

Dauerfestigkeit des Stahles bei erhöhten Temperaturen

Von Anton Pomp und Max Hempel, Düsseldorf

als Gäste

Zur Gütebeurteilung des Stahles für seine Verwendung bei Raumtemperatur unter ruhender Beanspruchung genügt in den meisten Fällen der statische Zugversuch vollauf. Er ergibt in der Zugfestigkeit und Streckgrenze eine geeignete Grundlage für die Berechnung der Tragfähigkeit eines Bauwerks. Die im gleichen Versuch ermittelte Bruchdehnung und -einschnürung kennzeichnen darüber hinaus das Zähigkeitsverhalten des Werkstoffs und liefern wichtige Anhaltspunkte für die ertragbare Formänderung bei gelegentlich auftretenden, die Streckgrenze übersteigenden Überbeanspruchungen. Ein einziger Versuch reicht also in diesem Falle aus, um über das Verhalten eines Werkstoffs bei ruhender Beanspruchung Aufschluß zu gewinnen.

Nicht so einfach liegen die Verhältnisse, wenn man sich ein Bild von dem Verhalten eines Werkstoffs bei Raumtemperatur unter wechselnder Beanspruchung machen will. In diesem Falle genügt ein einzelner Versuch nicht; es ist vielmehr erforderlich, eine Reihe von Versuchen durchzuführen, um zu einem Wert für die in diesem Fall maßgebliche Kennziffer, die Dauerfestigkeit, zu kommen. Erleichtert wird ihre Ermittlung durch Aufzeichnung der Wöhlerkurve (Abbildung 1), d. h. Auftragung der Belastung in Abhängigkeit von den ertragenen Lastspielen [1]. Oberhalb einer bestimmten Lastspielzahl tritt kein Bruch mehr auf, so daß sich die Wöhlerkurve asymptotisch einer Parallelen zur Abszisse nähert; bei Auftragung der Lastspiele in logarithmischem Maßstab ergibt sich für den vorher hyperbelähnlich verlaufenden Teil der Kurve angenähert eine fallende Gerade, die nach einem Knick parallel zur Abszisse weiterläuft. Bei allen Belastungen unterhalb dieser Parallelen zur Abszisse tritt kein Bruch mehr auf. Die zugehörige Belastung ist die Dauerfestigkeit. Zur Abkürzung der sehr langwierigen Versuche begnügt man sich in vielen Fällen damit, diejenige größte Belastung festzustellen, bei der nach 10, 5 oder auch nur 2 Millionen Lastspielen kein Bruch eintritt.

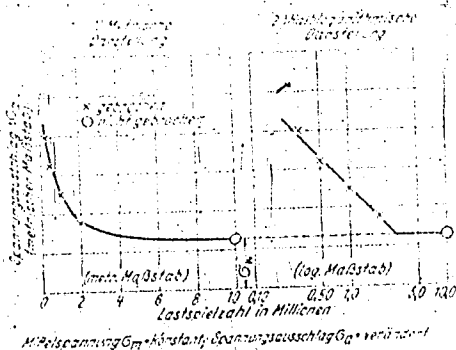


Abb. 1
Wöhlerlinien

Mit dieser einen Versuchsreihe ist es aber noch nicht getan; denn die Dauerfestigkeit umfaßt eine Anzahl von Beanspruchungsfällen (Abbildung 2).

Der allgemeine Fall einer Wechselbeanspruchung ist nach Teilbild A dadurch gekennzeichnet, daß die Belastung zwischen einer oberen Beanspruchung (Oberspannung σ_0) und einer unteren Beanspruchung (Unter-

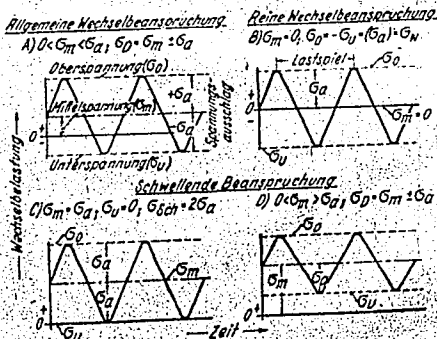


Abb. 2
Belastungsfälle für Wechselbeanspruchung

spannung σ_0 wechselt. Man kann sich diesen allgemeinen Fall auch so vorstellen, daß sich einer ruhenden Last (Mittelspannung σ_0) eine Wechselbeanspruchung von gleicher positiver und negativer Größe (Spannungsausschlag σ_1) überlagert. Für diese Dauerbeanspruchung im Wechselbereich gilt die Bedingung, daß die Mittelspannung größer als Null, aber kleiner als der Spannungsausschlag ist.

Die am häufigsten angewandte Wechselbeanspruchung ist in Teilbild B dargestellt; hier ist die Mittelspannung gleich Null, und der Spannungsausschlag wechselt zwischen entgegengesetzten gleich großen Grenzwerten (Wechselfestigkeit).

In Teilbild C ist eine Schwellbeanspruchung wiedergegeben, bei der die Spannung zwischen einem Größtwert, der gleich dem doppelten Spannungsausschlag ist, und dem Wert Null wechselt, die Mittelspannung also gleich dem Spannungsausschlag ist (Schwellfestigkeit).

Teilbild D enthält den Fall einer Dauerbeanspruchung im Schwellbereich, bei der die Mittelspannung größer als Null und größer als der Spannungsausschlag ist.

Es ist daher notwendig, für alle diese Fälle Versuchsreihen durchzuführen, um ein geschlossenes Bild von dem Verhalten eines Werkstoffs bei wechselnder Beanspruchung zu bekommen.

Um diese für die verschiedenen Beanspruchungsfälle ermittelten Dauerfestigkeitswerte übersichtlich darzustellen, hat sich in Deutschland besonders das Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith (Abbildung 3) eingebürgert [2]. Bei dieser Darstellungsart werden die in Dauerversuchen ermittelten Ober- und Unterspannungen in Abhängigkeit von der Mittelspannung aufgetragen.

Im Betrieb kann das volle Dauerfestigkeitsschaubild nicht ausgenutzt werden, da bei Beanspruchungen oberhalb der Streckgrenze unzulässig große Verformungen auftreten. Es ist daher lediglich die Ermittlung des Verlaufs der Grenzspannungslinien bis zur Streckgrenze von Bedeutung.

Die besprochenen Verhältnisse erfahren eine grundlegende Änderung, wenn die Beanspruchung, sei sie ruhend oder wechselnd, nicht bei Raumtemperatur, sondern bei höheren Temperaturen wirksam ist.

Für den Fall einer ruhenden Beanspruchung in der Wärme ist die Warmzugfestigkeit infolge ihrer starken Abhängigkeit von der Versuchsgeschwindigkeit kein geeigneter Kennwert. Die Warmstreckgrenze [3] kann für unlegierte Stähle bis etwa 350° und für

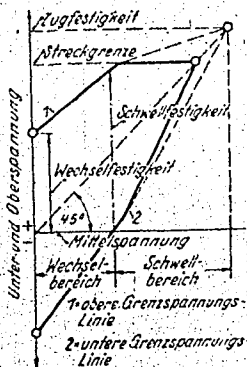


Abb. 3
Dauerfestigkeitsschauung

niedriglegierte Stähle bis etwa 450° als gewisse Grundlage für eine vergleichende Bewertung von Werkstoffen hinsichtlich der zulässigen Spannungen angesehen werden. Bei höheren Temperaturen ist wegen des immer stärkeren Hervortretens der Zeitabhängigkeit der Dehnung bei der Beurteilung des Werkstoffs auf der Grundlage der Warmstreckgrenze Vorsicht geboten. Um den Zeiteinfluß zu berücksichtigen, ist daher bei höheren Temperaturen die Durchführung von Dauerstandversuchen erforderlich.

Als kennzeichnend für die Fähigkeit eines Werkstoffs, langdauernde ruhende Belastungen bei erhöhten Temperaturen zu ertragen, gilt die Dauerstandfestigkeit, das ist diejenige Grenzbelastung, unter der ein anfänglich auftretendes Dehnen des Werkstoffs im Lauf der Zeit noch zum Stillstand kommt oder sehr geringe Beträge annimmt [4].

Die Grundlage für die Ermittlung der Dauerstandfestigkeit bildet die Aufnahme von Zeit-Dehnungs-Schaulinien bei verschiedenen Belastungen. Hierzu dienen Prüfmaschinen, in denen die Probe, die in einem Ofen auf gleichmäßige Temperatur gehalten wird, einer gleichbleibenden Belastung ausgesetzt wird, wobei die eintretenden Dehnungen über längere Zeiträume mit geeigneten Feinmeßgeräten abgelesen oder fort-

laufend selbsttätig aufgezeichnet werden. Abbildung 4 gibt die Gesamtansicht eines Dauerstandprüfgeräts wieder, wie es auf Grund der Erfahrungen des Eisenforschungsinstituts von der Losenhausenwerk A. G., Düsseldorf, gebaut wird [5].

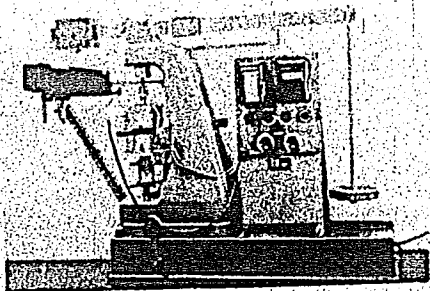


Abb. 4
Prüfmaschine für Dauerstandversuche

Abbildung 5 zeigt den grundsätzlichen Verlauf von sechs Zeit-Dehnungs-Schaulinien eines Werkstoffs für verschiedene Belastungen bei einer bestimmten Versuchstemperatur [6]. Während bei den niedrigeren Belastungen die zunächst einsetzende Dehnung infolge Verfestigung des Werkstoffs nach mehr oder weniger kurzer Zeit abklingt und schließlich völlig zum Stillstand kommt (Schaulinien 1 bis 4), geht von einer gewissen Beanspruchung an infolge der dann einsetzenden Kristallerholung bzw. Rekristallisation die eintretende Verfestigung wieder zurück, so daß eine ständig fortschreitende Dehnung beobachtet wird (Schaulinie 5), die bei ausreichend langer Zeit zum Bruch des Stabes führen wird (Schaulinie 6). Die Dauerstandfestigkeit wird daher zwischen den Belastungsstufen 4 und 5 überschritten.

Wegen der langen Dauer solcher Versuche war man bestrebt, aus abgekürzten Versuchen, d. h. der Verfolgung der Dehnung über beschränkte Zeiten, Näherungswerte der wahren Dauerstandfestigkeit zu erhalten. Auf Grund der Vorarbeiten des Eisenforschungsinstituts hat der Deutsche Verband für die Materialprüfungen der Technik die Auswertung der

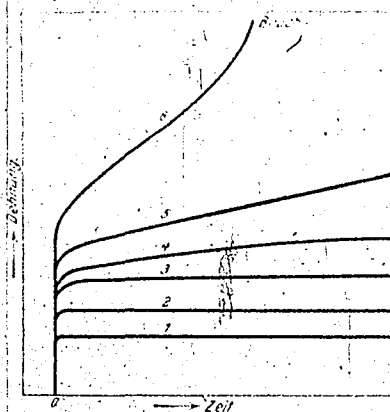


Abb. 5

Zeit-Dehnungs-Schaulinien für verschiedene Belastungsstufen (Schematisch)

Dauerstandversuche für Stahl in der Weise festgelegt, daß diejenige Belastung ermittelt wird und als praktische Dauerstandfestigkeit gilt, bei der die Dehngeschwindigkeit zwischen der 25. bis 35. Versuchsstunde auf $10 \times 10^{-4} \% / h$ abgesunken ist. Als Zusatzbedingung wird dabei gefordert, daß die bleibende Dehnung nach 45 Stunden den Betrag von 0,2% nicht überschreitet. Das Verfahren hat sich inzwischen bei der Prüfung und Abnahme warmfester Stähle bewährt und die Entwicklung auf diesem Stahlgebiet gefördert [7].

Wesentlich verwickelter liegen die Verhältnisse, wenn bei erhöhten Temperaturen wechselnde Beanspruchungen auftreten. Eine Sichtung des — allerdings nicht sehr umfangreichen — Schrifttums ergab, daß bei Aufnahme der Arbeiten auf diesem Gebiet durch das Eisenforschungsinstitut vor etwa sieben Jahren von keinem Forscher den Fließerscheinungen besondere Aufmerksamkeit geschenkt worden ist, die nach den Erfahrungen des Dauerstandversuchs im Gebiet erhöhter Temperatur auch unter wechselnder Last erwartet werden müssen, sondern daß als Prüfverfahren lediglich das für Raumtemperatur übliche Wöhlerverfahren Anwendung fand. Die bei Wechselversuchen in der Wärme auftretende Dehnung kann aber, wie Versuche von Hempel

und Tillmanns im Eisenforschungsinstitut gezeigt haben, sehr erhebliche Beträge erreichen [8]. Infolgedessen ergibt sich auch bei Schwingungsversuchen in der Wärme die Notwendigkeit, die im Lauf des Versuchs eintretenden Dehnungen des Probestabes zu messen und bei der Aufstellung von Dauerfestigkeitsschaubildern zu berücksichtigen. Dieser Weg ist bei den Untersuchungen des Eisenforschungsinstituts, über die im folgenden berichtet werden soll, beschränkt worden.

Anfangs benutzten wir für diesen Zweck verhältnismäßig einfache Meßgeräte. So wurde die Dehnung des Probestabes aus der Bewegung des oberen Einspannkopfes der Prüfmaschine an einer Meßuhr abgelesen (Abbildung 6) oder mit Hilfe eines Hohlspiegels fortlaufend aufgezeichnet.

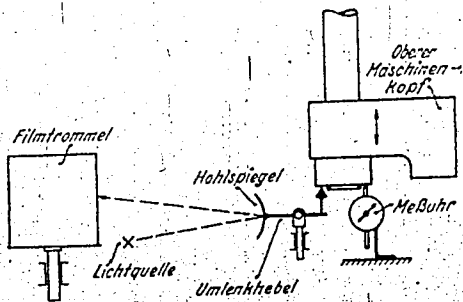
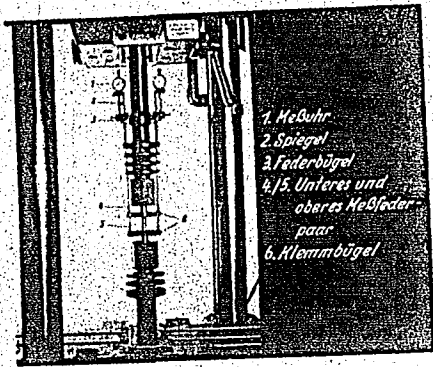


Abb. 6

Vorrichtung zur Dehnungsaufzeichnung (nach Hempel-Tillmanns)

Für feinere Dehnungsmessungen erwies es sich als notwendig, das Dehnungsmeßgerät am Prüfstab selbst anzubringen [9]. Der Aufbau eines solchen Geräts, bei dem die Dehnungsmessung an zwei gegenüberliegenden Stabseiten erfolgt, ist aus Abbildung 7 ersichtlich [10]. Es besteht aus einem oberen (4) und unteren (5) Paar Meßfedern, die gabelförmig ineinanderliegen und mit Klemmbügeln (6) gegen die am Prüfstab befindlichen Bunde gepreßt werden. Da sich bei dem stetigen Wechsel der Verformungsrichtung scharfkantige Schneiden, wie sie beim Martenschen Spiegelgerät benutzt werden, zu schnell einarbeiten und abnutzen, wurden die Schneidenkanten auf 0,5 mm Radius abgerundet. Um die Federkraft der Meßfedern zu verstärken und die Spiegelhalter



1. Meßuhr
2. Spiegel
3. Federbügel
- 4, 5. Unteres und
oberes Meßfeder-
paar
6. Klemmbügel

Abb. 7

Prüfstabeinspannung mit Meßfedern zur Dehnungsaufzeichnung (nach Hempel-Krug)

festzuklemmen, wurde zusätzlich ein mit Stellschrauben versehener Federbügel (3) unterhalb der Spiegel (2) aufgesetzt. Die oberen Meßfedern (4) tragen ferner an ihrem aus dem Ofen herausragenden Ende je eine Meßuhr (1), deren Fühlhebel auf die abgeflachten Enden der unteren Meßfedern (5) aufgesetzt werden können, um damit größere Dehnbeträge bis zu 5 mm zu verfolgen.

Für die optische Aufzeichnung der Stabdehnungen wurde ein bei Tageslicht arbeitender Zeit-Dehnungsschreiber der Losenhausenwerk A.-G., Düsseldorf, benutzt. Die wechselnde Verformungsrichtung im Prüfstab während des Dauerversuchs und das diesen Verformungen bei höheren Temperaturen überlagerte Dehnen bewirken eine axiale Verschiebung der Meßfedern gegeneinander, wodurch die in einer besonderen Halterung festsitzenden Spiegel (2) um Winkelbeträge gedreht werden. Hierbei ruft der über die Spiegel auf einem Film abgebildete Lichtpunkt ein Lichtband hervor; die Dehnungsmessung erfolgt somit als Abweichung gegen die Nullachse. Abbildung 8 zeigt beispielsweise den Verlauf der Dehnung eines Chromstahls bei 500° unter Zugrundelegung von drei verschiedenen Mittelspannungen bei 400facher Vergrößerung. Es ist deutlich zu erkennen, daß bei steigender Mittelspannung und abnehmendem Spannungsauslag das Dehnen mit wachsender Oberspannung größer wird [10].

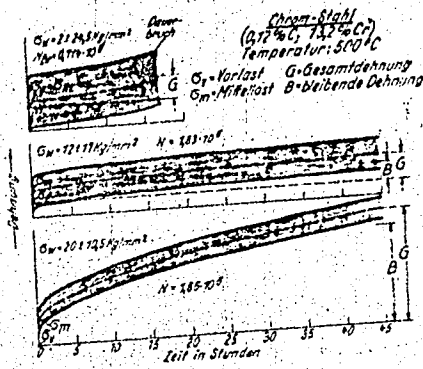


Abb. 8

Zeit-Dehnungslinien bei verschiedenen Wechselbelastungen. (nach Hempel-Krug)

Von den verschiedenen Belastungsarten, wie Zug, Druck, Biegung und Verdrehung, ist für Formänderungsmessungen in der Wärme die Zug- und Zugdruckbeanspruchung besonders geeignet, da sich hier Verformungen als lineare Längenänderungen des Prüfstabes ergeben. Aus diesem Grunde wurden für die im Eisenforschungsinstitut bei erhöhten Temperaturen durchgeführten Schwingungsversuche ölhdraulische Zug-Druck-Pulsatoren benutzt; die Eigenart der hydraulischen Kraftübertragung ermöglicht ein ungehindertes Dehnen der Proben bei gleichbleibender äußerer Belastung. Abbildung 9 zeigt die Gesamtansicht einer 35-t-Pulsatormaschine der Losenhausenwerk A.-G., Düsseldorf, mit Ofen und optischem Dehnungsmeßgerät.

Wegen der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit muß ich mich auf die Anführung der wichtigsten Versuchsergebnisse beschränken. Zur Kennzeichnung des Temperatureinflusses auf den Verlauf der Wöhlerlinien sind in Abbildung 10 die nach dem bei Raumtemperatur üblichen Wöhlerverfahren an einem Stahl mit 0,58% C unter Zugschwellbeanspruchung (Unterspannung rd. 5 kg/mm²) erhaltenen Wertepaare: Zugschwellbeanspruchung-Lastspielzahl in halblogarithmischer Darstellung aufgetragen [8]. Bei diesem Werkstoff verlaufen die Wöhler-

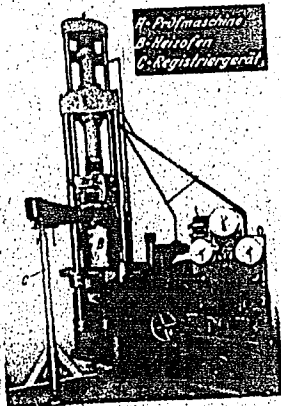


Abb. 9

Versuchseinrichtung für Schwingungsversuche in der Wärme (nach Hempel-Krug)

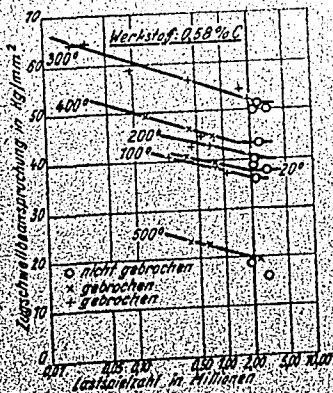


Abb. 10

Wöhlerlinien unter Zugschwellbelastung bei verschiedenen Temperaturen

linien für alle Temperaturen annähernd unter gleicher Neigung zur Abszissenachse. Der Knickpunkt der Kurven liegt für diesen Stahl und für Temperaturen unterhalb 500° bei etwa 2000000 Lastspielen.

Die Wöhlerlinien vermögen keinen Aufschluß über das während des Versuchs eintretende Dehnen des Probestabes zu geben. Als Beispiel für die Größe der Dehnung und deren Änderung mit der Zeit sind in Abbildung 11 die an dem gleichen Stahl bei 400° , ebenfalls unter Zug-

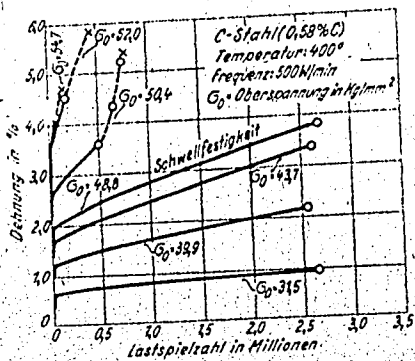


Abb. 11

Zeit-Dehnungslinien bei 400° C unter Zugschwellbeanspruchung

schwellbeanspruchung mit Hilfe der vorhin geschilderten Dehnungsmeßvorrichtung ermittelten Dehnungen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl aufgetragen [8]. Die Auswertung ergibt, daß bei einer Belastung in Höhe der Schwellfestigkeit die bis zur Erreichung der 2 Mill.-Grenze eintretenden Dehnungen so hohe Beträge annehmen (3,5%), daß für eine praktische Anwendung diese Werte der Schwellfestigkeit ausscheiden müssen.

Die unter wechselnder Beanspruchung aufgenommenen Zeit-Dehnungskurven lassen weiterhin erkennen, daß der Dehnungsverlauf in ähnlicher Weise erfolgt wie bei den unter ruhender Belastung erhaltenen Zeit-Dehnungsschaulinien des Dauerstandsversuchs. In beiden Belastungsfällen ist im allgemeinen nach Aufgabe der Last in den ersten Stunden ein schnelleres Dehnen und sodann eine Abnahme der Dehngeschwindigkeit festzustellen.

Verformung vorzunehmen ist, unter Zugbeanspruchung mit einer Drehgeschwindigkeit von 10–100 U/min in der Richtung des Verformungs- und Begrenzung der bleibenden Dehnung nach 20 auf beschriebene Weise.

Bis zu Temperaturen von etwa 300° verhält sich Stahl unter Wechselbeanspruchung ähnlich wie bei Raumtemperatur, d. h. es treten keine ausgeprägten Fließerscheinungen auf. Das Forttreten des Dauerbruchs wird bei diesen Temperaturen vor allem durch das während der Wechselbeanspruchung einsetzende Wechselspiel zwischen Verfestigung und Zerrüttung bestimmt. In Abbildung 12 sind die Dauerfestigkeitsschaubilder

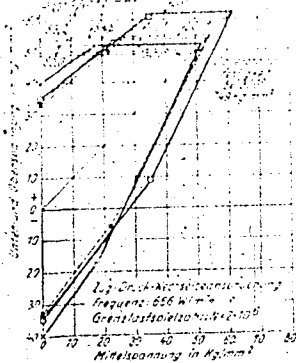


Abb. 12

Dauerfestigkeitsschaubilder eines Cr-Mo-Stahles für Temperaturen von 20 bis 300° C (nach Hempel-Krug)

bilder eines Chrom-Molybdänstahls für die Temperaturen von 20, 100, 200 und 300° wiedergegeben. Die Begrenzung der Schaubilder in Höhe des Streckgrenzenwerts ist durch die Bedingung gegeben, daß die Oberspannung die Streckgrenze nicht überschreiten soll, um unzulässige bleibende Verformungen zu vermeiden.

Diesen Bedingungen entsprechen ein Chrom-Molybdänstahl, ein Chromstahl und ein Molybdänstahl von der in Abbildung 13 angegebenen Zusammensetzung. Die Stäbe wurden mit einer Prüffrequenz von 666 W/min und einer Grenzlastspielzahl von 2 Mill., entsprechend einer Versuchszeit von 50 h, unter Aufzeichnung der Zeit-Dehnungs-Kurven geprüft. Die an den drei Stählen bei 500 °C ohne und mit Berücksichtigung der Dehnung ermittelten Dauerfestigkeits-Schaubilder sind in Abbildung 13 wiedergegeben. Während das Wöhlerverfahren Grenzspannungslinien gleicher Lebensdauer ergibt (strichpunktierete Linien), umfassen die nach dem Dehnungsmeßverfahren bestimmten Grenzspannungslinien (ausgezogene Linien) einen Belastungsbereich zulässiger Dehngeschwindigkeit bzw. bleibender Dehnung. Die Grenzspannungslinien sind durch Versuchspunkte weitgehend belegt, die jedoch der Übersichtlichkeit halber im Bild fortgelassen wurden.

In den Abbildungen sind für jeden Stahl zwei Diagrammflächen zu erkennen, und zwar ein Grenzspannungsbereich, der nicht zum Bruch des Werkstoffs führt, und demgegenüber ein kleineres (schraffiertes) Gebiet, in dem Wechselbeanspruchungen ohne unzulässige Verformungen ertragen werden. Die beiden Flächen weisen je nach der Stahlart deutliche Unterschiede in ihrer Größe und Gestalt auf. Ausschlaggebend hierfür sind außer der Warmzugfestigkeit die Warmstreckgrenze und die Dauerstandfestigkeit der Werkstoffe bei der Prüftemperatur. Für den Chrom-Molybdänstahl liegen hierbei die Verhältnisse am günstigsten; er vereint eine hohe Warmstreckgrenze mit einer guten Dauerstandfestigkeit. Im Gegensatz hierzu besitzt der Chromstahl ungünstigere Eigenschaften; die Warmstreckgrenze liegt im Vergleich zur Warmzugfestigkeit nicht besonders hoch, und die Dauerstandfestigkeit beträgt nur etwa die Hälfte der Warmstreckgrenze. Das ungünstigste Verhalten weist der Molybdänstahl auf, dessen Warmstreckgrenze und Dauerstandfestigkeit, die annähernd übereinstimmen, im Vergleich zur Warmzugfestigkeit niedrig liegen.

Der nach dem Wöhlerverfahren ermittelte Grenzspannungsbereich reicht bei dem Chrom-Molybdän- und Molybdänstahl nahezu bis zur Warmzugfestigkeit. Im Gegensatz dazu endet derselbe Bereich für den Chromstahl bereits in Höhe der Warmstreckgrenze, so daß dieser Stahl damit ein grundsätzlich anderes Verhalten zeigt. Als Ursache für dieses Verhalten darf das ausgesprochen große Fließvermögen angesehen werden, das bei diesem Werkstoff schon in dem verhältnismäßig kurzen Zeit-

zum Bruch führt, und zwar bereits bei Belastungen, die im Gegensatz zu den beiden anderen Stählen weit unterhalb der im Einzelversuch bestimmten Warmzugfestigkeit liegen.

Als Folge der günstigen statischen Werte des Chrom-Molybdänstahls ist der nach dem Dehnungsmeßverfahren ausnutzbare Grenzspannungsbereich verhältnismäßig groß. Die obere Grenzspannungslinie verläuft bis zur Warmstreckgrenze mit der nach dem Wählverfahren ermittelten zusammen und setzt sich in Höhe der Warmstreckgrenze bis zu einer Mittelspannung von etwa 30 kg/mm^2 fort. Erreicht die Mittelspannung Beträge, die in Höhe der Dauerstandfestigkeit oder dicht unter ihr liegen, so biegen die obere und untere Grenzspannungslinie zur Dauerstandfestigkeit hin ab. Bei Mittelspannungen dieses Bereichs kann die Oberspannung nicht bis zur Warmstreckgrenze erhöht werden, ohne daß die festgesetzten Dehnbedingungen überschritten werden.

Der Chromstahl läßt einen wesentlich kleineren Grenzspannungsbereich erkennen. Die sich nach beiden Verfahren ergebenden Grenzspannungslinien fallen nur im Gebiet sehr kleiner Mittelspannungen zusammen. Nach dem Dehnungsmeßverfahren laufen mit steigender Mittelspannung die zulässigen Oberspannungen zwischen Warmstreckgrenze und Dauerstandfestigkeit. Die obere und untere Grenzspannungslinie enden wiederum in Höhe der Dauerstandfestigkeit.

Für beide Stähle liegt die Dauerfestigkeit bei der Mittelspannung Null (Wechselfestigkeit) unterhalb der Warmstreckgrenze. Die bei diesen Wechselfestigkeiten auftretenden Verformungen sind daher elastischer Natur, d. h. es treten keine meßbaren Zeit- oder bleibenden Dehnungen auf. Anders liegen die Verhältnisse bei dem Molybdänstahl. Hier ergibt sich ein Wechselfestigkeitswert, der oberhalb der Warmstreckgrenze, d. h. im plastischen Gebiet, liegt. Trotz gleich großen Zug- und Druckkräften tritt ein Dehnen auf; doch bleiben die Dehnbeträge gerade noch unterhalb der zulässigen Grenze. Allerdings ist die Art der Lastaufgabe nicht ohne Einfluß auf die Größe der Dehnung. Nur bei allmählich gesteigertem Schwingungsaussschlag lassen sich unzulässig hohe Anfangsdehnungen vermeiden, ein Fall, der im Betrieb meist nicht vorliegen dürfte; daher kommt für den Konstrukteur als ausnutzbarer Spannungsbereich ohne unzulässige Dehnung nur die dreieckige Fläche in Frage, bei der die obere Grenzspannungslinie mit der Dauerstandfestigkeit zusammenfällt.

Übereinstimmend trifft für die untersuchten Stähle zu, daß die Mittelspannung nicht bis zur Höhe der Dauerstandfestigkeit gesteigert werden darf, wenn dieser noch ein Spannungsschlag überlagert werden soll, da es sonst zu einer Überschreitung der Dehnbedingungen kommt. Weiter ist aus dem Verlauf der Grenzspannungslinien zu entnehmen, daß für den Chrom-Molybdän- und den Chromstahl sogar Oberspannungen, die die Dauerstandfestigkeit überschreiten, keine unzulässigen Dehnbeiträge ergeben, sofern die Mittelspannung nicht in der Nähe ihres Grenzwert liegt. Dies ist insofern bemerkenswert, als für beide Verfahren — nämlich Bestimmung der Dauerstandfestigkeit und der Dauerfestigkeit gleiche Dehnbedingungen gestellt sind. Eine Erklärung ist darin zu suchen, daß infolge der stetigen Belastungswechsel eine im Dauerversuch aufgebrachte Oberspannung tatsächlich nur für Bruchteile der gesamten Versuchszeit zur Wirkung kommt und daher nicht zu der gleichen Dehngeschwindigkeit bzw. bleibenden Dehnung führt, die eine ruhende Beanspruchung in gleicher Größe und während der gleichen Zeitdauer hervorruft.

Mit ähnlichen Fragen über Fließvorgänge unter wechselnder Beanspruchung beschäftigen sich in neuester Zeit auch Bernhardt und Haemann [11] sowie Gürtler und Schmid [12].

Noch ein kurzes Wort über die bei Schwingungsversuchen in der Wärme zu beobachtenden Brucherscheinungen [10]. Kennzeichnende Beispiele hierfür enthalten die Abbildungen 14a bis 14f. Es kommen sowohl Dauerbrüche als auch Verformungsbrüche vor. Verformungsbrüche treten besonders bei den Wechselbelastungen auf, deren Spannung im Gebiet zwischen Warmstreckgrenze und Warmzugfestigkeit liegen, und außerdem bei Stählen mit verhältnismäßig hohen Belastungsdehnungen (Abbildung 14a). In Dauerversuchen bei Raumtemperatur treten häufig bei hoher Überbelastung des Werkstoffs mehrere Dauerbruchrisse gleichzeitig auf, die zumeist in verschiedenen Ebenen liegen. Diese gleiche Brucherscheinung konnte auch bei Dauerversuchen in der Wärme festgestellt werden (Abbildung 14b). In den meisten Fällen gehen die Dauerbrüche bei höheren Temperaturen (Abbildung 14c und 14f) in gleicher Weise wie bei Raumtemperatur (Abbildung 14d) von einer örtlichen Schwächestelle der Staboberfläche aus; nur selten kann beobachtet werden, daß die Ausgangsstelle durch eine örtliche Fehlstelle im Werkstoffinnern bedingt ist (Abbildung 14e).

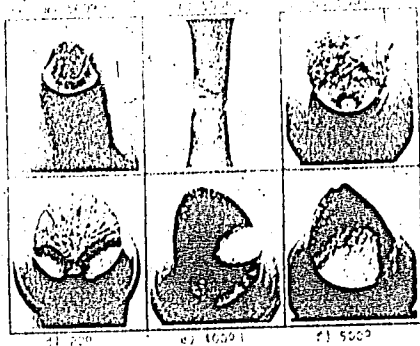


Abb. 14

Bruchausbildung unter Zugdruckbeanspruchung bei verschiedenen Temperaturen

Abbildung 15 gibt einen Längsschliff einer bei 500° im Dauerbruchversuch gebrochenen Probe wieder; aus dieser Abbildung ist zu entnehmen, daß die Dauerbruchrisse entsprechend der Beanspruchungsart senkrecht zur Stabachse verlaufen und daß die Rißausbreitung bei 500° intrakristallin erfolgt! Unter Berücksichtigung der bisher in Dauerbruchversuchen bei höheren Temperaturen gebrochenen untersuchten Proben kann gefolgert

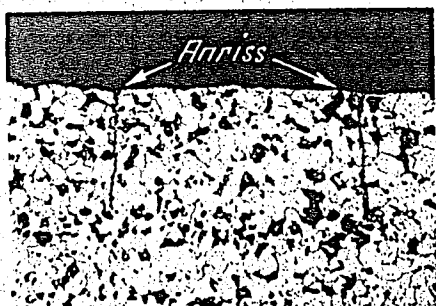


Abb. 15

Ausbreitung von Dauerbruchrissen eines Mo-Stahles bei 500°

werden, daß abgesehen von den Verformungsbrüchen keine grundsätzlichen Unterschiede in der Art, dem Aussehen und Verlauf der Dauerbrüche bei Raumtemperatur und in der Wärme vorhanden sind.

Ich fasse kurz zusammen: Bei höheren Temperaturen tritt unter Zugdruck-Wechselbeanspruchung in gleicher Weise wie beim Dauerstandsversuch ein Dehnen des Probestabes ein. Infolgedessen ist das Wohlerverfahren, das diese Dehnung unberücksichtigt läßt, zur Ermittlung von Dauerfestigkeits-Schaubildern in der Wärme nicht ausreichend. Vielmehr ist es notwendig, durch Festlegung bestimmter Werte für die zulässige Dehngeschwindigkeit in einem bestimmten Versuchabschnitt und Begrenzung der bleibenden Dehnung nach einer bestimmten Versuchszeit die Dauerfestigkeit in der Wärme in entsprechender Weise zu ermitteln, wie das beim Dauerstandsversuch geschieht.

Der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung
vorgelesen am 7. Mai 1942

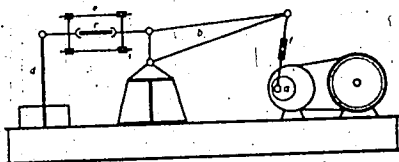
Schrifttum

- [1] A. Thome: Leitzugversuche an schweißverbindungsbeanspruchten Handbuch der Werkstoffprüfung, Herg. v. E. Sackel, Bd. 2 Prüfung der Schweißverbindungen, Werkstoff-Beilage 1939 S. 179/81.
- [2] DIN-Vornorm: DVM-Prüfverfahren 1001.
- [3] DIN-Vornorm: DVM-Prüfverfahren A 112.
- [4] A. Pomp: Werkstoff-Handbuch Stahl und Eisen, 8. Aufl., Düsseldorf 1937, Bd. 6, 17.
- [5] W. Mars: Luftlöcher für die Durchführung von Dauerstandsversuchen. Arch. Eisenhüttenwes., 10 (1936/37) S. 559.
- [6] A. Pomp und A. Dahmann: Entwicklung eines abgekürzten Prüfverfahrens zur Ermittlung der Dauerstandfestigkeit von Stahl bei erhöhten Temperaturen. Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforschg 9 (1927) S. 33/52; vgl. Werkstoffausschuß-Bericht Nr. 93 des VDIh (1927).
- [7] DIN-Vornorm: DVM-Prüfverfahren A 117/A 118.
- [8] M. Hempel und H.-E. Tillmanns: Verhalten des Stahles bei höheren Temperaturen unter wechselnder Zugbeanspruchung. Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforschg 10 (1936) S. 163/82.
- [9] M. Hempel und F. Ardelt: Verhalten des Stahles in der Wärme unter Zugdruck-Wechselbeanspruchung. Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforschg 21 (1939) S. 115 bis 132; vgl. Arch. Eisenhüttenwes., 12 (1938/39) S. 553/64.
- [10] M. Hempel und H. Krug: Zugdruck-Dauerversuche an Stahl bei höheren Temperaturen und ihre Auswertung nach verschiedenen Verfahren. Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforschg 21 (1942) S. 71/95.
- [11] E. O. Bernhardt und H. Hanemann: Über den Kriechvorgang bei dynamischer Belastung und den Begriff der dynamischen Kriechfestigkeit. Zs. Metallkde 30 (1938) S. 401/09.
- [12] G. Gürtler und E. Schmid: Temperaturabhängigkeit der Dauerbewährung metallischer Werkstoffe bei ruhender und wechselnder Beanspruchung. Zs. VDI 83 (1939) S. 749/57.

Aussprache

Houdremont: Ich danke Herrn Pomp für seine Ausführungen. Ich glaube, daß wenn man sich mit diesem Problem der Dauerbeanspruchung der Metalle beschäftigt, Herr Pomp schon mit Recht darauf hingewiesen hat, daß wir bei Raumtemperatur Abstriche wegen der Streckgrenze machen müssen, d. h. wegen Beanspruchungen, bei denen unzulässige Dehnungen auftreten. Die Ausführungen zielen in der Zusammenfassung, daß auch bei höheren Temperaturen etwas Ähnliches geschehen muß, d. h. der Konstrukteur muß bestimmte Dehnungen, die er nicht gebrauchen kann, mit in Betrachtigung stellen, und dementsprechend müssen die Ermittlungen derartigen vielschrittiger Beanspruchungen in der Wärme nicht nur nach dem Gesichtspunkt des Nichtbrechens aufgestellt werden, sondern nach dem Gesichtspunkt der entsprechend vielschrittigen maximalen Dehnungen. Ich stelle den Vortrag zur Erörterung.

Siebel, Berlin (als Gast): In der Materialprüfungsanstalt Stuttgart wurden in den letzten Jahren an einer Reihe von Leichtmetall-Legierungen Wärmeschwingungsversuche mit überlagerter ruhender Vorspannung durchgeführt¹⁾. Die Wirkungsweise der für die Untersuchungen entwickelten Prüfmaschine geht aus der schematischen Darstellung gemäß Abbildung I hervor.



- | | |
|-------------|-------------------|
| a Exzenter | d Metallfeder |
| b Kniehebel | e Parallelführung |
| c Probestab | f Verstellmutter |

Abb. I

Schematischer Aufbau der Zug-Druck-Schwingungsprüfmaschine

Der am Exzenter *a* einstellbare Schwingungsaus Schlag wird über einen Kniehebel *b* auf die von einem Ofen umgebene Probe *c* übertragen und die wirksame Schwingungsbeanspruchung an der Blattfeder *d* gemessen. Die beiden Einspannköpfe *e*₁ und *e*₂ sind durch eine Parallelführung so geführt, daß während des Laufs der Maschine keine zusätzliche Biegebeanspruchung auf den Probestab übertragen werden kann. Die statische Zug- oder Druckvorspannung kann durch Verkürzen oder Verlängern der Pleuelstange durch eine Verstellmutter *f* auf den Probestab aufgebracht werden. Der stufenlos, mit Hilfe einer doppelten Exzentrizität verstellbare Exzenter wird von

¹⁾ E. Siebel, W. Steurer u. G. Stähli: Prüfung von Leichtmetall-Legierungen bei höheren Temperaturen unter gleichzeitiger ruhender und schwingender Beanspruchung. *Zs. Metallkde.* 31 (1922) S. 145-150.

Die Dauer- und
Zugversuche sind
aus Vollständig-
keit ausgeführt
worden. Die Ein-
wirkung der Sch-
wingungen auf die
Dauerfestigkeit
wurde durch die
Herstellung aus
demselben Material
auf Zugversuchen
und die Prüfung
auf Druckversuchen
überprüft. Die
Dauerfestigkeit
von 1000 Last-
wechseln pro Minute

ist bei Zugversuchen
unverändert geblieben.
Die Dauerfestigkeit
auf Zugversuchen
wurde durch die
Herstellung aus
demselben Material
auf Zugversuchen
und die Prüfung
auf Druckversuchen
überprüft. Die
Dauerfestigkeit
von 1000 Last-
wechseln pro Minute

ist bei Zugversuchen
unverändert geblieben.
Die Dauerfestigkeit
auf Zugversuchen
wurde durch die
Herstellung aus
demselben Material
auf Zugversuchen
und die Prüfung
auf Druckversuchen
überprüft. Die
Dauerfestigkeit
von 1000 Last-
wechseln pro Minute

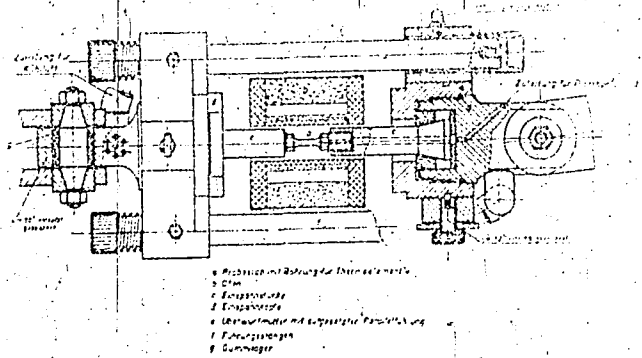


Abb. 2
Prüfteil der Zug-Druck-Schwingungsprüfmaschine

Zur Abkürzung der Untersuchungen erschien es zweckmäßig, die Schwingungsversuche nur bei der Vorspannung 0 und bei Zugvorspannungen in der Nähe der DYM-Dauerstandfestigkeit durchzuführen. Bei der Vorspannung 0 ruft die Schwingungsbeanspruchung in der Wärme im allgemeinen keine plastische Verformung des Werkstoffs hervor und das Wöhlerverfahren ergibt die reine Schwingungsfestigkeit, während bei Zugvorspannungen in Höhe der DYM-Dauerstandfestigkeit diejenige Amplitude ermittelt werden kann, welche gemäß den geforderten Bedingungen nach 10 Millionen Lastwechseln weder einen Dauerbruch noch eine größere Kriechdehnung ab 1% hervorruft. Die Verbindung dieser beiden Grenzbeanspruchungen ergibt dann in der Haigh'schen Darstellung die obere Begrenzung des Dauerfestigkeitschaubildes.

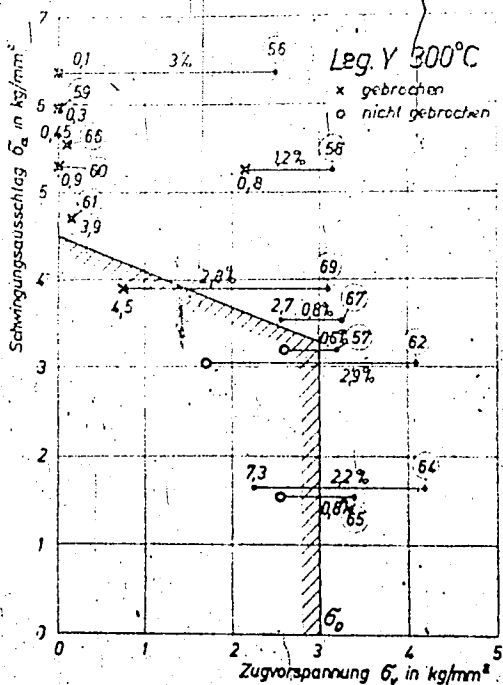


Abb. 3

Dauerfestigkeitsschaubild der Legierung A bei 300°C

In Abbildung 3 bis 5 sind die Festigkeitsschaubilder der Schwingungsversuche bei 300° C in ein Koordinatensystem mit der Zugvorspannung als Abszisse und dem Schwingungsausschlag als Ordinate eingetragen. Jeder Versuch ist mit seinem Anfangs- und Endspannungswert eingezeichnet, die beide durch eine Linie miteinander verbunden sind, an welcher die dem Spannungsabfall entsprechende Dehnung der Probe vermerkt ist. Die innerhalb von 10 Millionen Lastwechseln gebrochenen Versuchsstäbe sind mit

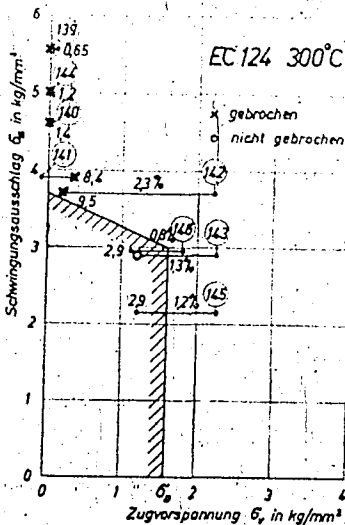


Abb. 4

Dauerfestigkeitsschaubild der Legierung B bei 300° C

Kreuzen, die nichtgebrochenen Stäbe aber durch Kreise gekennzeichnet, wobei bei den gebrochenen Stäben und den vorzeitig beendeten Versuchen die Lastwechselzahl bis zum Bruch bzw. bis zum Versuchsende in Millionen angegeben ist. Weiterhin sind zur besseren Auffindung der Versuche die Versuchsnummern vermerkt. Der Festigkeitsbereich, in welchem die Bedingung erfüllt ist, daß nach 10 Millionen Lastwechseln weder ein Dauerbruch noch eine größere Kriechdehnung als 1% eintritt bzw. bei welchem die Vorspannung die DVM-Dauerstandfestigkeit erreicht, ist durch Schraffur gekennzeichnet. In der zusammenfassenden Darstellung, Abbildung 6, sind die Dauerfestigkeitsschaubilder der Legierung A, B und C einander gegenübergestellt.

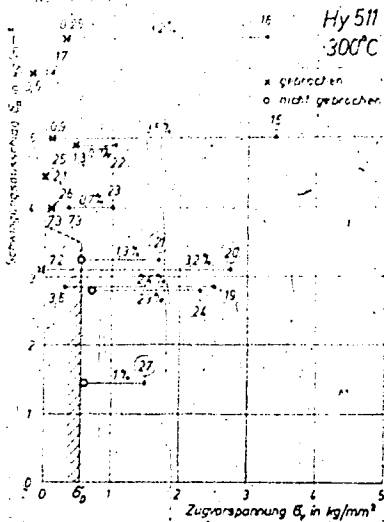


Abb. 5
Dauerfestigkeitsschaubild der Legierung C bei 300°C

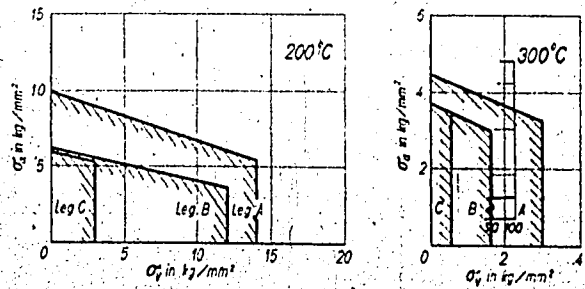


Abb. 6
Dauerfestigkeitsschaubilder der Legierung A, B, C

Hempel (nachträglich angefügt): Durch die von Herrn Sebel und Mitarbeitern durchgeführten Wärmeschwängungsversuche an Leichtmetallen ist ein weiterer wertvoller Beitrag zur Frage des Werkstoffverhaltens bei höheren Temperaturen unter wechselnder Beanspruchung gegeben worden, da hier ebenfalls den Efflorescenzerscheinungen und der Zusammenhang der Wechselfestigkeit mit der Dauerstandfestigkeit Beachtung geschon wurde. Während bei den von Herrn Pompl mitgeteilten Versuchen Stähle verschiedener Zusammensetzung in der Wärme bei verschiedenen Zugmittelspannungen und Wechselspannungen unter gleichbleibender äußerer Belastung und gleichzeitiger Messung der Stabdehnungen untersucht wurden, wurde die Prüfmethode von Leichtmetalllegierungen in der Materialprüfungsanstalt Stuttgart bei verschiedenen Wechselspannungen und zwei verschiedenen Zugmittelspannungen unter gleichbleibender äußerer Verformung vorgenommen, so daß beim Auftreten bleibender Formänderungen in Probestab eine Änderung der Mittelspannung eintritt, die zur Bestimmung der Zeit-Dehnungs-Linien benutzt wurde. Trotz dieser Unterschiede in der Versuchsdurchführung und den Werkstoffarten zeigen die Versuche beider Untersuchungsstellen jedoch mit aller Deutlichkeit, daß zur Bestimmung eines zulässigen Wechselfestigkeitsbereichs bei höheren Temperaturen die sich im Werkstoff abspielenden Vorgänge berücksichtigt werden müssen; denn bei Dauerversuchen in der Wärme werden die Verhältnisse gegen über Versuchen bei Raumtemperatur noch unübersichtlicher, da zu den Verfestigungs- und Zerrüttungserscheinungen noch Formänderungen kommen, die von der Mittel- und Oberspannung, von der Prüfergeschwindigkeit und der Beanspruchungsdauer abhängig sind.