

# Beispiele zur spektralanalytischen Lebensdauerberechnung

Dieter Joensson

## 1. Einleitung

Mit dem Übergang von Beanspruchungs-Zeit-Funktionen in Schädigungsgradienten-Zeit-Funktionen ist eine Lebensdauerberechnung ohne Bezugnahme auf Amplitudenverteilung möglich [1]. Dabei wird der Beanspruchungs-Zeit-Funktion in jedem Momentanwert lineares Schädigungsvermögen zugeordnet durch die Einbeziehung einer Wöhlerlinie. Das bedeutet bei konstanter Frequenz, daß eine große Beanspruchung durch einen großen Schädigungsanstieg gekennzeichnet ist.

In [1] wurde gezeigt, daß die Palmgren/Miner-Formel den Kehrwert des arithmetischen Mittelwertes der Schädigungsgradienten der Beanspruchungs-Spitzenwerte darstellt. Eine direkte Beziehung zwischen diesem Mittelwert und Momentanwerten existiert nicht. Wird dagegen ein quadratischer Mittelwert zum Ansatz gebracht, so ist dieser mit dem Effektivwert aller Momentanwerte lediglich durch einen einfachen Faktor verknüpft. Da der quadratische Mittelwert aus Schädigungsgradienten der Spitzenwerte gebildet wird, muß der Effektivwert notwendig aus Schädigungsgradienten momentaner Beanspruchungswerte, also aus einer Schädigungsgradienten-Zeit-Funktion berechnet werden. Im Falle beliebiger Beanspruchungs-Zeit-Funktionen endlicher Leistung mit veränderlichen Mittelspannungen ist der Schädigungsgradienten-Effektivwert aus dem Leistungsspektrum der Schädigungsgradienten-Zeit-Funktion ermittelbar.

Die folgenden Beispiele zur verteilungsfreien spektralanalytischen Lebensdauerberechnung dienen zur Erläuterung des vorgeschlagenen Verfahrens.

## 2. Der Faktor u in der Lebensdauerformel

Für die Lebensdauerzeit  $T_L$  wurde in [1] folgende Gleichung hergeleitet:

$$T_L = \frac{1}{u \cdot \sqrt{\int_0^\infty \tilde{G}_{\Delta D}(f) \cdot f^2 df}} \quad (1)$$

mit  $f$ : Frequenz,  $\tilde{G}_{\Delta D}(f)$ : einseitige Spektralleistungsdichte der Schädigungsgradientenfunktion  $\Delta D(t)$  und

$$u = \frac{\overline{\Delta D^2}}{\Delta D_{eff}} \geq \sqrt{2} \quad (2)$$

mit  $\overline{\Delta D^2}$ : quadratischer Mittelwert der Stufen-Schädigungsgradienten  $\Delta D_k$   
und  $\Delta D_{eff}$ : Effektivwert aller momentanen Schädigungsgradienten  $\Delta D(t)$ .

### Beispiel 1

Der Faktor u soll für eine einstufige Sinusbeanspruchung, Bild 1,

$$\sigma(t) = \sigma_{ok} \cdot \sin \omega t \quad (3)$$

(Oberspannung  $\sigma_{ok}$ , Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi f$ ) berechnet werden.

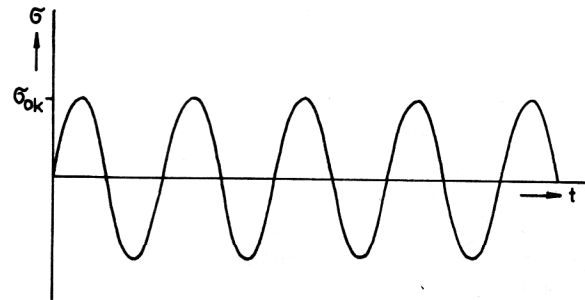


Bild 1  
Einstufige Sinusbeanspruchung

Da es sich nur um eine Beanspruchungsstufe handelt, geht der quadratische Mittelwert  $\overline{\Delta D^2}$  in den Stufen-Schädigungsgradienten  $\Delta D_k$  der Stufe k über:

$$\overline{\Delta D^2} \longrightarrow \Delta D_k = \frac{1}{K_w} \cdot \sigma_{ok}^\varphi \quad (4)$$

mit  $K_w$  und  $\varphi$ : Wöhlerlinienkonstanten der Wöhlerlinie  $N = K_w \cdot \sigma^{-\varphi}$ . Für das Beispiel 1 folgt aus (4) und (2):

$$u = \Delta D_k / \Delta D_{eff} \quad (5)$$

Der Effektivwert der zentrierten Funktion  $\Delta D(t)$  berechnet sich zu:

$$\Delta D_{eff}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \Delta D^2(t) dt \quad \text{mit} \quad (6)$$

$$\Delta D(t) = \frac{1}{K_w} \cdot [\sigma(t)]^\varphi \quad (7)$$

analog zu (4).

Einsetzen von (3) in (7) und (7) in (6) liefert unter Berücksichtigung von (4):

$$\frac{1}{u^2} = \left( \frac{\Delta D_{eff}}{\Delta D_k} \right)^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 \varphi \omega t dt \quad (8)$$

In Abhängigkeit von  $\varphi$  entstehen verschiedene Werte für  $1/u^2$  (Lösung des Integrals nach [2]):

$$\varphi = 1: \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{T} \left( \frac{1}{2} t - \frac{1}{4\omega} \sin 2\omega t \right) \Big|_0^T \right\} = \frac{1}{2} \quad (9a)$$

$$\varphi = 2: \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{T} \left( \frac{3}{8} t - \frac{1}{4\omega} \sin 2\omega t + \frac{1}{32\omega} \sin \omega t \right) \Big|_0^T \right\} = \frac{3}{8} \quad (9b)$$

$$\varphi = n: \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{T} \left( \frac{2n-1}{2n} \int \sin^{2n-2} \omega t dt - \frac{\sin^{2n-1} \omega t \cdot \cos \omega t}{2n\omega} \right) \right\} \\ = \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \times \dots \times \left( \frac{2n-1}{2n} \right) \quad (9c)$$

Die Umformung der Gleichung (9c) ergibt:

$$u(\varphi) = \sqrt{\frac{\varphi!}{\prod_{i=1}^{\varphi} (i - \frac{1}{2})}} \geq \sqrt{2} \quad (10)$$

Diese Gleichung gilt für ganzzahlige Wöhlerlinienexponenten  $\varphi$ . Sie hat für beliebig gestufte Sinusfunktionen Gültigkeit. Bei einer Mehrstufenbeanspruchung entsteht die Gesamtleistung  $S_{ges}$  der Beanspruchungs-Zeit-Funktion aus einer arithmetischen Mittelung der Leistungen der einzelnen Stufen  $K$ :

$$S_{ges} = \frac{1}{h_{ges}} \sum_{k=1}^m h_k \cdot S_{\sigma_k} \quad (11)$$

mit

$h_{ges}$ : Gesamthäufigkeit der Sinusperioden in einer Teilfolge.

$h_k$ : Häufigkeit der Sinusperioden in der Stufe  $k$ ,  
 $S_{\sigma_k}$ : Leistung der Stufe  $k$

$m$ : Anzahl der Sinusblöcke in einer Teilfolge.

Der Effektivwert einer zentrierten Funktion ist die Quadratwurzel aus der Leistung. Daher folgt aus (11)

$$\sigma_{eff_{ges}} = \sqrt{\frac{1}{h_{ges}} \sum_{k=1}^m h_k \cdot \sigma_{eff_k}^2} \quad (12)$$

bzw. analog dazu

$$\Delta D_{eff_{ges}} = \sqrt{\frac{1}{h_{ges}} \sum_{k=1}^m h_k \cdot \Delta D_{eff_k}^2} \quad (13)$$

Unter Berücksichtigung der Gleichung (5) führt (13) wieder zurück zur Gleichung (2), weil  $u(\varphi)$  für alle Stufen  $k$  gleichermaßen gilt.

### 3. Einfluß von Fensterfunktionen

Das Programm SLEBE 1 [1] realisiert die numerische Form der Gleichung (1) mit schnellerer Fouriertransformation. Vom Anwender kann wahlweise die Zeitfunktion  $\Delta D(t)$  mit Gewichtsfunktionen (Fensterfunktionen im Zeitbereich) multipliziert werden, um Abbruchfehler zu mildern, die dadurch entstehen, daß immer nur ein begrenzter Zeitabschnitt  $T$  mit  $n$  diskreten Werten

digital verarbeitet werden kann. Folgende einfache Gewichtsfunktionen [3] für  $0 \leq t \leq T$  stehen in SLEBE 1 zur Verfügung:

$$\text{Rechteck: } g_0(t) = 1 \quad (14)$$

$$\text{Bartlett: } \begin{cases} g_1(t) = 2t/T & \text{für } 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 2(1-t/T) & \text{für } \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{Hanning: } g_2(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\pi(t/T - \frac{1}{2}) \quad (16)$$

$$\text{Hamming: } g_3(t) = 0.54 + 0.46 \cdot \cos 2\pi(t/T - \frac{1}{2}) \quad (17)$$

Durch die Multiplikation mit diesen Gewichtsfunktionen werden die Spektralwerte zu klein berechnet, deshalb sind im Programm die entsprechenden Vergrößerungsfaktoren für die Spektralleistung  $k_0 = 1$ ,  $k_1 = 4$ ,  $k_2 = 4$  und  $k_3 = 3.43$  [4] berücksichtigt.

### Beispiel 2

Lebensdauerberechnung für eine einstufige Sinusbeanspruchung, Bild 1, mit SLEBE 1.

Die Wöhlerliniengleichung sei

$$N(\sigma) = 1.27 \cdot 10^{17} \cdot \sigma^{-5.42} \quad (18)$$

und die Oberspannung  $\sigma_{oK} = 180$  MPa. Dann folgt daraus die zugehörige Lebensdauer

$$N(\sigma_{oK} = 180 \text{ MPa}) = 75 \ 897 \text{ Lastspiele.}$$

Für eine Frequenz  $f_o = 20$  Hz bedeutet das eine experimentelle Lebensdauerzeit

$$T_E = N/f_o = 3794.85 \text{ sek.}$$

Die Sinusbeanspruchung wurde digital erzeugt (50 Werte je Schwingenspiel) und auf der Magnetplatte abgelegt.

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Berechnung ( $T_L$ ) für 5000 Momentanwerte enthalten.

Das Hamming-Fenster mit dem realen Wert  $u(\varphi = 5.42) = 2.06$  liefert hier die beste Übereinstimmung zu der vorgegebenen Lebensdauer  $T_E$ .

Tabelle 1  
Ergebnisse SLEBE 1 zum Beispiel 2

Fenster	$u = \sqrt{2}$	$u = 2.06$	$T_E/T_L$
	$T_L^* \cdot s^{-1}$	$T_L \cdot s^{-1}$	
ohne	6546.6	4494.3	0.84
Rechteck	6536.1	4487.1	0.85
Bartlett	5677.5	3897.7	0.97
Hanning	5353.5	3675.2	1.03
Hamming	5616.2	3855.6	0.98

### 4. Akkumulation von Schädigungsleistungen

Für den Sonderfall einer Beanspruchungs-Zeit-Funktion konstanter Frequenz ohne irreguläre Extremwerte (keine Mittelspannungsschwankungen) wird Gleichung (1) zu einer einfachen Formel.

Die Lebensdauer  $N_L$  für eine derartige Funktion entsteht aus dem quadratischen Mittelwert der Stufen-Schädigungsgradienten  $\overline{\Delta D^2}$  [1]:

$$N_L = \frac{1}{\overline{\Delta D^2}} \quad (19)$$

oder ausführlich

$$N_L = \sqrt{\frac{h_{ges}}{\sum_{k=1}^m h_k \cdot \Delta D_k^2}} \quad (20)$$

Mit  $n_{ges} = h_{ges}$ ,  $n_k = h_k$  und  $\Delta D_k = 1/N_k$  folgt daraus in Anlehnung an die übliche Schreibweise für die Palmgren/Miner-Formel:

$$N_L = \sqrt{\frac{n_{ges}}{\sum_{k=1}^m \frac{n_k}{N_k^2}}} \quad (21)$$

Die Lebensdauer  $N_M$  nach Palmgren/Miner stellt für diese Formel stets eine obere Schranke dar und nur bei einstufiger Beanspruchung sind beide Gleichungen identisch.

Die Palmgren/Miner-Formel kann als Akkumulation abstrakter Schädigungs-Teilarbeit  $w_k$  zu einer Gesamt-Brucharbeit  $W_{ges}$  interpretiert werden:

$$W_{ges} = w_1 + w_2 + \dots + w_m \quad (22)$$

Dabei sind die  $w_k$  Teilarbeiten und  $W_k$  Brucharbeiten der Stufen  $k$ , und es wird zwischen  $w_k$  und den Lastspielen  $n_k$  der Stufen  $k$  Proportionalität vorausgesetzt [6]:

$$\frac{w_k}{W_k} = \frac{n_k}{N_k} \quad (23)$$

mit  $N_k$ : Lebensdauer der einstufigen Beanspruchung  $\sigma(t) = \sigma_{ok} \cdot \sin \omega t$  der Stufe  $k$ .

Einsetzen in (22) liefert

$$W_{ges} = \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{N_k} \cdot W_k \quad (24)$$

Für alle Stufen wird die Brucharbeit gleich gesetzt:

$$W_1 = W_2 = \dots = W_{ges} = W \quad (25)$$

Dann folgt daraus in (24):

$$1 = \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{N_k} \quad (26)$$

$$\text{oder } \frac{n_{ges}}{N_M} = 1 = \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{N_k} \quad (27)$$

$$\text{mit } n_{ges} = \sum_{k=1}^m n_k \quad (28)$$

Gleichung (27) liefert die Palmgren/Miner-Formel:

$$N_M = \frac{n_{ges}}{\sum_{k=1}^m \frac{n_k}{N_k}} \quad (29)$$

In ähnlicher Weise wie (29) ist auch Gleichung (21) physikalisch interpretierbar, wenn von einer Akkumulation der Schädigungs-Teilleistungen  $p_k$  zur Schädigungs-Gesamtleistung  $P_k$  ausgegangen wird:

$$P_{ges} = p_1 + p_2 + \dots + p_m \quad (30)$$

Die  $p_k$  sind Schädigungs-Teilarbeiten  $w_k$  der Stufen  $k$ , bezogen auf die Lebensdauer  $N_k$  dieser Stufen  $k$ :

$$p_k = \frac{w_k}{N_k} \quad (31)$$

Mit (31) wird (30) zu

$$P_{ges} = \sum_{k=1}^m \frac{w_k}{N_k} \quad (32)$$

Wie vorher, so gilt auch jetzt die Proportionalität zwischen Teilarbeit und Lastspielen gemäß (23). Damit folgt aus (32)

$$P_{ges} = \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{N_k^2} \cdot W_k \quad (33)$$

Die Schädigungs-Gesamtleistung  $P_{ges}$  ist die auf die Gesamtlebensdauer  $N_L$  bezogene Gesamtarbeit  $W_{ges}$ :

$$\frac{W_{ges}}{N_L} = \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{N_k^2} \cdot W_k \quad (34)$$

Wieder wird die Brucharbeit in allen Stufen gleich gesetzt (25):

$$\frac{1}{N_L} = \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{N_k^2} \quad (35)$$

$$\text{bzw. } 1 = N_L \cdot \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{N_k^2} \quad (36)$$

$$\text{oder } \frac{n_{ges}}{N_L} = 1 = N_L \cdot \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{N_k^2} \quad (37)$$

Die Umformung der Gleichung (37) führt auf die Gleichung (21). Diese Gleichung repräsentiert für das Programm SLEBE 1 die exakte Lösung, wenn Beanspruchungs-Zeit-Funktionen ohne Mittelspannungsschwankungen verarbeitet werden.

### Beispiel 3

Lebensdauerberechnung für ein Dreistufen-Blockprogramm, Bild 2, mit Gleichung (21) und mit SLEBE 1.

Zahlenwerte:  $\sigma_{o1} = 240$  MPa,  $n_1 = 1$ ,  $\sigma_{o2} = 180$  MPa,  $n_2 = 2$ ,  $\sigma_{o3} = 120$  MPa,  $n_3 = 4$ .

Daraus folgt mit einer Wöhlerlinie nach (18):

$$N_1 = 15961, N_2 = 75897 \text{ und } N_3 = 683347.$$

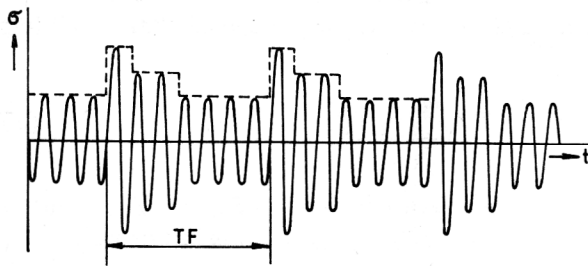
Aus Gleichung (21) entsteht

$$N_L = 40466 \text{ Lastspiele bzw. } T_{N_L} = 2023.3 \text{ s für } f_o = 20 \text{ Hz.}$$

Die in Bild 2 dargestellte Beanspruchung  $\sigma(t)$  wurde digital erzeugt und mit SLEBE 1 analysiert. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 2 ( $T_L$  gilt für SLEBE 1).

**Tabelle 2**  
Ergebnisse SLEBE 1 zu den Beispielen 3, 4 und 6 mit  $u = 2.06$

Fenster	Beispiel 3		Beispiel 4		Beispiel 6	
	$T_L \cdot s^{-1}$	$T_{N_L}/T_L$	$T_L \cdot s^{-1}$	$T_{N_L}/T_L$	$T_L \cdot s^{-1}$	$T_{N_L}/T_L$
ohne	2568.9	0.79	2323.9	0.77	14190	0.92
Rechteck	2568.9	0.79	2323.9	0.77	14640	0.89
Bartlett	2222.8	0.91	1998.9	0.89	14139	0.92
Hanning	2096.9	0.96	1985.4	0.95	13309	0.98
Hamming	2199.8	0.92	1978.0	0.90	13927	0.93



**Bild 2**  
Dreistufige Sinusbeanspruchung, TF: Teilfolge

#### Beispiel 4

Lebensdauerberechnung für ein Zweistufen-Blockprogramm mit Gleichung (21) und mit SLEBE 1.

Die Zweistufen-Beanspruchung wurde durch Eliminierung der mittleren Stufe  $\sigma_{o2}$  des Beispiels 3 gebildet:

$$\sigma_{o1} = 240 \text{ MPa}, n_1 = 1, N_1 = 15961$$

$$\sigma_{o2} = 120 \text{ MPa}, n_2 = 4, N_2 = 683347$$

Aus Gleichung (21) folgt dann

$$N_L = 35651 \text{ Lastspiele bzw.}$$

$$T_{N_L} = 1782.6 \text{ s für } f_o = 20 \text{ Hz.}$$

Wieder wurde diese zweistufige Beanspruchung digital erzeugt und mit SLEBE 1 die Lebensdauer  $T_L$  ermittelt, Tabelle 2.

#### Beispiel 5

Gegenüberstellung von Lebensdauerwerten nach Palmgren/Miner und nach Gleichung (21) für zweistufige Beanspruchungs-Zeit-Funktionen mit variierten Häufigkeiten  $n_2$ .

Grundlage der Berechnung sei die Beanspruchung nach Beispiel 4:

$$\sigma_{o1} = 240 \text{ MPa}, n_1 = 1, \sigma_{o2} = 120 \text{ MPa}, n_2 = 4,$$

$$N_1 = 15961, N_2 = 683347$$

Daraus entsteht unter Verwendung der Gleichungen (21) und (29) die Relation:

$$N_L = 0.488 N_M \text{ für } n_2 = 4$$

Vergrößert man die Anzahl der kleinen Lastspiele  $n_2$ , so wird

$$N_L = 0.619 N_M \text{ für } n_2 = 1000$$

$$N_L = 0.923 N_M \text{ für } n_2 = 10000$$

und

$$N_L = N_M \text{ für } n_2 \rightarrow \infty$$

#### Beispiel 6

Lebensdauerberechnung für eine vierstufige Beanspruchung.

Die in [1] verwendete periodische Funktion  $\sigma_{p3}(t)$  wurde als Folge regulärer Extremwerte  $\sigma_{p4}(t)$  rekonstruiert, Bild 3. Das entspricht einer einparametrischen Klassierung regulärer Extremwerte.

Zahlenwerte:

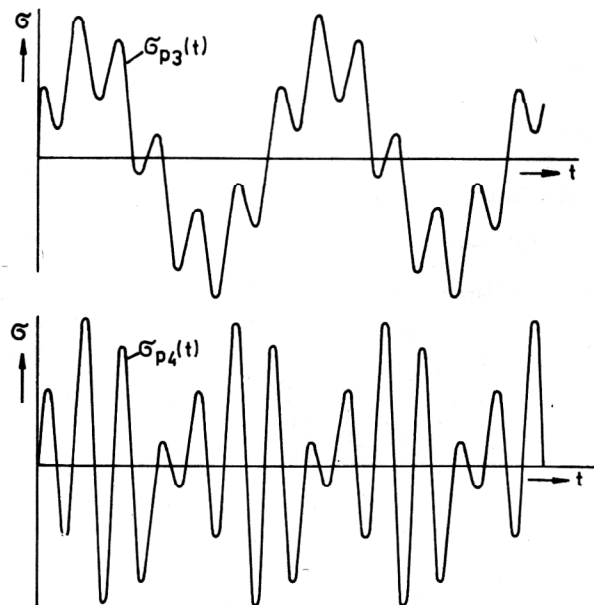
$$\sigma_{o1} = 170 \text{ MPa}, \sigma_{o2} = 140.3 \text{ MPa}, \sigma_{o3} = 89.6 \text{ MPa},$$

$$\sigma_{o4} = 30.8 \text{ MPa}, \text{ Wöhlerliniengleichung (18),}$$

$$n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 1.$$

Daraus folgt mit Gleichung (21):

$$N_L = 195023 \text{ bzw. } T_{N_L} = 13002 \text{ s für } f_o = 15 \text{ Hz.}$$



**Bild 3**  
Periodische Funktion  $\sigma_{p3}(t)$  [1]:

a) originaler Verlauf,

b) Rekonstruktion als Folge der regulären Extremwerte  $\sigma_{p4}(t)$

Das sind 65 % der Lebensdauer nach Palmgren/Miner. SLEBE 1 erbrachte die in Tabelle 2 angegebenen Lebensdauerwerte. Eine Gegenüberstellung der mit SLEBE 1 berechneten Ergebnisse für die beiden Funktionen  $\sigma_{p3}(t)$  und  $\sigma_{p4}(t)$  zeigt eine deutlich geringere Lebensdauer für die „härtere“ Beanspruchung:

$$T_{L3} = 39072 \text{ s} \quad [1] \quad T_{L4} = 20670 \text{ s},$$

hier berechnet für  $u = \sqrt{2}$ , ohne Fensterfunktion.

## 5. Konstante Mittelspannungen

Beanspruchungsverläufe mit Mittelspannungsschwankungen wurden in [1] analysiert. Im Unterschied dazu wird im folgenden Modellbeispiel der Einfluß konstanter Mittelspannungen untersucht.

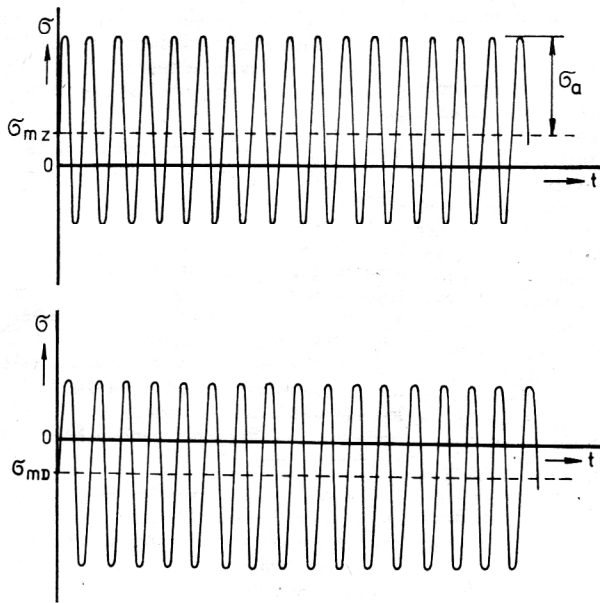
### Beispiel 7

Lebensdauer mit SLEBE 1 für je eine Sinusschwingung mit Zug- und Druck-Mittelspannung, Bild 4.

Zahlenwerte:

$$\sigma_a = 180 \text{ MPa}, \quad \text{Frequenz } f_0 = 20 \text{ Hz}$$

$$\sigma_{mZ} = 60 \text{ MPa}, \quad \sigma_{mD} = -60 \text{ MPa}.$$



**Bild 4**  
Sinusbeanspruchung mit

- konstanter Zug-Mittelspannung  $\sigma_{mZ}$  und
- konstanter Druck-Mittelspannung  $\sigma_{mD}$

Die Ergebnisse mit SLEBE 1 lauten für  $u = 2.06$  und Hamming-Fenster:

$$T_{LZ} = 812,39 \text{ s} \quad \text{und} \quad T_{LD} = 34817,6 \text{ s}$$

bzw. für die Frequenz  $f_0$ :

$$N_{LZ} = 1625 \quad \text{und} \quad N_{LD} = 696352 \text{ Lastspiele.}$$

Die Wöhlerlinie selbst liefert  $N_L = 75897$  Lastspiele für  $\sigma_m = 0$ , Beispiel 2. Für die angegebenen Werte ergibt sich

daraus eine sehr große Mittelspannungsempfindlichkeit  $\psi = 1,52$ , wenn vom idealisierten Haigh-Diagramm ausgegangen wird [6]. Reale Werte sind um den Wert  $\psi = 0,3$  gruppiert, d. h. der Einfluß der Mittelspannung wird durch die pauschale Verarbeitung der beiden Sinusschwingungen erheblich überschätzt. Für die Anwendung konstanter Mittelspannungen wird deshalb folgender Weg vorgeschlagen:

- Erwartungswert der Beanspruchungs-Zeit-Funktion (konstante Mittelspannung) berechnen.
- Zentrierung der Funktion auf den Erwartungswert.
- Für die Berechnung der Schädigungsgradienten Verwendung der Wöhlerlinie mit dieser konstanten Mittelspannung.

Daraus ergibt sich für die Eingabe in SLEBE 1:

Zug:

$$\sigma_{\max} = 180 \text{ MPa} \quad (\text{vorher } \sigma_{\max} = 240 \text{ MPa})$$

$$\text{Wöhlerlinie } N(\sigma) = 7.1745 \cdot 10^{16} \cdot \sigma^{-5.42} \quad \text{für } \psi = 0,3$$

Druck:

$$\sigma_{\max} = 180 \text{ MPa} \quad (\text{vorher } \sigma_{\max} = 120 \text{ MPa})$$

$$\text{Wöhlerlinie } N(\sigma) = 2.129 \cdot 10^{17} \cdot \sigma^{-5.42} \quad \text{für } \psi = 0,3$$

Die Berechnung mit diesen Werten ergab (Hamming-Fenster und  $u = 2.06$ ):

$$N_{LZ} = 43563 \quad N_{LD} = 129261$$

für die Frequenz  $f_0$ .

## 6. Zusammenfassung

An einzelnen Beispielen wurde auf neue Aspekte der Interpretation und Anwendung der verteilungsfreien spektralanalytischen Lebensdauerberechnung hingewiesen.

Es wurden Details zur Herleitung erläutert und an verschiedenen Fensterfunktionen verdeutlicht, daß eine Unschärfe der Berechnung durch digitale Spektralanalyse unvermeidbar ist. In den verwendeten Beispielen zeigte die Hanning-Fensterfunktion (16) überwiegend die beste Annäherung an theoretisch exakte Werte.

Für den Fall ohne Mittelspannungsschwankungen ist das vorgeschlagene Verfahren als Hypothese der Akkumulation von Schädigungsleistungen physikalisch interpretierbar im Unterschied zur Schädigungsarbeit von Palmgren/Miner.

An einem Modellbeispiel wurde begründet, daß die Beanspruchungs-Zeit-Funktion vor ihrer spektralanalytischen Verarbeitung zu zentrieren ist, weil sonst der Mittelspannungseinfluß bei Vorhandensein konstanter Mittelspannungen überschätzt wird.

## LITERATUR

- [1] Joansson, D.: Verteilungsfreie spektralanalytische Lebensdauerberechnung. Technische Mechanik 7 (1986) Heft 1, S. 59 – 65.
- [2] Bronstein, I. N., Semendjajew, K. A.: Taschenbuch der Mathematik. BSB G. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 12. Auflage, Leipzig 1973.
- [3] Achilles, D.: Die Fourier-Transformation in der Signalverarbeitung. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1970.

- [ 4 ] Schmidt, G.: Möglichkeiten zur Erhöhung der Genauigkeit bei der digitalen Spektralanalyse im Maschinenbau unter Verwendung des Hybridrechners Robotron 4200/Spoza-2. Diss. TH Magdeburg, 1979.
- [ 5 ] Günther, W. u. a.: Schwingfestigkeit. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1. Auflage 1973.
- [ 6 ] Lange, F., Pfeiffer, F.: Erläuterungen zur Neufassung des DDR-Standards TGL 33787/01. IfL-Mitt., Dresden 23 (1984) 1, S. 1 – 13.