

Umfangreiche Temperaturmessungen mit Kupferdraht-Widerstandsfühlern bzw. Thermistoren an bei Raumtemperatur schwingend belasteten Rundproben aus den Werkstoffen GG-20, X10 CrNiMo-Ti 1810, C 45, 34 CrNiMo 6 und 13 CrMo 44 zeigten, daß weitgehende Aussagen über die Größe der für die Schädigung verantwortlichen irreversiblen Formänderungsarbeit bzw. der mikroskopischen und makroskopischen plastischen Wechselverformungen gemacht werden können. Insbesondere wurde der Einfluß des Gefügestandes, von Vorbeanspruchungen (Vorbelastungen bzw. Zeitstandsbeanspruchungen) in Kurzzeitversuchen und Veränderungen der spezifischen Wärmemenge pro Schwingspiel in Einstufen-

Wöhler-Versuchen ermittelt. Begleitende Messungen betrafen das zyklische Spannungs-Dehnungs-Verhalten, Hysteresisflächenauswertungen, instationäre Temperaturverteilungen und Untersuchungen an gekerbten Proben sowie zum thermoelastischen Effekt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, daß durch gezielten Einsatz der Thermometrie weitere Erkenntnisse über Vorgänge und Änderungen im Aufbau der Werkstoffe sowie ausreichend zuverlässige Werkstoffdifferenzierungen bei zügiger, schwingender und u. U. schlagartiger Beanspruchung zu erwarten sind.

## Literatur

- [1] Thomson, W.: On the Thermo-Elastic and Thermo-magnetic Properties of Matter. *Quart. J. of Pure & Appl. Math.* 1 (1857) p. 57/77.
- [2] Dengel, D., H. Harig: Die Temperatur als Indikator von Deformationsvorgängen im Werkstoff. *Härte- und Techn. Mitt.* 30 (1975) Nr. 2.
- [3] Dorn, L., A. Jüch, P. Rippl: Aussagen der instrumentierten Schwingprüfung zum Festigkeitsverhalten von Schweißverbindungen. Vortrag XI. Schweißtechnisches Hochschulkolloquium, Essen, 2. und 3. März 1978.
- [4] Stärk, K.: Thermometrische Untersuchungen zum zyklischen Verformungsverhalten metallischer Werkstoffe. Diss., Univ. Stuttgart, 1980.
- [5] Harig, H.: Zur Bedeutung der Thermometrie bei der mechanischen Prüfung metallischer Werkstoffe. Habilitationsschrift, TU Berlin, 1975. MP 887