

Reflexionsmessungen an Metallfolien während zyklischer Beanspruchung

G. Meyer, G. Schott

1. Einleitung

Bei schwingbelasteten Bauteilen ist es oft wünschenswert, möglichst frühzeitig die Lebensdauer vorauszubestimmen. Dadurch kann eine höhere Betriebssicherheit gewährleistet und der Werkstoff optimal ausgenutzt werden.

Für die Registrierung der von einem Bauteil aufgenommenen und akkumulierten Ermüdungsschädigungen wurden in den letzten Jahren eine Reihe von Gebern als Ermüdungssensoren entwickelt. Als Beispiele seien Epoxidharze mit Graphit als Füllstoff genannt, die bei Schwingbelastung ihre Leitfähigkeit reproduzierbar ändern [1] [2], des weiteren transparente Lacküberzüge, die in Verbindung mit Polarisationsfolien nach bestimmter Belastung charakteristische Streifenmuster erzeugen [3] und sogenannte S-N-Streifen, die entsprechend der plastischen Verformung des Bauteils ihren elektrischen Widerstand verändern [4].

Im folgenden soll über Erfahrungen mit einem optischen Verfahren zur Lebensdauerüberwachung schwingbelasteter Bauteile berichtet werden, das von Rieger u. a. 1979 erstmals beschrieben wurde [5].

2. Grundlagen des Verfahrens

Bei zahlreichen mikroskopischen Ermüdungsuntersuchungen an duktilen Metallen konnte beobachtet werden, daß sich deren anfangs glänzende, polierte Oberfläche mit zunehmender Schwingspielzahl aufräut. Es entstanden Ermüdungsgleitbänder (auch F-Bänder oder persistente Gleitbänder genannt) sowie ggf. Extrusionen und Intrusionen.

Der Grad der Oberflächenaufrauung kann an geeigneten Metallfolien mit Hilfe eines einfachen Reflexionsmeßgerätes festgestellt werden (Bild 1). Es besteht aus einer

Lichtquelle und einer Fotodiode, die in einem Gehäuse aus Hartgewebe-Preßstoff so justiert sind, daß beim Aufsetzen auf eine reflektierende Oberfläche ein Strom fließt. Bezieht man den am Reflexionsgerät angezeigten Stromwert der rauhen Oberfläche auf den Wert der polierten, so ergibt sich der Reflexionsgrad r .

3. Versuchsergebnisse

Als Folien kamen gewalzte Bänder aus Reinstaluminium und Reinstzinn (Dicke jeweils 0,05 mm, Reinheit 99,99 %) zum Einsatz. Aus dem Material wurden in Walzrichtung Streifen mit Abmessungen von 8 mm x 20 mm geschnitten.

Für die Untersuchungen fanden Flachproben mit Rundkerben (ϕ 4 mm) aus HB 60 und St 38 (Bohrung 16 mm) Verwendung, auf die die Folien entsprechend Bild 2 mit kalthärtendem Epoxidharz (EGK 19) aufgeklebt wurden. Jede Probe war mit je zwei Sn- und 2 Al-Streifen bestückt. Die Proben wurden am Resonanzpulsator RPu6 einer Zugschwellbeanspruchung bei verschiedenen Spannungshorizonten ausgesetzt. Die Messung der Reflexionsänderung erfolgte in Abhängigkeit von der Schwingzahl. Wie bereits von Rieger u. a. [5] festgestellt, ist die Ausbildung von persistenten Gleitbändern sehr stark vom Folienwerkstoff abhängig. Nach Literaturangaben [6] steigt die Intensität der ausgebildeten Gleitbänder und damit die Empfindlichkeit der Folienmeßstreifen in der Reihenfolge an: Gold, Nickel, Kupfer, Aluminium, Zinn.

Bei unseren Versuchen konnten diese Unterschiede bestätigt werden.

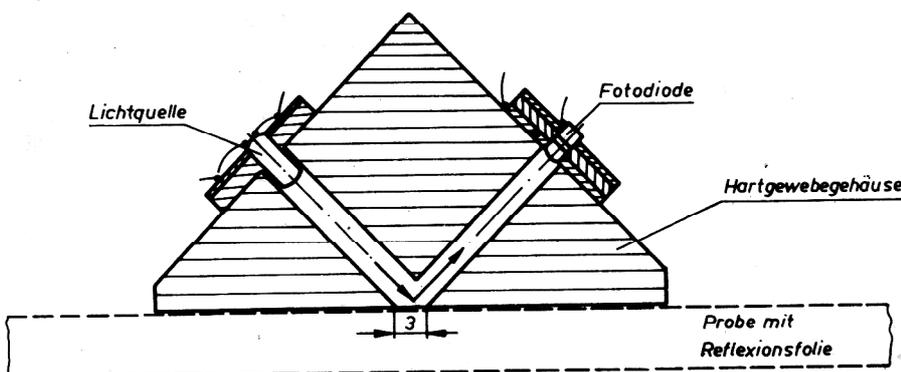


Bild 1
Anordnung für Reflexionsmessungen

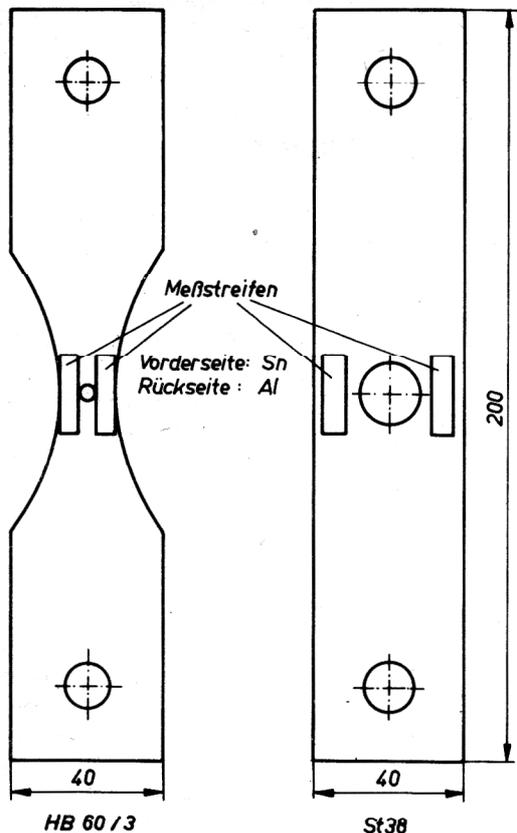


Bild 2
Flachproben mit aufgeklebten Folien

Einstufenversuch HB 60/3
Sn-Meßstreifen
 $\sigma_m = 190 \text{ MPa}$

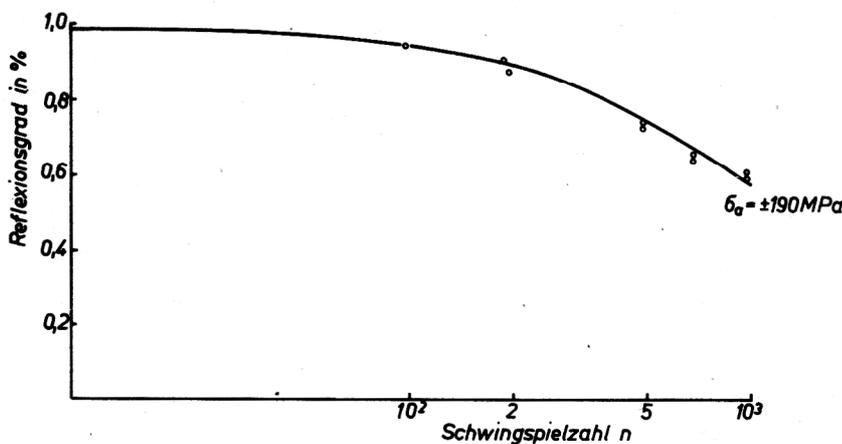


Bild 3
Änderung des Reflexionsgrades bei hoher Belastung für Sn-Streifen auf HB 60-Probekörpern

3.1. Einstufenversuche

Die ersten Untersuchungen zur Aufnahme von Reflexionsgradkurven waren Einstufenversuche mit verschiedenen Belastungshöhen.

In Bild 3 ist der Verlauf der auf den Ausgangswert bezogenen Reflexionswerte bei Zugschwellbelastung für Sn-Streifen auf HB 60-Probekörpern während der ersten tausend Schwingspiele dargestellt. Bereits nach 100 Schwingspielen beträgt bei Belastungen in der Nähe der Streckgrenze die Reflexionsabnahme etwa 5 %, nach 10^3 Schwingspielen sind es bereits 40 %.

Mit Meßstreifen aus Aluminium kann man an derselben Probe erst nach 10^4 Schwingspielen Änderungen des Re-

flexionsgrades feststellen. In Bild 4 ist die Abhängigkeit des Reflexionsgrades von der Höhe des Spannungsaus-schlages und dem Folienwerkstoff aufgezeichnet. Es sind grundsätzliche Tendenzen ablesbar:

1. Mit Erhöhung der Spannungsamplitude verschiebt sich der Steilabfall zu kleineren Schwingspielzahlen.
2. Die Abnahme des Reflexionsgrades zu Beginn der Schwingbelastung (im Bereich bis zu rund $5 \cdot 10^4$ Schwingspielen) ist bei den Sn-Folien ausgeprägter als bei den Al-Streifen.
3. Die Reflexionsgradänderung der Sn-Streifen zeigt einen S-förmigen Verlauf. Wenn der Reflexionsgrad auf etwa 10 bis 30 % der Ausgangswerte abgesunken ist, ändert er sich kaum mehr. Offensichtlich sind die Bedingungen für die Neubildung oder Verstärkung von Gleitbändern nicht mehr gegeben, die Anzeigemöglichkeit des Meßstreifens ist erschöpft. Bei Al-Streifen trat der Bruch der Probe meist im Steilabfall der Reflexionsgradkurve ein, d. h. im Vergleich zur Sn-Folie ist das Ermüdungsgeschehen in der Al-Folie bei diesen Einstufenversuchen nicht soweit fortgeschritten. Der Al-Streifen verfügt noch über eine „Anzeigereserve“.

Die Abhängigkeit des Reflexionsgrades von der Schwing-spielzahl wurde auch an St 38 bestimmt (Bild 5). Die Kurvenscharen ähneln den in Bild 4 gezeigten. Auch hier erfolgt der Bruch der Probe im Steilabfall der Reflexions-gradkurve des Al-Streifens, während das Reflexionsver-mögen des Sn-Streifens zu diesem Zeitpunkt fast völlig

erschöpft ist. Die gezeigten Kurven in Bild 4 und 5 sind Mittelwertkurven aus 3 bis 5 Versuchen.

Für gleichartige Verformungsbedingungen wurde an un-gekerbten Flachproben die Streuung des Reflexionsgra-des zu etwa ± 5 % bestimmt. Werden Reflexionsmessun-gen an mehreren Stellen des Al-Streifens durchgeführt, so kann aufgrund unterschiedlich starker Reflexion in den meisten Fällen auch die Stelle vorausgesagt werden, an der der erste Anriß der Probe erfolgt.

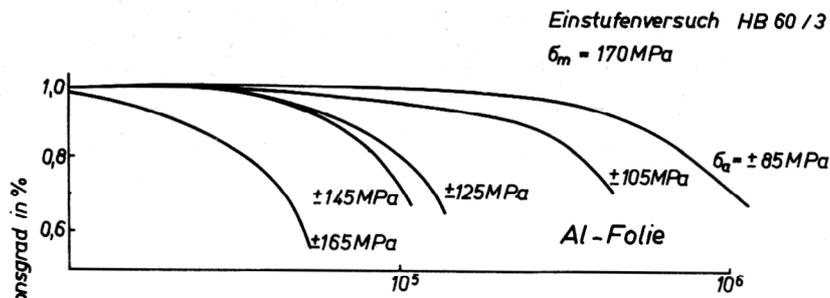


Bild 4
 Änderung des Reflexionsgrades von Al- und Sn-Folien bei verschiedenen Spannungshorizonten für HB 60-Proben

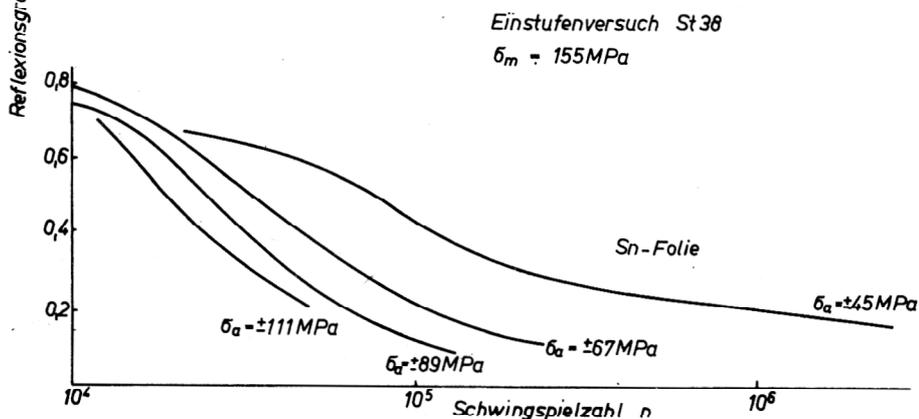
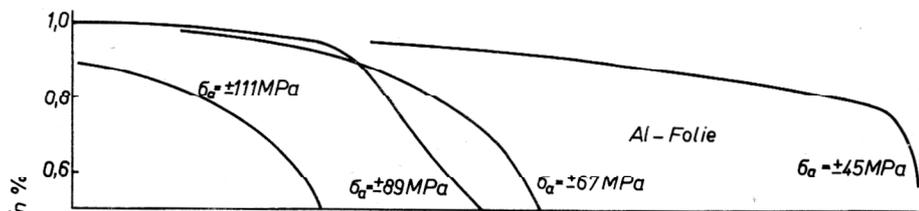
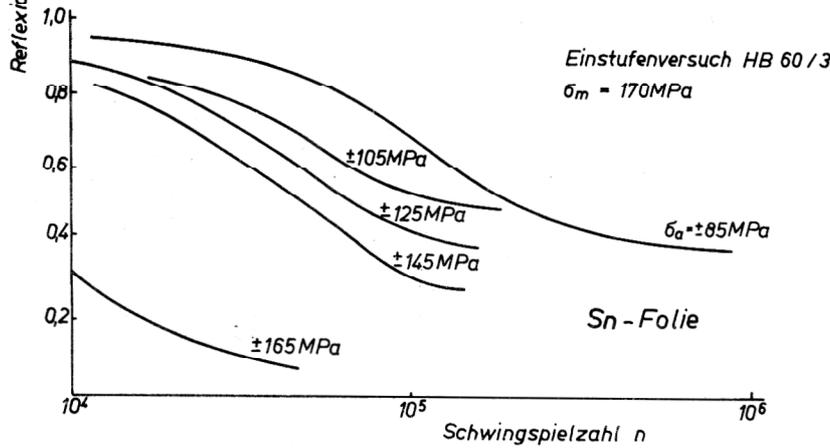


Bild 5
 Änderung des Reflexionsgrades von Al- und Sn-Folien bei verschiedenen Spannungshorizonten für St 38-Proben

3.2. Zweistufenversuche

In zwei Versuchsreihen wurde nach definierter Vorbelastung die Spannungsamplitude erhöht bzw. erniedrigt. Bei Spannungserhöhung (Bild 6) konnte festgestellt werden, daß der Reflexionsgrad der Aluminiumstreifen sofort stark absinkt. Die Sn-Streifen zeigen die Lasterhöhung nur dann an, wenn der Reflexionsgrad nach Vorbelastung noch nicht unter 15 % abgesunken ist. In diesem Falle kann, wie bei Aluminium, ein Abknicken der Kurve beobachtet werden.

Wird nach Vorbelastung bei hoher Spannungsamplitude diese abgesenkt, so verläuft danach die Reflexionsgradkurve flacher (Bild 7). Das ist bei Aluminium deutlicher ausgeprägt als bei Zinn, da dessen Reflexionsvermögens bei anfänglich hoher Belastung bedeutend schneller erschöpft ist.

Aus den bisherigen Ausführungen folgt, daß Reflexionsmessungen an Al- bzw. Sn-Folien, die auf schwingbelastete Proben an geeigneter Stelle aufgeklebt sind, qualitative Aussagen über den Ermüdungszustand der Folien sowie der Proben ermöglichen.

Liegen für einen Werkstoff die Wöhlerkurve und die Reflexionsgradkurven, z. B. für Aluminium und Zinn, vor, so läßt sich eine Reihe von unbekanntem Größen des Schwingfestigkeitsversuches bestimmen.

Das Vorgehen wird im Bild 8 erläutert:

1. Spannungshöhe σ_{a1} ist bekannt
 Für jede unbekanntem Schwingspielzahl können nach Erreichen eines bestimmten Reflexionsgrades ($r_{Sn} =$

Zweistufenversuch St 38
Spannungserhöhung nach Vorbelastung

$\sigma_m = 155 \text{ MPa}$ $\sigma_{a1} = 67 \text{ MPa}$
 $\sigma_{a2} = 111 \text{ MPa}$

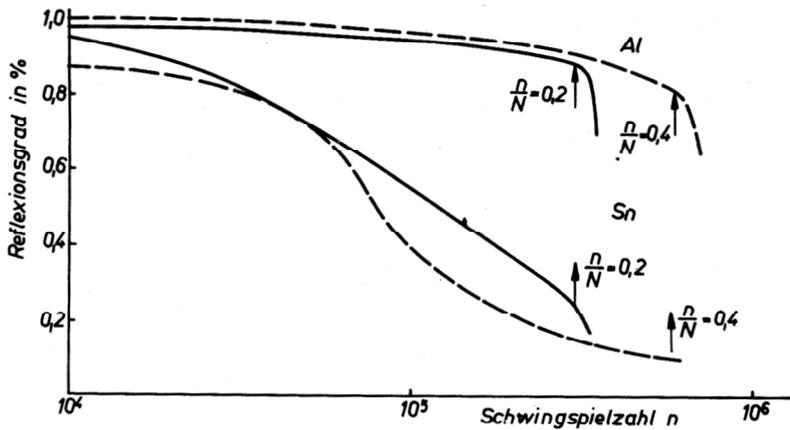


Bild 6
Änderung des Reflexionsgrades bei Zweistufenversuchen mit St 38-Proben

Die Erhöhung der Amplitude erfolgte nach $n/N = 0,2$ bzw. $0,4$.
(n aufgebrauchte Schwingspiele, N Bruchschwingspielzahl)

Zweistufenversuch St 38
Spannungserniedrigung nach Vorbelastung
 $\sigma_m = 155 \text{ MPa}$ $\sigma_{a1} = 111 \text{ MPa}$
 $\sigma_{a2} = 67 \text{ MPa}$

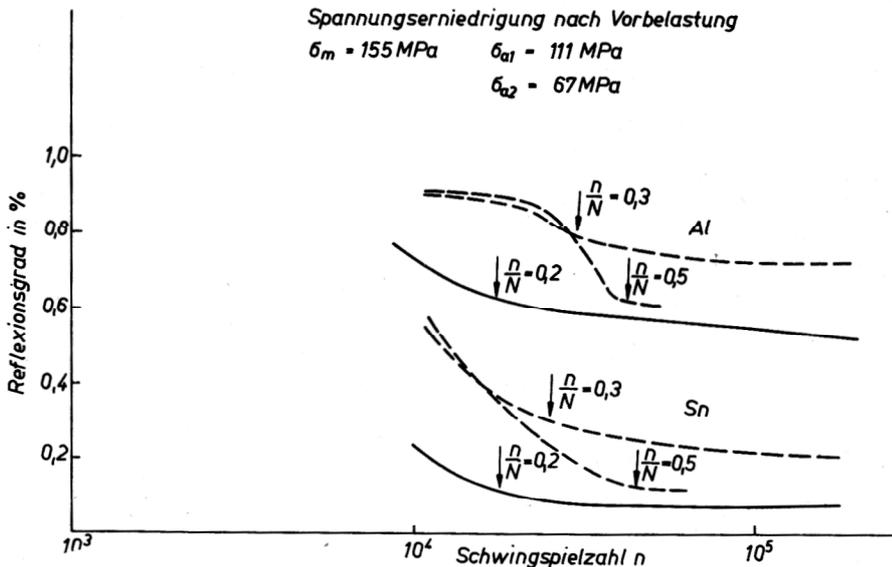


Bild 7
Änderung des Reflexionsgrades bei Zweistufenversuchen mit

St 38-Proben
Die Amplitude wurde nach $n/N = 0,2$ bzw. $0,5$ erniedrigt.

0,2) die bereits aufgebrauchten Schwingspiele ($N_{1,V}$) und die Restlebensdauer $N_{1,R} = N_1 - N_{1,V}$ bestimmt werden. Diese Vorgehensweise kann für jede vorhandene Reflexionsgradkurve (z. B. für $r_{A1} = 0,80$) angewandt werden.

2. Schwingspielzahl ist bekannt

Bei bekannter Vorbelastungsschwingspielzahl ($N_{2,V}$) kann aus dem erreichten Reflexionsgrad die Spannungshöhe (σ_{a2} bzw. σ_{a3}) ermittelt werden, z. B. für $r_{Sn} = 0,2$ ergibt sich σ_{a3} und für $r_{A1} = 0,8$ erhält man σ_{a2} . Die Restlebensdauerwerte ($N_{2,R}$ und $N_{3,R}$) sind dann aus dem σ - N -Diagramm ablesbar.

3. Vorbelastungsschwingspielzahl und Spannungshöhe ist unbekannt. Zur Bestimmung einer nicht bekannten Vorbelastungsschwingspielzahl und Spannungshöhe müssen wenigstens zwei sich schneidende Re-

flexionsgradkurven von unterschiedlichen Reflexionsfolien bekannt sein. Die unbekanntes Größen werden aus dem Schnittpunkt zweier Kurven konstanten Reflexionsgrades ermittelt, z. B. für die Geraden mit $r_{Sn} = 0,2$ und $r_{A1} = 0,8$ ergibt sich ($\sigma_{a,4}; N_{4,V}$) mit Restlebensdauer $N_{4,R} = N_4 - N_{4,V}$.

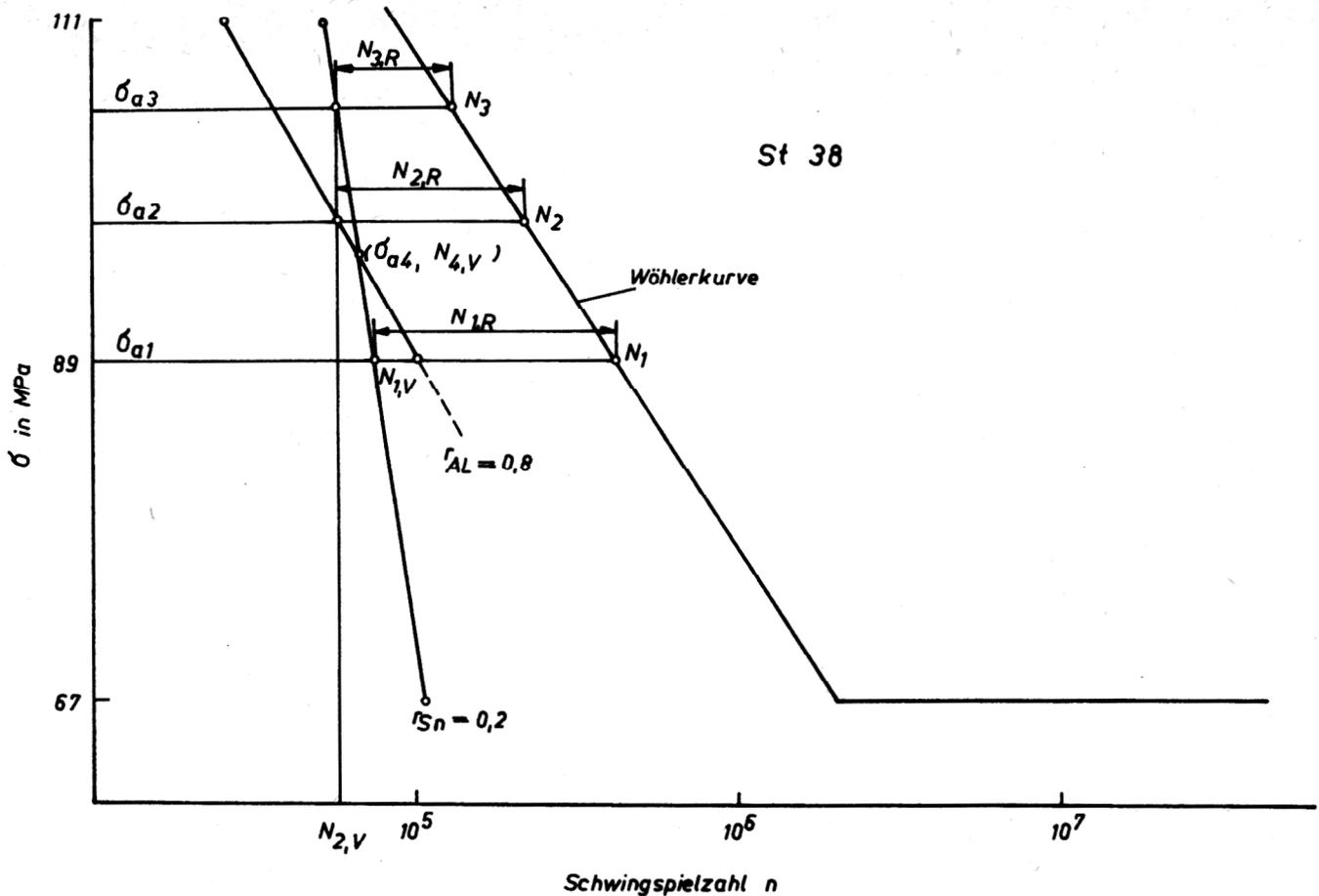


Bild 8
Wöhlerkurve für St 38-Proben und die Reflexionsgrad-Kurven
für $r_{Sn} = 0,2$ % sowie $r_{Al} = 80$ % der aufgeklebten Folien

4. Zusammenfassung

Es wurden Ergebnisse über Reflexionsmessungen an Al- bzw. Sn-Folien vorgestellt. Die Folien waren auf schwingbelastete Proben aus HB 60 bzw. St 38 aufgeklebt.

Die beiden Streifenmaterialien unterscheiden und ergänzen sich hinsichtlich ihrer Ansprechempfindlichkeit und der Erschöpfung des Reflexionsvermögens.

Die Meßmethode kann sowohl zum qualitativen Nachweis von ermüdungsgefährdeten Stellen eines Bauteils als auch zur Abschätzung seiner Restlebensdauer verwendet werden. Dazu sind die Reflexionsgradkurven der Meßfolien bei verschiedenen Spannungshorizonten und die Wöhlerkurve des Trägermaterials notwendig.

LITERATUR

- [1] Dally, J. W., Panizza, G. A.: Conductive polymers as fatigue-damage indicators. *Exp. Mechanics* 12 (1972), 124 ... 129.
- [2] Panizza, G. A., Dally, J. W.: Predicting failures with conducting polymers fatigue-damage indicators. *Exp. Mechanics* 13 (1973), 7 ... 13.
- [3] Verfahren zum Bestimmen der Ermüdungsgeschwindigkeit von Konstruktionselementen. *Offenlegungsschrift* 2063 913, Bundesrepublik Deutschland v. 27. 12. 1969.
- [4] Harting, D. R.: The S/N fatigue-life gage: A direct means of measuring cumulative fatigue-damage. *Exp. Mechanics* 6 (1966), 19 ... 24.
- [5] Rieger, H., van Rensen, E., Sahn, K. F.: Ein neuartiges Verfahren zur Lebensdauerüberwachung. *Z. Werkstofftechnik* 10, (1979) 353 ... 368.
- [6] Mughrabi, H., Ackermann, F. u. a.: Persistent slip bands in face-centered and body-centered cubic metals. *Symp. on fatigue mechanisms, Kansas City, May 22 - 24 (1978)*.

Anschrift der Verfasser:

Dr.-Ing. G. Meyer
Prof. Dr.-Ing. habil. G. Schott
Technische Universität
Sektion Grundlagen des
Maschinenwesens
8027 Dresden
Mommsenstraße 13