

FAILURE OF MATERIAL IN THE LOW CYCLE FATIGUE RANGE

H. DIETMANN, W. FRIEDRICH

Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 32, D-7000 Stuttgart 80, Germany

SUMMARY

It is significant for the material behaviour in the low cycle fatigue (LCF) range, that deformations occur in the highest stressed zones during each loading cycle. They are regarded to be decisive for the material damage. Failure through crack formation, which possibly might result from this, is usually controlled by failure curves (i.e. strain amplitude vs. cycles-to-failure). These failure curves are determined experimentally under constant mean strain. If, however, the mean strain under service conditions is not stable, but increases incrementally, crack initiation will occur at a lower number of cycles. It was the purpose of the investigations described to analyze the conditions under which such an incremental increase of the mean strain takes place. This can be accomplished by means of a simple mechanical model, namely a bar with rectangular cross section made of linearelastic-perfectly plastic material, which is loaded by a constant tensile stress σ_t and a superimposed reversed bending strain with the amplitude ε_b . The increase of the mean stress per loading cycle $\Delta\varepsilon_m$ in this bar can be determined within certain ratios of σ_t/ε_b as

$$\Delta\varepsilon_m = 2\varepsilon_b [1 - 2\sqrt{(\sigma_y - \sigma_t)/E\varepsilon_b}].$$

By applying the results of this model to technical components it can be shown that a similar deformation mechanism is possible, if during each loading cycle the component is subjected to primary membrane stresses together with primary bending stresses or secondary stresses. Assuming the linearelastic material range extends over $2\sigma_y$ or $2\varepsilon_y$, respectively, there does not occur an incrementally increasing mean strain or any cyclic plastic deformation as long as the resulting maximum stress does not exceed twice the yield strength—as it is usually required by the technical codes. Actually, however, the elastic range is smaller, due to the Bauschinger-effect. Therefore, it cannot be excluded that under certain conditions cyclic or incrementally increasing plastic deformations will take place, which might influence the service life, especially when no additional safety factors are prescribed. In order to control the deformation behaviour, it is necessary to analyze the loading conditions as described, and to determine strain-controlled failure curves with $\Delta\varepsilon_m$ as a parameter.

As an example for the kind of deformation discussed above, and the subsequent failure, experimental investigations with expansion bellows as used in power plants are presented. Similar loading conditions exist in fuel element tubes of nuclear reactors.

1. Verformungsverhalten bei wiederholter Belastung

Je nach Größe der entstehenden Dehnung sind bei einem plastisch deformierbaren Werkstoff unter einachsiger, wiederholter Zugbelastung verschiedene Stadien der elastisch-plastischen Verformung möglich. Sie sind schematisch in Bild 1 für einen linearelastisch-idealplastischen Werkstoff mit der Streckgrenze σ_F und der Dauerschwingfestigkeit σ_D dargestellt, wie sie an der höchstbeanspruchten Stelle eines Bauteils mit inhomogener Spannungsverteilung auftreten können. Solange die aufgebrachte Spannung σ unter der Streckgrenze σ_F bzw. die Dehnung unter der Streckgrenzendehnung $\epsilon_F = \sigma_F/E$ bleibt, verformt sich der Werkstoff (makroskopisch) rein elastisch. Ist dabei im besonderen $\sigma < \sigma_D$ (Bild 1a), so ist das Bauteil dauerfest, ist $\sigma_D \leq \sigma < \sigma_F$, so vermag es eine bestimmte, dem Wöhlerdiagramm zu entnehmende Anzahl von Belastungen ohne Bruch zu ertragen. Übersteigt die bei der ersten Belastung aufzunehmende Dehnung den Wert ϵ_F , so verformt sich der Werkstoff plastisch (Bild 1b). Bei der Entlastung entsteht dann eine bleibende Dehnung ϵ_{bl} und eine (Druck-) Eigenspannung σ_E von entsprechender Größe. War die bei der Belastung erreichte Dehnung kleiner als $2 \cdot \epsilon_F$, so ist die Verformung des Werkstoffs theoretisch bei der Entlastung und jeder folgenden Be- und Entlastung wieder elastisch. Dieser als "elastic shake down" bezeichnete Vorgang ist eine Folge der Spannungsumlagerung, die von der plastischen Verformung bewirkt wurde. Wenn hingegen die Dehnung bei der ersten Belastung den Wert $2 \cdot \epsilon_F$ übersteigt (Bild 1c), kann auch bei der Entlastung eine plastische Verformung - und zwar in entgegengesetzter Richtung wie bei der Belastung - auftreten. An diese plastische Rückverformung schließt sich dann bei jeder nachfolgenden Be- und Entlastung wieder eine begrenzte plastische Verformung an. Es entsteht so eine Hysteresisschleife der elastisch-plastischen Wechselverformung, die bei jedem Lastzyklus durchlaufen wird. Ob nur eine einmalige plastische Deformation eintritt oder ob plastische Wechselverformungen auftreten, hängt vom Verlauf der Fließkurve des Bauteils - das ist die Last-Dehnungs-Charakteristik der höchstbeanspruchten Stelle - ab [1, 2].

Durch die Hysteresisschleife ist die Werkstoffbeanspruchung im Zeitfestigkeitsgebiet gekennzeichnet. Die Zahl der ohne Anriß ertragbaren Lastspiele N_A wird nämlich in erster Linie von der bei jedem Lastzyklus durchgemessenen Dehnungsschwingbreite $2\epsilon_a$ bestimmt. Diese Abhängigkeit $\epsilon_a = f(N_A)$ drückt sich in der experimentell zu ermittelnden Anrißkennlinie jedes Werkstoffs aus, für die Bild 2 einige Beispiele zeigt [3].

Die Form der Hysteresisschleife eines bestimmten Werkstoffs muß nicht immer gleich sein, sie kann sich vielmehr mit zunehmender Zahl der Belastungen verändern. Man unterscheidet dabei neben neutralem, d.h. unverändertem Verhalten zwischen Verfestigung und Entfestigung des Werkstoffs. Die daraus sich ergebenden Veränderungen der Hysteresisschleife sind in Bild 3 schematisch dargestellt, wobei jeweils entweder die Spannungsgrenzen konstant

gehalten wurden ($2\bar{\epsilon}_a = \text{const.}$, Spannungsverfahren) oder die Dehnungsgrenzen ($2\epsilon_a = \text{const.}$, Dehnungsverfahren). Gewöhnlich ist der Ver- oder Entfestigungsvorgang nach etwa 10 % der Lebensdauer abgeschlossen. Dann ist offenbar ein stabiler Zustand erreicht, der sich bis zum Anriß kaum mehr ändert. Ob sich ein Werkstoff verfestigt oder entfestigt, hängt vor allem von seinem Behandlungszustand ab. Geglühte Werkstoffe verfestigen sich normalerweise während der Wechselverformung, kaltverformte und vergütete neigen zur Entfestigung.

Neben der Form der Hysteresisschleife kann sich auch ihre Lage, d.h. ihre Mitteldehnung ϵ_m verändern. Dabei muß man unterscheiden zwischen der plastischen Verformung bei der ersten Belastung, wo ϵ_m von Null auf einen bestimmten, bei allen nachfolgenden Lastspielen konstanten Wert ansteigt, und solchen Fällen, in denen sich ϵ_m bei jedem Lastzyklus vergrößert. Im ersten Fall wird durch die Mitteldehnung lediglich eine einmalige plastische Formänderung hervorgerufen, die - wie experimentell festgestellt - keinen nennenswerten Einfluß auf die ertragbare elastisch-plastische Dehnungsschwingbreite $2\bar{\epsilon}_a$ ausübt. Die Lage der Hysteresisschleife hat sich also nach dem ersten Lastzyklus stabilisiert. Es gibt jedoch auch Fälle, wo die Mitteldehnung bei jedem Lastspiel um einen bestimmten Betrag zunimmt. Die Hysteresisschleife verschiebt sich dann in Richtung größerer Dehnung, ihre Lage ist nicht mehr stabil. In Bild 4 sind zwei solcher Fälle dargestellt, wobei sich im einen Fall der Werkstoff immer nur während der Belastung plastisch verformt (Bild 4a), im anderen Fall sowohl bei der Belastung als auch bei der Entlastung (Bild 4b). Wenn man die gesamte Verformung je Lastzyklus $\Delta\epsilon_{\text{ges}}$ trennt in einen "statischen" Anteil mit der Mitteldehnung $\Delta\epsilon_m$ und in einen "zyklischen" Anteil mit der Dehnungsschwingbreite $2\bar{\epsilon}_a$ - wie in Bild 4 geschehen -, so kann man sich eine derartige Beanspruchung als Überlagerung einer statischen und einer wechselnden Lastkomponente vorstellen. Als Versagensmöglichkeit ist dementsprechend neben der Rißbildung, für die in erster Linie der zyklische Verformungsanteil maßgebend ist, auch das Auftreten unzulässig großer plastischer Deformationen, die sich als Summe der statischen Verformungsanteile ergeben, in Betracht zu ziehen. Während sich die Gefahr der Rißbildung mit Hilfe der in Bild 2 dargestellten Anrißkennlinien gut abschätzen läßt, ist noch wenig darüber bekannt, wie sich eine schrittweise zunehmende Mitteldehnung auf das Werkstoffverhalten auswirkt und insbesondere darüber, wie sie sich quantitativ erfassen läßt. Letzteres wird im folgenden Abschnitt anhand eines werkstoffmechanischen Modells untersucht.

2. Werkstoffmechanische Modelle

Der Mechanismus der elastisch-plastischen Verformungsvorgänge läßt sich in einfacher und übersichtlicher Weise darstellen, wenn man als Modell einen Stab mit Rechteckquerschnitt aus linearelastisch-idealplastischem Werkstoff unter statischer Zug- und schwellender Biegebelastung wählt, wie in Bild 5 dargestellt. Die Biegung soll dabei als Zwangsverformung wirken, so daß der Stab von seiner geradlinigen Ausgangsstellung bei jeder Belastung um den konstanten Betrag c durchgebogen und dann wieder in die Ausgangslage zurückgedrückt wird.

Der Stab unterliegt somit der in Bild 6 wiedergegebenen kombinierten Beanspruchung durch eine konstante Zugspannung σ_z und eine an- und abschwellige Biegedehnung mit der Schwingbreite $+\epsilon_b$ am Rand der Zugseite bzw. $-\epsilon_b$ auf der Druckseite. Untersucht man nun, wie sich der Stab unter der gemeinsamen Wirkung von σ_z und ϵ_b verformt, so stellt man fest, daß seine Mitteldehnung ϵ_m schrittweise zunehmen kann. Diese Zunahme der Mitteldehnung $\Delta\epsilon_m$ pro Lastzyklus läßt sich errechnen zu [4]

$$\Delta\epsilon_m = 2\epsilon_b \left(1 - 2 \sqrt{\frac{\sigma_F - \sigma_z}{E\epsilon_b}} \right) \quad (1)$$

Damit man positive Werte $\Delta\epsilon_m$ erhält, muß nach Gl. (1)

$$\frac{\epsilon_b}{\epsilon_F} \geq 4 \left(1 - \frac{\sigma_z}{\sigma_F} \right) \quad (2)$$

sein. Für kleinere Werte ϵ_b/ϵ_F stellt sich elastisches Werkstoffverhalten ein. Andererseits ist die Biegedehnung aber begrenzt durch die - dem Rechnungsansatz stillschweigend zugrunde gelegte - Annahme, daß Fließen nur auf einer Seite des Stabes auftritt. Daraus läßt sich die Bedingung

$$\frac{\epsilon_b}{\epsilon_F} \leq \frac{1}{1 - \frac{\sigma_z}{\sigma_F}} \quad (3)$$

ableiten. Wenn die beiden Forderungen nach Gl. (2) und (3) erfüllt sind, entsteht an der höchstbeanspruchten Stelle - hier also am oberen Stabrand - der in Bild 4a schematisch wiedergegebene Verformungsmechanismus, der sich aus einer elastischen Schwell- oder Wechselbeanspruchung und einem inkrementellen Zuwachs der Mitteldehnung pro Lastspiel zusammensetzt.

Für den Fall, daß der Stab nicht nur nach einer Richtung, sondern nach beiden Seiten gebogen wird, so daß jeweils am einen Rand die Zugfließgrenze, am anderen Rand die Druckfließgrenze erreicht wird, tritt sowohl eine elastisch-plastische zyklische Wechselverformung als auch eine stetige Zunahme der Mitteldehnung ein, wie dies in Bild 4b schematisch dargestellt ist.

In dem bisher betrachteten Stabmodell herrscht ein einachsiger Spannungszustand. Es soll nun auf den zweiachsigen Spannungszustand - den Regelfall technischer Konstruktionen - erweitert werden. Dazu wird die Belastung wie in Bild 7 geändert. Der Stab unterliegt somit wieder einer schwellenden Biegeverformung mit der Amplitude ϵ_b , die durch die Durchbiegung c begrenzt ist, und einer konstanten Zugspannung σ_z , die jetzt aber senkrecht zur Stabachse wirkt. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Fließgrenzen für Zug- und Druckbeanspruchung. Das ist anschaulich aus Bild 8 zu ersehen. Hier ist ein (σ_x, σ_z) -Schaubild mit der v. Mises'schen Fließbedingung dargestellt, die sich für den zweiachsigen Spannungszustand als Ellipse

mit der Gleichung

$$\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_z = \sigma_{F_0}^2 \quad (4)$$

darstellt. Für eine vorgegebene Spannung $\sigma_z < \sigma_{F_0}$ erhält man die Zugfließgrenze

$$\sigma_F = \frac{1}{2} (\sigma_z + \sqrt{4\sigma_{F_0}^2 - 3\sigma_z^2}) \quad (5a)$$

und die Druckfließgrenze

$$\sigma_{dF} = \frac{1}{2} (\sigma_z - \sqrt{4\sigma_{F_0}^2 - 3\sigma_z^2}) \quad (5b)$$

wobei σ_{F_0} die Fließgrenze bei einachsigen Spannungszustand ist.

Die Verformung des Stabes unter der kombinierten Belastung von σ_z und ϵ_b wird bestimmt durch die Gleichgewichtsbedingung $\int \sigma_x dA = 0$ - wobei die unterschiedlichen Werte von σ_F und σ_{dF} zu berücksichtigen sind - und die kinematische Verträglichkeitsbedingung, nach der die Dehnung ϵ_x stets konstant oder linear über dem Querschnitt verteilt sein muß. Aus diesen Forderungen folgt, wie man durch eine zum einachsigen Fall analoge Ableitung zeigen kann, daß sich die Mitteldehnung $\Delta \epsilon_{mx}$ bei jedem Lastzyklus um den Betrag

$$\Delta \epsilon_{mx} = -2 \epsilon_b (1 - 2 \sqrt{\frac{\sigma_{dF}}{E \epsilon_b}}) \quad (6)$$

ändert, wenn die zu den Gln. (2) und (3) analoge Grenzbedingung

$$4 \frac{\sigma_{dF}}{\sigma_{F_0}} \leq \frac{\epsilon_b}{\epsilon_{F_0}} \leq \frac{1}{4} \left(1 + \frac{\sigma_F}{\sigma_{dF}}\right)^2 \cdot \frac{\sigma_{dF}}{\sigma_{F_0}} \quad (7)$$

erfüllt ist. Der Stab erfährt dann schrittweise eine Verkürzung in Längsrichtung, gleichzeitig aber eine Zunahme seiner Breite, d.h. eine Verlängerung in z-Richtung. Dies läßt sich anhand von Bild 8 zeigen. Die plastischen Dehnungen, welche die inkrementelle Änderung der Mitteldehnungen bewirken, werden durch den Vektor $d\epsilon_{pl}$ bestimmt, der im Punkt (σ_{dF}, σ_z) senkrecht auf der Fließgrenzkurve steht. Er läßt sich zerlegen in die Komponenten $d\epsilon_{xpl}$ und $d\epsilon_{zpl}$. Aus der in die negative x-Richtung weisenden Vektorkomponente $d\epsilon_{xpl}$ entsteht die negative Mitteldehnung $\Delta \epsilon_{mx}$, aus der positiven Komponente $d\epsilon_{zpl}$ die positive Mitteldehnung $\Delta \epsilon_{mz}$. Wegen der stets linearen Dehnungsverteilungen stehen die Mitteldehnungen in demselben, vom Winkel φ bestimmten Verhältnis zueinander wie die entsprechenden Vektorkomponenten, so daß die Beziehung

$$\frac{\Delta \epsilon_{mz}}{\Delta \epsilon_{mx}} = \frac{d\epsilon_{zpl}}{d\epsilon_{xpl}} = \tan \varphi = -\frac{2\sigma_z - \sigma_{dF}}{2\sigma_{dF} - \sigma_z} \quad (8)$$

gilt. Die inkrementelle Abnahme der Stablänge wird also kompensiert durch eine inkrementelle Zunahme der Stabbreite.

3. Praktische Auswirkungen

Wie im vorigen Abschnitt erläutert, entsteht unter bestimmten Beanspruchungskombinationen ein Mechanismus, der bei jedem Lastspiel eine einsinnig zunehmende Verformung hervorruft. Daß dieser für idealisierte Verhältnisse abgeleitete Verformungsmechanismus und die daraus resultierende Werkstoffschädigung nicht nur theoretisch möglich ist, sondern auch tatsächlich in der technischen Praxis auftritt - wenn auch zumeist in komplexerer Form - soll jetzt am Beispiel von Balgkompensatoren gezeigt werden.

Balgkompensatoren haben die Aufgabe, Längen- und Winkeländerungen in Rohrleitungssystemen auszugleichen, die durch Wärmedehnungen, Innendruck, Strömungskräfte u.a. entstehen. Da derartige Beanspruchungen jeweils beim An- und Abfahren einer Anlage - z.B. eines Kraftwerkes - auftreten, läßt man wegen der relativ geringen Anzahl solcher Lastwechsel in den höchstbeanspruchten Bereichen des Kompensators bewußt plastische Wechselverformungen zu [5]. Beim Anfahren der Anlage muß der Kompensator jeweils eine Axialverschiebung von bestimmter Größe aufnehmen, wobei er gleichzeitig durch Innendruck belastet wird; beim Abfahren wird die Axialbewegung wieder rückgängig gemacht, und der Innendruck verschwindet. An der höchstbeanspruchten Stelle des Kompensators - das ist in der Regel die Innenkrempe - herrscht unter dieser Belastung ein Spannungs- bzw. Dehnungszustand, der sich zusammensetzt aus Membran- und Biegespannungen infolge des Innendrucks sowie einer überlagerten Biegedehnung mit fester Amplitude infolge der axialen Zwangsverformung, wobei die resultierende maximale Dehnung i.allg. wesentlich größer ist als die doppelte Streckgrenzendehnung.

In Bild 9 sind die Ergebnisse zweier Versuchsreihen wiedergegeben, die mit austenitischen Balgkompensatoren der Nennweite 800 durchgeführt wurden. In diesen Versuchen wurde der Axialhub je Welle $\pm w$ in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastspiele N_A bestimmt, bei der ein durchgehender Anriß - und damit Leckage - eintrat. Die eine Serie wurde drucklos gefahren, so daß die Beanspruchung in einer zyklischen Zwangsverformung mit fester Amplitude bestand, die andere Serie mit einem konstanten Innendruck ($p = 9,5$ bar). Wie man sieht, hat sich die Anrißlastspielzahl für gleiche Axialverformung durch den zusätzlichen statischen Innendruck wesentlich verringert. Da die Dehnungsschwingbreite aber allein von der Größe der axialen Zwangsverformung bestimmt wird, muß dies darauf zurückgeführt werden, daß der statische Innendruck einen Verformungsmechanismus hervorgerufen hat, der im Prinzip dem des Modells nach Bild 7 entspricht, da gleichartige Beanspruchungsverhältnisse vorliegen. Die stetig zunehmende Mitteldehnung bewirkt offenbar eine erhöhte Werkstoffschädigung, die sich im

früheren Auftreten von Anrissen äußert.

Diese durch eine inkrementelle Zunahme der Mitteldehnung bei jedem Lastzyklus hervorgerufene Art der verstärkten Werkstoffschädigung und das hieraus sich ergebende Versagen wird im Schrifttum mit den Begriffen "incremental collapse" und "thermal stress ratchet" umschrieben. Der letztere Ausdruck deutet darauf hin, daß bei diesem Schädigungsmechanismus häufig Wärmespannungen beteiligt sind. Eine notwendige Voraussetzung für die inkrementelle Dehnungszunahme ist, daß bei jedem Lastzyklus ein Membranspannungsanteil wirksam ist, der sich nicht durch die plastische Verformung abbaut, sondern in voller Größe erhalten bleibt. Das bedeutet, daß dieser Spannungsanteil durch eine äußere Belastung hervorgerufen sein muß, der er das Gleichgewicht zu halten hat. Dies ist das Kennzeichen einer Primärspannung. Neben diesem primären Membranspannungsanteil können entweder weitere Primärspannungen - dann aber als Biegespannungen - oder Sekundärspannungen auftreten, also solche Spannungen, die sich in ungleichmäßiger Verteilung an geometrischen Diskontinuitäten einstellen, die aber infolge der plastischen Verformung des Werkstoffes begrenzt bleiben. Solange der - für fiktiv-elastisches Werkstoffverhalten errechnete - Maximalwert der resultierenden Spannungsverteilung den doppelten Betrag der Streckgrenze nicht überschreitet, kann gemäß Bild 1 theoretisch allenfalls eine einmalige plastische Verformung eintreten, nicht aber plastische Wechselverformungen. In den amerikanischen Regelwerken zur Berechnung von Reaktordruckbehältern und -komponenten [6] wird deshalb die Summe aus Primär- und Sekundärspannungen auf den zweifachen Streckgrenzenwert begrenzt. Wie aus den Gln. (2) und (7) abzuleiten ist, kann dann - da außerdem die Primärspannung höchstens $\frac{2}{3}$ der Streckgrenze sein darf - auch keine inkrementelle Dehnungszunahme auftreten. Theoretisch wäre man damit also sowohl gegen plastische Wechselverformungen als auch gegen einsinnig zunehmende plastische Formänderungen abgesichert. Das setzt aber voraus, daß sich der Werkstoff, wie in Bild 1 angenommen, tatsächlich über einen Bereich von $2\sigma_F$ bzw. $2\epsilon_F$ linear-elastisch verhält. Wie Bild 10 für 2 typische Beispiele zeigt, ist dies aber keineswegs der Fall. Nach jeder Lastumkehr biegt die Spannungs-Dehnungs-Linie vielmehr schon weit vor Erreichen der doppelten Streckgrenzendeckung von ihrem linearen Anstieg bzw. Rückgang ab, was den Beginn plastischer Verformungen anzeigt. Diese Erscheinung ist als Bauschinger-Effekt bekannt und wird auf Eigenspannungen im mikroskopischen Bereich zurückgeführt. Der elastisch durchlaufene Verformungsbereich ist also in Wirklichkeit wesentlich kleiner als theoretisch angenommen. Da in den erwähnten Berechnungsvorschriften die doppelte Streckgrenze als zulässiger Wert - d.h. ohne zusätzlichen Sicherheitsfaktor - eingesetzt wird, ist mithin die Möglichkeit nicht auszuschließen, daß auch bei Bauteilen, die regelgerecht ausgelegt sind, zyklische und bzw. oder inkrementell zunehmende plastische Verformungen auftreten. Um hier eine sichere Aussage machen zu können, sind eingehendere theoretische und experimentelle Untersuchungen der Verformungs- und Versagensmechanismen im Zeitfestigkeitsgebiet notwendig.

Schrifttum

- [1] Wellinger, K. und H. Dietmann:
Bestimmung von Formdehngrenzen
Materialprüfung 4 (1962) Nr. 2, S. 41/47
- [2] Dietmann, H.:
Fließvorgänge an Konstruktionen des Apparatebaus
Chemie-Ing.-Techn. 42 (1970) Nr. 11, S. 757/763
- [3] Wellinger, K. und G. Luft:
Wechselverformungsverhalten von Stählen
Mitt. VGB H. 1 (1968) S. 33/45
- [4] Dietmann, H. und W. Friedrich:
Werkstoffverhalten im Bereich der Zeitfestigkeit
In: Sonderheft der Staatl. Materialprüfungsanstalt Stuttgart
zum 70. Geburtstag von Prof.Dr.-Ing. habil. K. Wellinger,
Stuttgart 1974
- [5] Friedrich, W.:
Festigkeitsberechnung einwandiger Balgkompensatoren
Diss. Univ. Stuttgart (1973)
- [6] ASME Boiler and Pressure Vessel Code,
Sec. III. Nuclear Vessels, New York 1971

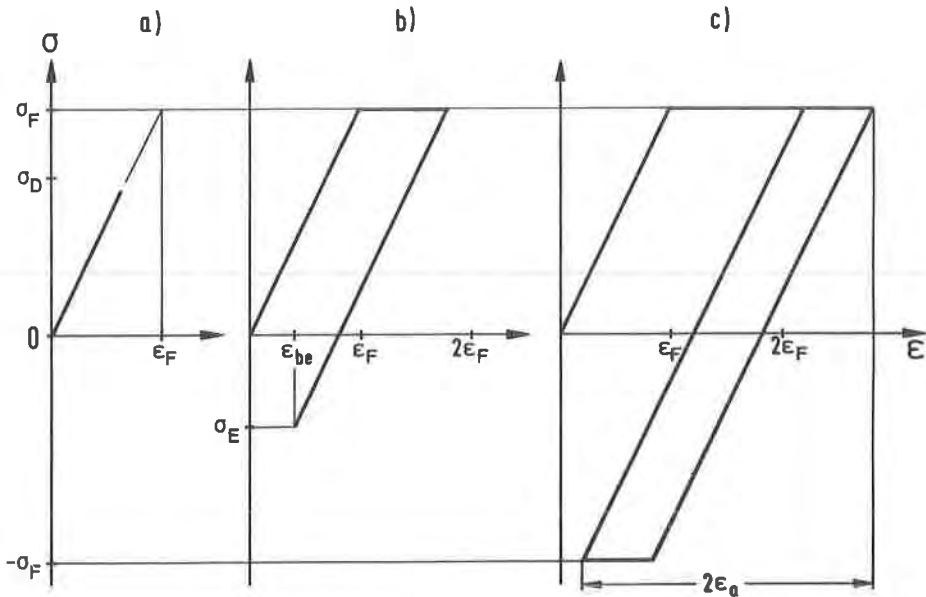


Bild 1: Elastisch-plastische Verformungsmöglichkeiten bei wiederholter Belastung

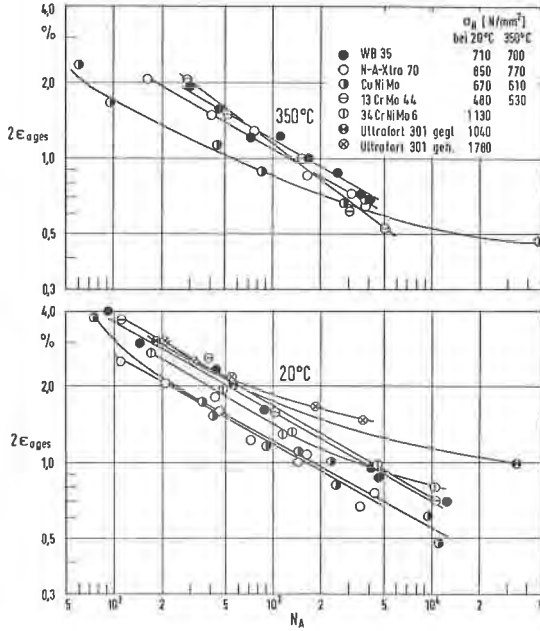


Bild 2: Anrißkennlinien verschiedener Werkstoffe bei 20° und 350°C (nach [3])

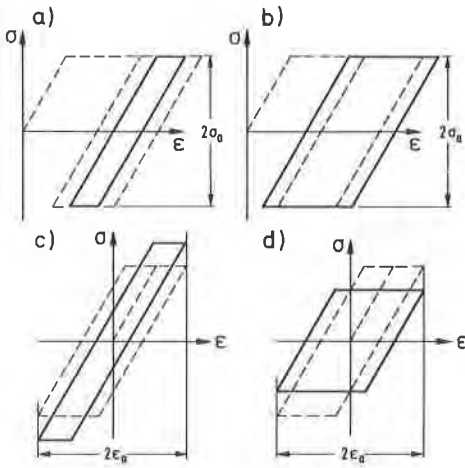


Bild 3: Werkstoffbedingte Veränderungen der Hysteresisschleife:

- Verfestigung: a) $2\sigma_a = \text{const.}$; c) $2\epsilon_a = \text{const.}$;
 Entfestigung: b) $2\sigma_a = \text{const.}$; d) $2\epsilon_a = \text{const.}$

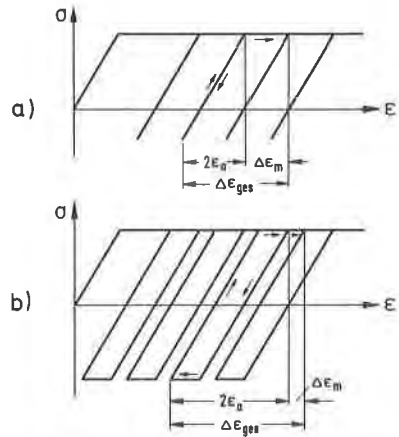


Bild 4: Elastisch-plastische Verformung mit schrittweise zunehmender Mitteldehnung bei
 a) elastischer Wechsel- bzw. Schwellverformung
 b) elastisch-plastischer Wechselverformung



Bild 5: Mechanisches Modell mit Belastung (einachsiger Spannungszustand)

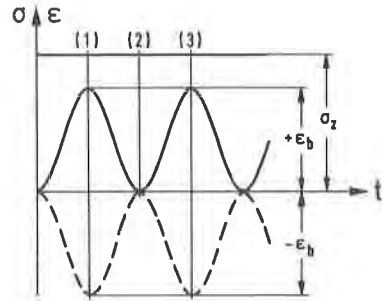


Bild 6: Zeitlicher Ablauf der äußeren Belastung

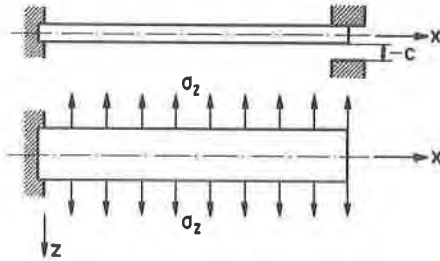


Bild 7: Mechanisches Modell mit Belastung (zweiachsiger Spannungszustand)

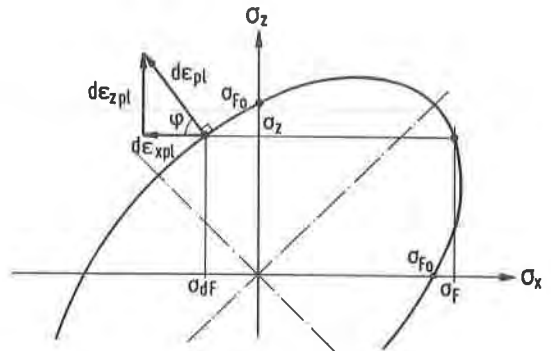


Bild 8: Fließgrenzkurve nach v. Mises (Gestaltänderungsenergiehypothese) für zweiachsigen Spannungszustand

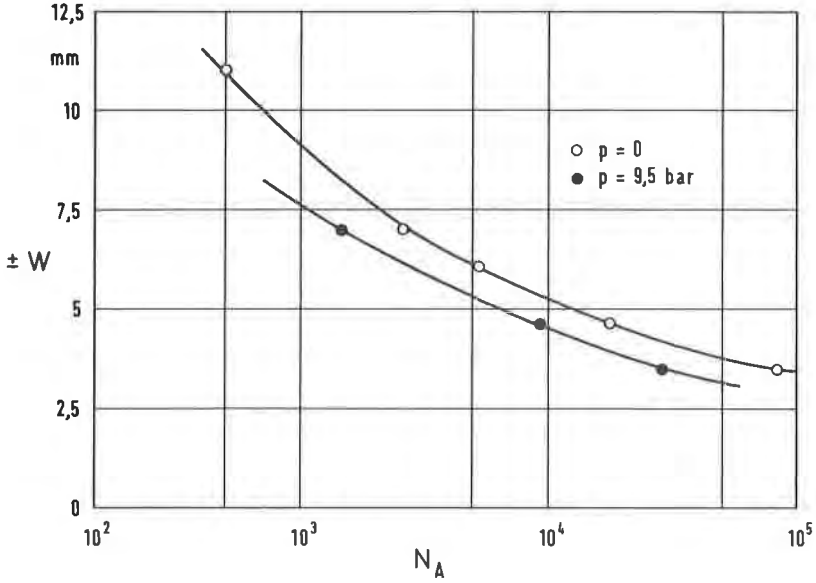


Bild 9: Versuchsergebnisse von Balgkompensatoren unter axialer Wechselverformung ohne und mit Innendruck (Werkstoff: X 10 CrNiTi 18 9)

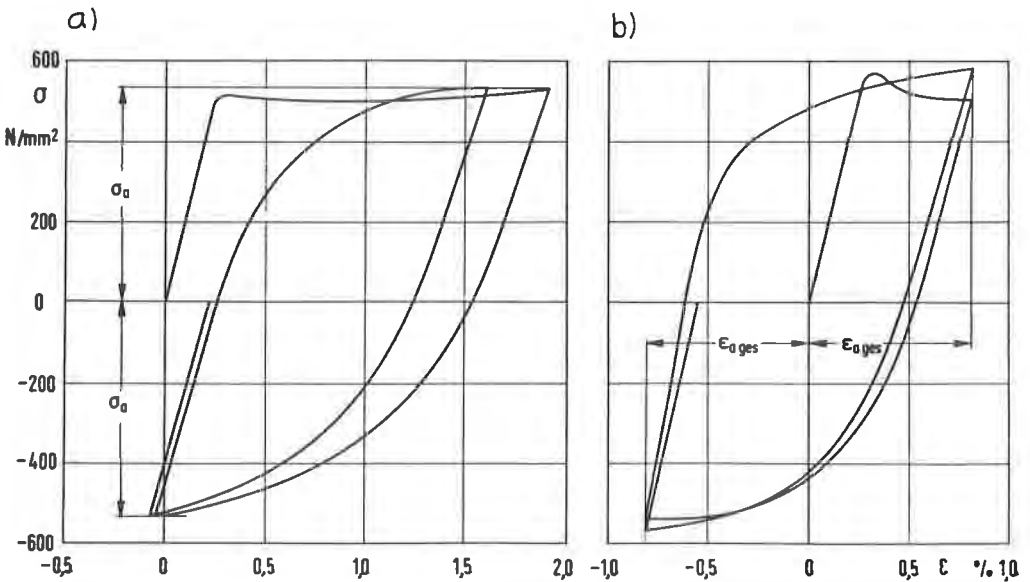


Bild 10: Hysteresisschleifen während der ersten beiden Belastungszyklen
 a) Werkstoff WB 35; $\pm \sigma_a = 530 \text{ N/mm}^2$ (Spannungsverfahren)
 b) Werkstoff CuNiMo; $\pm \epsilon_a = 0,8 \%$ (Dehnungsverfahren)