



DEUTSCHER VERBAND FÜR MATERIALPRÜFUNG E. V.

Geschäftsstelle Unter den Eichen 87 · 1000 Berlin 45 · ☎ (0 30) 8 11 30 66

NEUERE ERKENNTNISSE UND VERFAHREN  
DER SCHWINGFESTIGKEITSFORSCHUNG

Vorträge der 6. Sitzung des Arbeitskreises Betriebsfestigkeit

gehalten am 25. und 26. Mai 1981  
in der Technischen Hochschule Darmstadt

Obmann: Dr.-Ing. E. Haibach  
Direktor der Seilprüfstelle  
Institut für Fördertechnik und Werkstoffkunde  
Westfälische Berggewerkschaftskasse in Bochum

Stärk, K.: Neue Ansätze für eine Schädigungsenergiehypothese  
auf der Basis thermometrischer Messungen

1. Einleitung

Grundlegendes Problem einer Untersuchung über die Schwingfestigkeit der Metalle ist die Frage nach dem Schädigungsmechanismus und einem werkstoffmechanisch sinnvollen Schädigungsparameter. Während bei Versuchen mit konstanter Last- bzw. Spannungsamplitude (Wöhlerversuche) oder mit konstantgehaltener Dehnungsamplitude zur Versagensvorhersage die Bruch- bzw. Anrisskennlinien als empirische Grenzlinien der Schwingfestigkeit meist genügen, benötigt man für die treffsichere Vorhersage von Anriss oder Bruch bei unregelmässiger Beanspruchung eine, die Schädigungsvorgänge beschreibende Hypothese. Eine Anzahl von Vorträgen dieses Arbeitskreises und zahlreiche Diskussionsbeiträge zeigten, dass hier u.U. auch neue Wege beschrritten werden sollten, um weitere, werkstoffmechanisch begründete Ansätze auf ihre Brauchbarkeit zur Schädigungsanalyse zu untersuchen. In diesem Beitrag soll versucht werden, den Hypothesen auf der Grundlage von gerechneten Spannungs- und gemessenen Gesamtdehnungswerten eine andere Möglichkeit auf der Basis von thermometrischen Messungen zur Diskussion zu stellen. Insbesondere den Praktikern und Verfechtern der Spannungs-Dehnungsbeziehungen als einzig verwertbare Grundlage der Werkstoffbeanspruchung soll die Wärmeentwicklung als weiteres Indiz der Vorgänge im Werkstoff nähergebracht werden.

2. Dissipation

Alle Methoden der Verformungs- bzw. Dehnungsmessungen ermöglichen lediglich die Ermittlung der Gesamtverformung bzw. Gesamtdehnung. Wie Bild 1 zeigt, nimmt der Anteil an plastischer oder bleibender Dehnungsamplitude mit steigender Anrisschwingspielzahl schnell ab und erreicht im Bereich der Dauerfestigkeit sehr kleine, meist nicht mehr auflösbare Werte. Da ein ideal elastisch (auch mikroskopisch und submikroskopisch) sich verhaltender Werkstoff nur durch Trennbruch versagen kann, scheint der plastische Verformungsanteil als Schädigungsmass geeignet - wären nicht als Hindernis die schwierige Erfassung im Uebergangsbereich und die oft sehr kleinen Amplituden der Betriebsfestigkeitsuntersuchungen.

Da sich die irreversible Formänderungsarbeit eines beanspruchten Volumens durch Dissipation praktisch vollständig in Wärme umwandelt, besteht die Möglichkeit, über Wärmemessungen ein Mass für die plastischen Wechselverformungen zu gewinnen. Selbst kleinste plastische Verformungen die u.a. die Dämpfung der Werkstoffe bewirken und extrem schmale Hysteresisflächen zur Folge haben, lassen sich bei höheren Beanspruchungsfrequenzen durch Wärmetönungen erkennen.

### 3. Temperaturanalyse

Als erstes Ziel war die Aufgabe gestellt, diese Temperaturänderungen einer schwingbeanspruchten Probe einer echten quantitativen Erfassung zuzuführen. Hierbei sollte es möglich sein, die in einem makroskopisch homogen beanspruchten Volumelement pro Schwingenspiel erzeugte Wärmemenge mit hoher Genauigkeit zu ermitteln.

Mikroskopisch und submikroskopisch sind die Spannungs- und Dehnungszustände und plastischen Wechselverformungen bei polykristallin aufgebauten Werkstoffen stets stark inhomogen /1/. Denkt man sich eine Probe als wärmeleitenden Werkstoff und rein axial beansprucht mit - im zylindrischen Messbereich - quasihomogen verteilten Wärmequellen (s. Bild 2), so lässt sich für den stationären Betriebszustand und bei Vernachlässigung radialer Wärmeverluste eine parabelförmige Temperaturverteilung der Form

$$\vartheta(x) = K \cdot x^2 + ax + b$$

herleiten. Die Konstante

$$K = -\frac{\dot{q}}{2\lambda}$$

enthält die Ergiebigkeit  $\dot{q}$  der fein verteilten Wärmequellen und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Werkstoffs. Die Konstanten a und b sind abhängig von den Wärmeabfuhrverhältnissen der Probeneinspannungen und beinhalten lediglich die horizontale und vertikale Lage der Temperaturparabel, d.h. die Position des Temperaturmaximums. Mit Temperaturmessungen an mindestens 3 verschiedenen Stellen des zylindrischen Messbereiches sind die Konstanten bestimmbar. Durch Verwendung von reinen Temperaturdifferenzmessungen zwischen 4 Messstellen und durch Division durch die Beanspruchungsfrequenz f erhält man die pro Volumeinheit und pro Schwingenspiel dissipierte Wärmemenge

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

### 3. Spezifische Wärmemenge pro Schwingenspiel

Mit Hilfe von Temperaturmessungen mit einer Auflösung besser als 0.01 K mit Halbleitern (Thermistoren) oder Kupferdrahtwicklungen (die Messtechnik ist in /2/ beschrieben) als Temperaturfühler konnte die Parabel nachgewiesen und die Wärmemenge q genau bestimmt werden. Am Beispiel der Messung an einem austenitischen Werkstoff (X 10 Cr Ni Mo Ti 18<sub>2</sub>10) mit einer Zug-Druckwechselfestigkeit von etwa 310 N/mm<sup>2</sup> zeigt Bild 3 die Temperaturverteilungen für 3 Beanspruchungen. Die maximalen Fehler  $\Delta$  zwischen den aus 3 Messungen errechneten und den gemessenen restlichen beiden Kurvenpunkten betragen hier weniger als 0.05 K, wobei die Wärmeentwicklung von 50 auf 150 N/mm<sup>2</sup> (also noch weit unterhalb der Wechselfestigkeit des Werkstoffes) etwa um den Faktor 50 zunimmt. Die höchsten an den Proben auftretenden Temperaturen wurden durch Veränderung der Prüffrequenz auf Werte unter 50°C gehalten. Bild 4 am Beispiel eines Gusseisens GG-20 zeigt, dass die Wärmemengen für verschiedene Probendurchmesser in einem schmalen Streuband liegen und bestätigen damit den geringen radialen Wärmeverlust und die als Randbedingung der Parabel vorausgesetzte spezifische, d.h. auf ein Volumelement bezogene, Wärmeentwicklung.

Im Frequenzbereich der meisten Prüfmaschinen unter 100 Hz hat die Prüffrequenz (s. Bild 5 für den austenitischen Werkstoff) kaum Einfluss auf die je Lastspiel erzeugte Wärmemenge. Weitere Versuche zeigten, dass grössere Abweichungen beim Vergleich mit noch höheren Prüffrequenzen auftreten. Insbesondere im Zeitfestigkeitsgebiet und bei grösseren plastischen Dehnungsschwingbreiten wurden grössere Unterschiede festgestellt, wobei eine höhere Prüffrequenz immer eine Abnahme der spezifischen Wärmemengen pro Schwingenspiel zur Folge hatte.

Im Bild 6 sind von 3 Wärmebehandlungszuständen des Kohlenstoffstahles C 45 die spezifischen Wärmemengen über den auf die jeweilige Wechselfestigkeit bezogenen Spannungsausschlägen dargestellt. Deutlich erkennbar ist die Aenderung der Verläufe im Bereich der Dauerfestigkeit. Im Zeitfestigkeitsgebiet sind die Kurven in dieser halblogarithmischen Darstellung in guter Näherung linear.

Sehr empfindlich äussern sich ebenfalls Veränderungen der Mittelspannung, statische und zyklische Ueberbeanspruchungen, thermomechanische Werkstoffbehandlungen, Zeitstandbeanspruchungen und Reihenfolgeeinflüsse in den gemessenen spezifischen Wärmemengen während der Schwingbeanspruchung. Langzeitmessungen während spannungskontrollierten Versuchen (s. Bild 7) zeigen z. T. deutliche Veränderungen über der Schwingspielzahl, die Rückschlüsse auf Ver- und Entfestigungen sowie prinzipielle Aussagen über zu erwartende Lebensdauern zulassen. Ueber der Bruchlastspielzahl N aufgetragen, erhält man für die maximale bzw. mittlere spezifische Wärmemenge für den austenitischen Werkstoff bzw. den Grauguss im Zeitfestigkeitsgebiet einen etwa linearen Zusammenhang (s. Bild 8) der auf Zusammenhänge mit der

Manson-Coffin-Geraden /3,4/ hinweist und eine prinzipielle und werkstoffmechanisch begründbare Eignung der irreversiblen Formänderungsarbeit der Gesamtenergie /5/, bzw. der spezifischen Wärmemenge als Schädigungsmass andeutet.

Wie Bild 9 in einer Zusammenstellung zeigt, ist selbstverständlich jeder Werkstoff bzw. -zustand für sich getrennt zu behandeln, wie das ja auch bei Anriss- und Wöhlerlinien deutlich wird. Die spezifischen Wärmemengen die die Werkstoffe im Uebergangsbereich gerade noch auf Dauer erzeugen und ertragen können, reichen von  $2 \cdot 10^3 \text{ J/m}^3$  bei den meisten ferritischen Stählen bis zu  $10^5 \text{ J/m}^3$  beim Austenit. Rechnet man mit Hilfe dieser Wärmemengen bzw. den irreversiblen Formänderungsarbeiten pro Schwingspiel auf die plastischen Dehnungsschwingbreiten einer entsprechend schmalen Hysteresisfläche um, erhält man beim Austenit noch messbare Werte um 0.2 %, dagegen beim Schraubenstahl 34 Cr Ni Mo 6 H 3 um etwa 0.004 %, welcher mit weniger als einem Tausendstel von der Gesamtdehnungsschwingbreite messtechnisch nicht mehr oder nicht mehr genau erfassbar ist.

#### 4. Schädigungsparameter q

Aufgrund zahlreicher Messungen an grauem Gusseisen, ferritischen und austenitischen Stählen hat sich die spezifische Wärmemenge q zur Erfassung der Werkstoffbeanspruchung als sehr geeignet erwiesen. Hervorzuheben ist die hervorragende Differenzierungsqualität in Bezug auf den

- Frequenzeinfluss
- Mittelspannungseinfluss
- Reihenfolgeeinfluss
- Schwingspielzahleinfluss
- Einfluss thermomechanischer Werkstoffbehandlungen

Weitere Merkmale zeichnen die Wärmestrommessung aus und grenzen die spezifische Wärmemenge pro Schwingspiel gleichzeitig gegen andere Parameter ab: Sie

- ist ein echter Werkstoffkennwert auf werkstoffmechanischer Grundlage ( weitgehend unabhängig von der Probengeometrie und der Oberflächenqualität)
- enthält nur die irreversiblen makro- und mikroskopischen plastischen Verformungsanteile, die als Ursache der Schädigung unter zyklischer Beanspruchung angesehen werden
- überstreicht einen Empfindlichkeitsbereich von ca.  $5 \pm 6$  Zehnerpotenzen mit einer sehr guten Messbarkeit, auch noch im Uebergangsbereich und darunter
- ist auch bei nicht geschlossenen Hysteresisschleifen anwendbar, da keine Spannungs-Dehnungsverläufe (Hysteresisschleifen) ausgewertet werden müssen.

Als Mass für die Gesamtschädigung während der Lebensdauer einer Probe im Einstufen-Schwingversuch wird im Zeitfestigkeitsgebiet nach Bild 7

$$S = q_m \cdot N^K$$

mit  $q_m$  als mittlerer spezifischer Wärmemenge pro Schwingspiel bzw. die Aufsummierung aller Wärmemengen oder -differenzen zwischen der jeweiligen Beanspruchung  $q_i$  und dem Wert bei der Dauerfestigkeit  $q_D$

$$s = \sum_i^N (q_i - q_D)$$

vorgeschlagen. Diese ersten Ansätze und weitere Varianten bedürfen gründlicher Untersuchungen und Ueberprüfungen. Als Anwendungs- und Erweiterungsmöglichkeiten der vorgestellten Thermometrie werden vor allem gesehen:

- die genaue und probensparende Differenzierbarkeit von Werkstoff- und Beanspruchungszuständen
- die Anwendung zur Betriebsfestigkeitsanalyse durch Erweiterung des Auswerteprogramms auf instationäre Wärmequellen
- grundsätzliche Untersuchungen zur Dauerfestigkeit der Stähle und Leichtmetalle
- die Anwendung auch bei dehnungskontrollierter Versuchsführung im LCF-Gebiet.

Da die messtechnischen Probleme befriedigend gelöst erscheinen, bleibt ein weites Feld von Grundlagenuntersuchungen und Anwendungsmöglichkeiten weiteren Arbeiten vorbehalten.

Literatur

- /1/ Mughrabi, H. : Microscopic Mechanismus of Metal Fatigue. Proceedings of Fifth International Conference on the Strength of Metals and Alloys, Aachen, 1979, P. Haasen, V. Gerold, and G. Kostorz, eds., Pergamon Press, Oxford and New York, Vol. 3, 1980, p. 1615-38.
- /2/ Stärk, K. : Thermometrische Untersuchungen zum zyklischen Verformungsverhalten metallischer Werkstoffe. Technisch-Wissenschaftlicher Bericht Nr. 80-01 der Staatlichen Materialprüfungsanstalt, Univers. Stuttgart, 1980.
- /3/ Manson, S.S.: Thermal Stress and Low-Cycle Fatigue. McGraw - Hill Book Company New York/San Francisco/Toronto/London/Sydney, 1966.
- /4/ Coffin, L.F. Jr.: Internal Stresses und Fatigue in Metals. Elsevier Publishing Company, Amsterdam/London/New York/Princeton, 1959.
- /5/ Rettig, H. : Die Wöhlerlinie als Werkstoff-Energiegrenze. Der Maschinenschaden 42, Heft 6, 1969, S. 179-189, Der Maschinenschaden 43, Heft 1, 1970, S. 15-24.

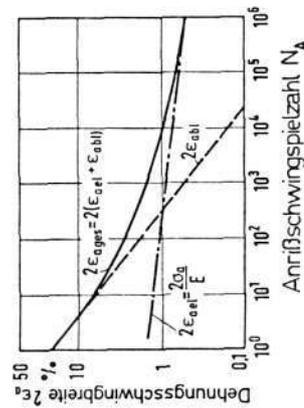


Bild 1: Abhängigkeit der elastischen, bleibenden und Gesamtdehnungsschwingbreite von der Anrisschwingspielzahl  $N_A$

Schwingprobe mit Wärmequellen

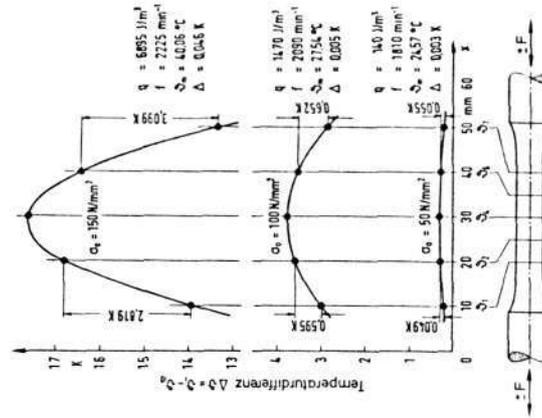
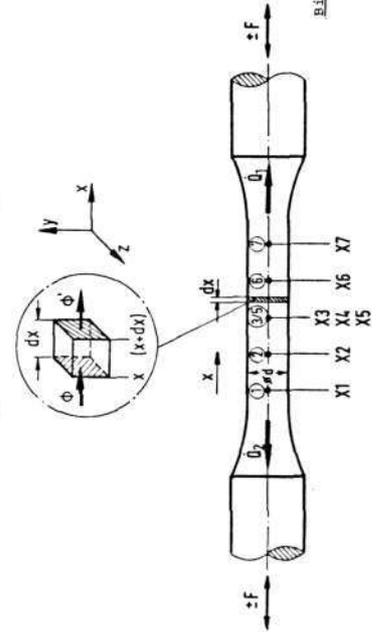


Bild 3: Nachweis der parabolförmigen Temperaturverteilung über der zylindrischen Messlänge einer schwingend beanspruchten Probe im stationären Betriebszustand (Werkstoff X10CrNiMoTi 1810)

Bild 2: Temperaturmessung an einer zyklisch axial beanspruchten Probe zur Bestimmung der im Werkstoff dissipierten, irreversiblen Formänderungsarbeit

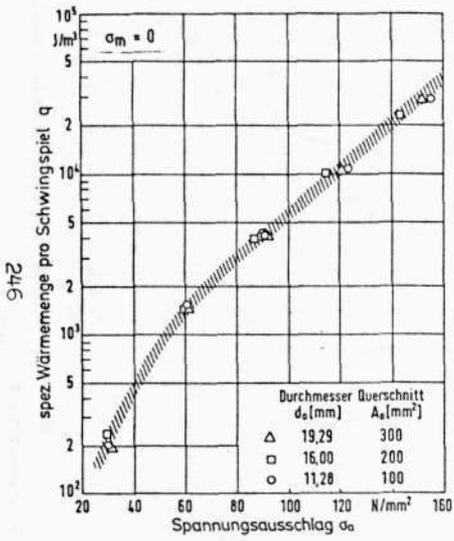


Bild 4: Nachweis der vom beanspruchten Probenvolumen unabhängigen, spezifischen Wärmemenge pro Schwingpiel am Beispiel eines GG-20

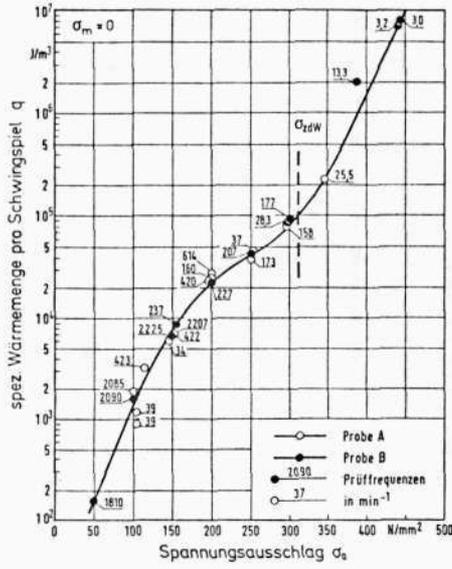


Bild 5: Nachweis der Unabhängigkeit der Wärmeentwicklung pro Schwingpiel von der Prüffrequenz im Bereich von etwa 0,5-40 Hz am Beispiel des X10CrNiMoTi 1810

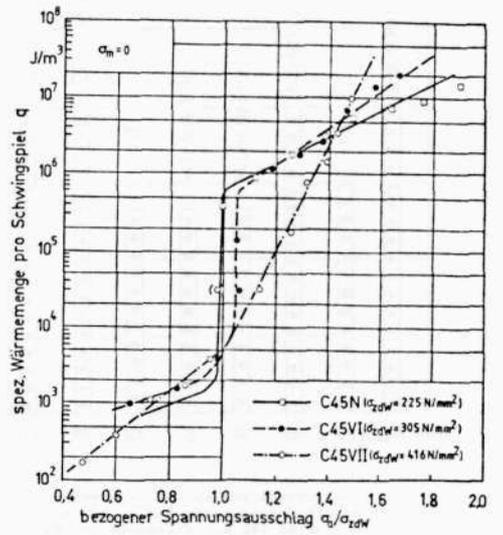


Bild 6: Vergleich der Dissipation von Proben aus unterschiedlich wärmebehandeltem Material des Werkstoffes C45

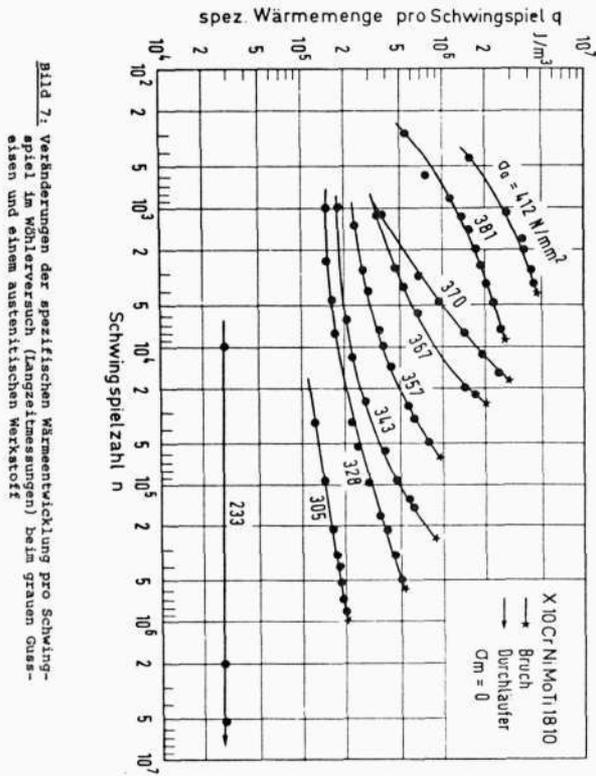
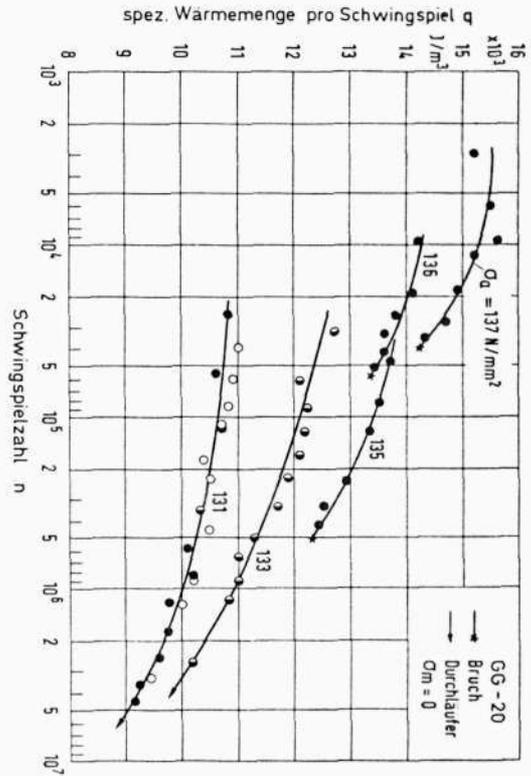


Bild 7: Veränderungen der spezifischen Wärmeentwicklung pro Schwingpiel im Wöhlerversuch (Langzeitmessungen) beim grauen Guss- und einem austenitischen Werkstoff



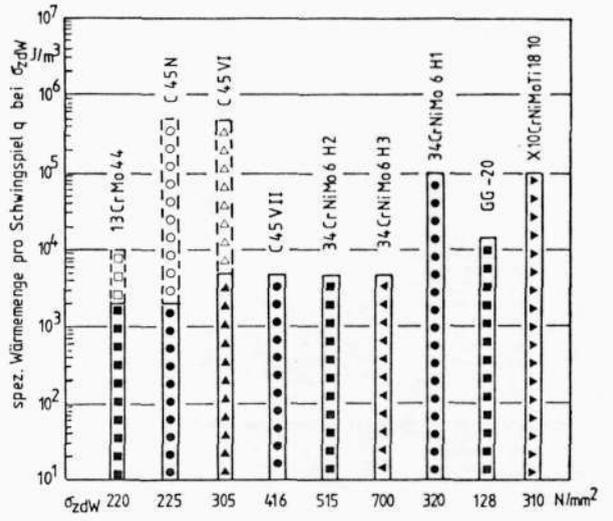
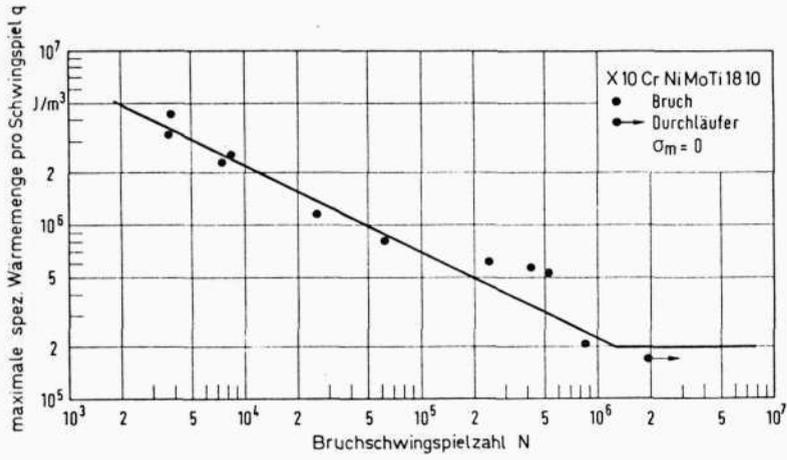
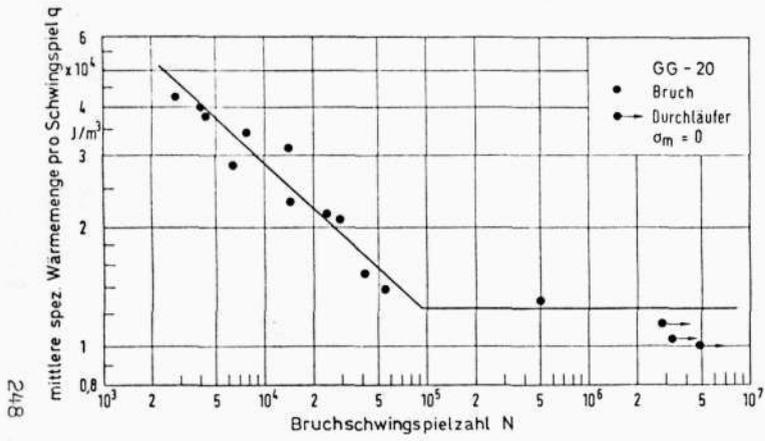


Bild 9: Zusammenstellung der Wärmeentwicklung der untersuchten Werkstoffe im Uebergangsbereich von der Zeit- zur Dauerschwingfestigkeit (sprunghafte Änderungen gestrichelt eingezeichnet)

Bild 8: Abhängigkeit der spezifischen Wärmemenge pro Schwingspiel von der Bruchschwingspielzahl am Beispiel eines ferritischen bzw. austenitischen Werkstoffes