

# Planung und Betrieb von Freileitungen im Hinblick auf windbedingte Seilschwingungen

Von Walter F. Bückner, Urbach, und Konstantin O. Papailiou, Luzern\*)

DK 621.315.1

Ein Aufsatz zum Stand der Technik der gefährlichen, windbedingten, unvermeidbaren Schwingungen von Freileitungsseilen wurde in der »Elektrizitätswirtschaft« 84 (1985) auf Seite 24 bis 30 veröffentlicht. Im folgenden Aufsatz erläutern die Verfasser praktische Erfahrungen mit der damals vorgestellten Methode zur Bestimmung der Schwingungsgefährdung. Als Ergänzung dieser Methode stellen die Verfasser ein Verfahren zur Abschätzung der Schwingungsgefährdung vor. Auf weltweite Forschungsarbeiten, Betriebserfahrungen und weiterführendes weisen sie ebenfalls hin.

## 1 Allgemeines

Die Betriebssicherheit aller Freileitungen wird durch unvermeidbare windbedingte Seilschwingungen mehr oder weniger beeinträchtigt. Über diese Gefährdung bestanden bis 1980 nur ualitative Vorstellungen z. B. von dem Einfluß der Seilzugspannung, der Wind- und Geländebedingungen sowie von der Konstruktion der Hängeklammern und Dämpfer. Es gab keine zuverlässige quantitative Berechnungsmöglichkeit, die der Ingenieur bei der Planung und im Betrieb von Freileitungen benutzen konnte.

Nach über 60jährigen Bemühungen stehen jetzt Methoden zur Bestimmung der Schwingungsgefährdung und der Lebensdauer der Freileitungsseile zur Verfügung:

1. Die genaue Cigré-Methode [1; 2] auf der Basis von Messungen der dynamischen Seilbewegung bzw. Beanspruchung an den kritischen Stellen des Seiles bei natürlichen winderregten Schwingungen;
2. eine überschlägige Methode durch Benutzen von durch Meßergebnisse und Betriebserfahrungen bestimmte Gefährdungsfaktoren wie sie hier erstmals vorgestellt wird.

Damit ist das Ziel erreicht, das seit den ersten Draht- bzw. Seilbrüchen Anfang der zwanziger Jahre angestrebt wurde. Damals stellte man in vielen Ländern, auch in Deutschland, Schäden an Freileitungsseilen fest. Als Ursache wurden windbedingte Seilschwingungen erkannt [3; 4; 5; 6]. Die winderregten Seilschwingungen werden von einer nicht-linearen, inhomogenen partiellen Differentialgleichung 4. Ordnung beschrieben.

Eine quantitative Lösung dieser Gleichung ist bisher, aus verschiedenen Gründen, nicht möglich gewesen. So sind u. a. die realen Windkräfte nicht bekannt, ebenso nicht die von der Zeit, den Schwingungsamplituden und den Seilen des Abspannabschnittes abhängigen Integrationskonstanten und Dämpfungsfaktoren. Die verschiedensten theoretischen Ansätze führten zu keiner praktikablen Lösung des Problems.

Mangels theoretischer Lösung war es daher nötig, durch Beobachtungen und Messungen der Seilschwingungen, die notwendigen Betriebserfahrungen und Erkenntnisse zu sammeln [7].

## 2 Internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Seilschwingungen

Alarmiert durch die Schwierigkeit, Seilschäden gezielt zu vermeiden, wurde eine weltweite Zusammenarbeit der Fachleute und die Schaffung von Schadenstatistiken von der Cigré (Conference Internationale des Grands Reseaux Electriques à haute tension) seit etwa 1925 organisiert. In Jahre 1953 setzte das Cigré Studienkomitee 6 (Freileitungsseile) dafür eine Arbeitsgruppe, das EDS-Panel ein, (EDS = Every Day Stress = Mittelzugspannung).

Das EDS-Panel empfahl 1960 [8] zur Vermeidung von Seilschäden gewisse Grenzwerte der EDS (Mittelzugspannung) nicht zu überschreiten. Es bleibt ein wenig rätselhaft, warum damals diese Grenzwerte festgelegt wurden, da die Betriebserfahrungen dazu keine ausreichende Begründung boten.

1965 bildete das Cigré Studienkomitee 22 (Freileitungen) als Nachfolger des EDS-Panel, zwei Arbeitsgruppen;

die Gruppe 01: für theoretische und  
die Gruppe 04: für vorwiegend praktische Untersuchungen.

Die Arbeitsgruppe 04 des Cigré Studienkomitees 22 startete zur Klärung der Ursachen und Folgen der winderregten Seilschwingungen 1970 neue Untersuchungen, auch eine Umfrage, deren Ergebnisse in *Tafel 1* enthalten sind.

52 Elektrizitätsversorgungsunternehmen von allen Erdteilen berichteten über ihre Erfahrungen mit insgesamt 160 000 km Freileitungen von 110 bis 750 kV Betriebsspannung. 28 Unternehmungen machten Angaben über Seilbeschädigungen, 40 % der Schäden wurden windbedingten Schwingungen, 12 % dem Tanzen der Seile und 4 % den Seilschwingungen bei Bündelleiter, zwischen den Abstandhaltern, Teilfeldschwingungen, zugeordnet.

Wind- und Geländefaktoren werden dabei als die wichtigsten Einflußfaktoren der Schwingungsgefährdung genannt. Die Auswertung der Betriebserfahrungen machten den Einfluß vielfältiger Parameter auf die Schwingungsgefährdung deutlich, nicht nur der Seilzugspannung, wie vom EDS-Panel 1960 und z. T. auch von der Fachwelt angenommen wurde. Ergebnisse von Freiluftversuchen bestätigten die Vielfalt der Parameter [7].

Umfangreiche Dauerfestigkeitsversuche wurden ebenfalls von Mitgliedern der Arbeitsgruppe 04 durchgeführt. Es ergaben sich auf diesem Gebiet neue Erkenntnis über die Wechselbiegefestigkeit der Freileitungsseile und erstmalig systematisch ermittelte Woehlerkurven für Aluminium, Aldrey und Al/St-Seile [1; 2].

Die Wechselbiegefestigkeit der Seile liegt sehr viel niedriger als die der bis dahin untersuchten Einzeldrähte, wie *Bild 1* zeigt. Die Wechselbiegefestigkeit der Seile ist durch die Kurven *3a* und *3b* dargestellt. Die

*Tafel 1.* Ergebnisse einer Umfrage

Ursachen der Seilschäden	Anzahl der zustimmenden Antworten		
	hochfrequente Schwingungen	Schwingungen zwischen den Abstandhaltern	Seiltanzen
Gelände	33	8	22
Seilzugspannung	35	8	13
Bündelanordnung	8	8	9
Windrichtung und Stärke	37	9	22
Längsabstand der Abstandhalter	3	13	3
Bündel- oder Einzelseil	13	14	14
Seiltyp	23	6	8
Armatur	17	3	—
Art des Seilzugs	3	2	—
sonstiges	15	8	17
Anteil	40 %	4 %	12 %

\*) Dr.-Ing. W. F. Bückner ist beratender Ingenieur nach 35jähriger Tätigkeit im Freileitungsbau bei Siemens und der GEA Stuttgart/Fellbach und war von 1965 bis 1986 Leiter der Arbeitsgruppe 04 (Dauerfestigkeit der Freileitungsseile) des Cigré-Studienkomitees 22 (Freileitungen); Dipl.-Ing. K. O. Papailiou ist Geschäftsführer der Sefag AG, Malters/Luzern.

Diese Veröffentlichung ist dem 65jährigen Bestehen der Karl Pfisterer, Elektrotechnische Spezialartikel GmbH & Co KG, Stuttgart, gewidmet.

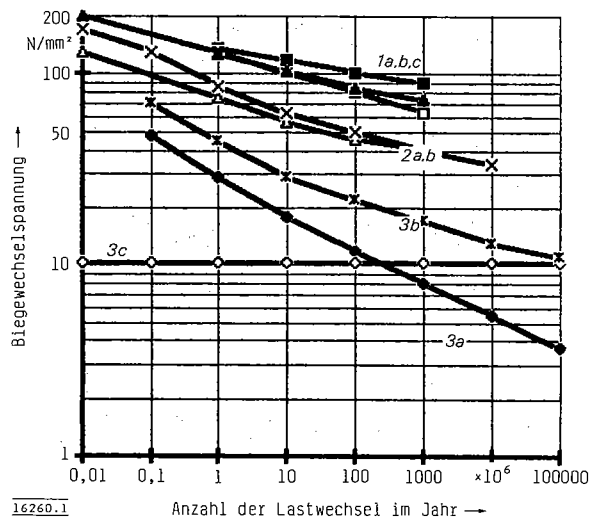


Bild 1. Dauerwechselfestigkeit von Aluminium/Aldrey- und Al/St-Seilen

- 1a Aldreydrähte 1
- 1b Aldreydrähte 2
- 1c Aldreydrähte 3
- 2a Aluminiumdrähte 1
- 2b Aluminiumdrähte 2
- 3a safe Border Line »Cigré«, Seile
- 3b safe Border Line, max., Seile
- 3c safe Border Line »IEEE«

Differenz im Verhalten der Einzeldrähte und des Seiles wird besonders durch Reibkorrosion an den Kreuzungsstellen der im Kreuzschlag verseilten Drähte, auch »fretting« genannt, verursacht [1; 7; 9]. Die hierbei entstehenden Kerben verringern, wie aus der Werkstoffkunde bekannt ist, zusätzlich die Dauerfestigkeit der Einzeldrähte und damit auch der Seile.

Dieser Vorgang führt zu einem stetigen Abfall der Dauerfestigkeit, mit der Anzahl der Lastwechsel. Es gibt für Freileitungsseile mit Aluminium- bzw. Aldrey-Drähten, die immer im Kreuzschlag verseilt sind (wegen der Drallfreiheit), keine Dauer-Festigkeitsgrenze, wie sie für einteilige Bauteile aus Metall, besonders aus Stahl, bekannt ist. Die mit dem Kriechen der Seile verbundene Lastumlagerung von den Aluminium- zu den Stahldrähten sollte bei der Festlegung der Woehlerkurve beachtet werden [1]. Zur einheitlichen Durchführung von Dauerfestigkeitsversuchen an Seilen, mit oder ohne Klemmen, wurde von der Cigré eine Empfehlung veröffentlicht [10]. Klemmen verringern die Dauerfestigkeit der Seile um ca. 50% [1; 2; 11.2].

Die Arbeitsgruppe Gruppe 04 kam nach 15 Jahren intensiver Arbeit zu grundsätzlich neuen Überlegungen, die nach ausführlichen Diskussionen 1979 als Cigré-Methode von dem Studienkomitee 22 (Freileitungen) veröffentlicht wurden [1; 2].

Die Cigré-Methode verlangt zur zuverlässigen quantitativen Bestimmung der Schwingungsgefährdung der Seile, Berechnungen auf der Grundlage von Messungen der natürlichen, widerregten Seilschwingungen von in Betrieb befindlichen oder von Versuchsfreileitungen [1; 2].

Mit der gemessenen Anzahl der Lastwechsel für die verschiedenen Wechselbiegebeanspruchungen und der Woehlerkurve ist die Berechnung der Lebensdauer (Zeitfestigkeit) möglich (s. Abschnitt 5).

Die Vielfalt der die Schwingungsgefährdung der Freileitungsseile beeinflussenden äußeren und inneren Einflüsse, die theoretisch nicht genau berechnet werden können und auch nicht mit vertretbarem Aufwand bestimmbar sind, wird durch die Messung der dynamischen Beanspruchung von Freileitungsseilen bei natürlichen, widerregten Seilschwingungen automatisch berücksichtigt.

### 3 Messung der Schwingungsgefährdung

Die Cigré-Methode bietet dem Ingenieur in der Praxis u. a. folgende Möglichkeiten:

1. Überprüfung der gefährdeten bzw. für die Energieversorgung wichtigen Freileitungen, durch Abschätzung (s. Abschnitt 6) sowie durch laufende Messung der Schwingungsgefährdung.
2. Untersuchung der Wirksamkeit verschiedener Armaturen und deren Anordnung z.B. der Dämpfer.

Die Schwingungsintensität eines Seiles wird durch direkte Messungen festgestellt, entweder der Biegewechselsamplitude (»Bending Amplitude«) mit Bewegungsmessgeräten (Weggebern) oder der Biegewechselbeanspruchung mit Dehnmessstreifen. Diese Messung wird an den Stellen vorgenommen, wo die Gefahr von Seilbrüchen erfahrungsgemäß am größten ist, d.h. in der Nähe von Klemmen. Solche Messungen wurden erstmals in den USA und Kanada durchgeführt [12].

In der Regel wird entsprechend dem USA-Standard der IEEE, die »Bending Amplitude«, d.h. die Schwingungsamplitude des Seiles, 89 mm von dem letzten Kontaktpunkt des Seiles mit der Klemmenmulde relativ zur Klemme, an der das Meßgerät befestigt ist, gemessen [13]. Durch theoretische Überlegungen hat man zur Bestimmung der Biegewechselspannung  $S$  aus der Biegeamplitude  $Y_b$  in mm (Spitze-Spitze) folgende Näherungsformel gefunden [14].

$$S = d/4 \cdot E_a \cdot p^2 \cdot Y_b \cdot 1/(e^{(p \cdot x)} - 1 + p \cdot x) \text{ in N/mm}^2$$

dabei ist

- $d$  Drahtdurchmesser Außenlage (mm);  $H$  = Seilzug in TN
- $E_a$  E-modul Außenlage N/mm<sup>2</sup>;  $p = \sqrt{H/E \cdot I}$   $x = 89$  mm
- $E \cdot I$  Seilsteifigkeit als Summe der Steifigkeit der Einzeldrähte

Für die genannten Messungen sind verschiedene Meßgeräte im Laufe der letzten 30 Jahre entwickelt worden [15].

Der ideale Schwingungsrecorder sollte dem IEEE-Standard entsprechen und vor allem bei hoher Meßgenauigkeit eine einfache Handhabung und Auswertung erlauben. Er muß leicht (etwa 1 kg) und eine Betriebszeit von drei Monaten im Tag- und Nachtbetrieb mit einem Batteriepack erlauben.

Ein solcher Recorder der neuen Generation ist von der Bundesanstalt für Materialprüfung in Berlin (BAM) 1985 entwickelt worden (Bild 2) und wird von der Elektronik-Meßtechnik, Dipl.-Ing. Leo Schmidt GmbH (EMS), Berlin, hergestellt und von Karl Pfisterer, Stuttgart, vertrieben.

Dieses Meßgerät hat einen eingebauten elektronischen Speicher für die Meßwerte. Gespeichert wird die Anzahl der Schwingungen in der Versuchszeit für jeden der vorgesehenen Amplituden- und Frequenzbereiche. Das Gerät hat eine 16 x 16 Matrix d.h. 16 Frequenz (1 bis 250 Hz) und 16 Amplitudenbereiche (0,05 bis 2 mm, Spitze-Spitze). Tafel 2 zeigt eine solche Matrix.

Am Ende der Messungen wird der Recorder, der vorzugsweise magnetisch an der Haltekonsole befestigt ist, abgenommen und am Versuchsort oder auch an zentraler Stelle mit einem Interface mit RS 232 Ausgang, an einen Computer angeschlossen. Zum Auslesen der Meßwerte genügt ein kleiner batteriebetriebener »Hand-Held-Computer« mit rd. 6 KByte-Speicher und RS 232-Anschluß (z. B. Casio 1500 oder Epson HX-20).

Für das Auslesen und die komplette Auswertung gemäß der Cigré-Methode ist ein PC mit rd. 60 KByte-Speicher und einem seriellen

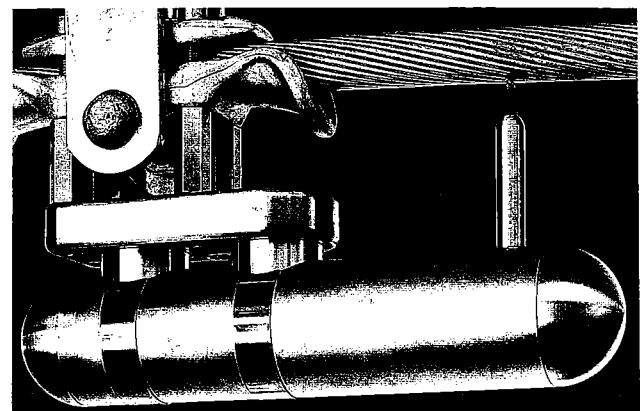


Bild 2. Schwingungsrecorder

Tafel 2. Datenmatrix (Halbwellen) im Meßzeitraum

Frequenz	Amplitude in mm:							
	0,05 0,45	0,10 0,50	0,15 0,55	0,20 0,60	0,25 0,65	0,30 0,70	0,35 0,75	0,40 bis 0,80
1 Hz	82	1	0	0	0	0	0	0
2 Hz	187	8	0	0	0	0	0	0
5 Hz	320	10	0	0	0	0	0	0
10 Hz	112	4	0	0	0	0	0	0
15 Hz	125	60	32	18	10	1	0	0
20 Hz	1200	610	333	257	100	42	0	0
25 Hz	57	3	0	1	0	0	0	0
30 Hz	10	0	0	0	0	0	0	0
35 Hz	45	1	0	0	0	0	0	0
40 Hz	149	4	0	0	0	0	0	0
45 Hz	105	4	0	0	0	0	0	0
50 Hz	29	1	0	0	0	0	0	0
60 Hz	1	0	0	0	0	0	0	0
80 Hz	0	0	0	0	0	0	0	0
100 Hz	0	0	0	0	0	0	0	0
150 Hz	0	0	0	0	0	0	0	0

Interface (RS 232) notwendig. Falls die Meßergebnisse auch in Kurvenform dargestellt werden sollen, ist ein zur Wiedergabe der Graphik geeigneter PC und ein dazu passender Drucker nötig.

#### 4 Auswertung der Messungen

Das Einlesen der Meßdaten vom Recorder zum PC und die sehr komfortable Auswertung der Daten wird mit der von K. Pfisterer zusammen mit dem Recorder vertriebenen Software vorgenommen.

Die Schwingungszahlen der 16 Beanspruchungsbereiche werden in Form des Blockdiagramms und der akkumulierten Beanspruchungskurve ausgewertet. Es ist sehr zu empfehlen diese Werte nicht nur in Tabellenform (Tafel 2) sondern auch graphisch aufzutragen (Bild 3).

Die in Tafel 2 und Bild 3 dargestellten Meßergebnisse wurden in einer Versuchs-Freileitung ermittelt, die gleichmäßigen, langanhaltenden Winden auf der schwäbischen Alb ausgesetzt war, untersucht wurde das Al/St-Seil 240/40 mit einer hohen Mittelzugspannung von 25 %.

In Tafel 2 sind die Matrixwerte aufgetragen, die Grundlage der Kurve 1 vom Bild 3 sind. In Bild 3 sind zwei akkumulierte Beanspruchungskurven aufgetragen; Kurve 1 gilt für einen 2er Bündel AV-Abstandhalter mit Dämpfungselementen von K. Pfisterer (AV = Anti-vibration) und Kurve 2 für einen normalen 2er Bündelabstandhalter.

Kurve 3 zeigt die Wechselbiegefestigkeit von Al/St-Seilen in Form der von der Cigré vorgeschlagenen »Safe Border Line«, d. h. einer konservativen Woehlerkurve.

Eine quantitative Auswertung der Kurven 1 und 2 führt zu einer maximalen Lebenserwartung des Seiles bei Verwendung des AV-Halters von rd. 400 Jahren und bei dem normalen Abstandhalter von 30 Jahren.

Ein Vergleich des Schwingungsverhaltens der gemessenen Anordnungen ist mit den akkumulierten Beanspruchungskurven möglich, wie es die Kurven 1 und 2 von Bild 3 deutlich machen; je kleiner die Beanspruchung und Lastwechsel desto kleiner ist die Gefahr von

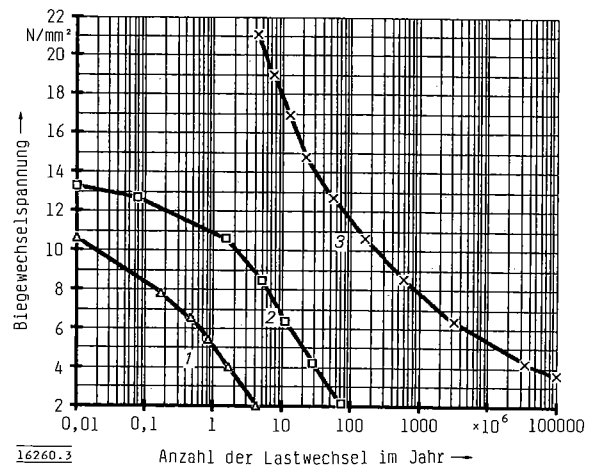


Bild 3. Schwingungsverhalten von unterschiedlichen 2er Bündelabstandhaltern; akkumulierte Beanspruchungskurve

- 1 K. Pfisterer 2er AV-Bündelabstandhalter
- 2 K. Pfisterer 2er Bündelabstandhalter normal
- 3 Safe Border Line Cigré

schädlichen Schwingungen. Die Matrix (Tafel 2) erlaubt weitere Auswertungen z. B. die Häufigkeitsverteilung der Beanspruchungen und Frequenzen.

Bezüglich des physikalischen Hintergrundes dieser akkumulierten Beanspruchungskurven und der Art ihrer numerischen Bestimmung sowie der Auswertung der Matrix wird auf [1; 2] verwiesen.

Bild 4 zeigt den Mast einer 132-kV-Freileitung in Zentralafrika, die nach sechs Jahren Seilschäden aufwies. Fichtner – Beratende Ingenieure, Stuttgart, erhielt den Auftrag zur Festlegung von Rehabilitationsmaßnahmen. Die notwendige Untersuchung der Schwingungsfährdung wurde gemäß der in den Abschnitten 3 und 4 erläuterten Cigré-Methode durchgeführt. Hierzu wurden fünf Recorder eingesetzt. Das Schwingungsverhalten des dort verwendeten Aldreyseiles von 228 mm<sup>2</sup> Querschnitt mit 18 % Mittelzugspannung wurde bei der

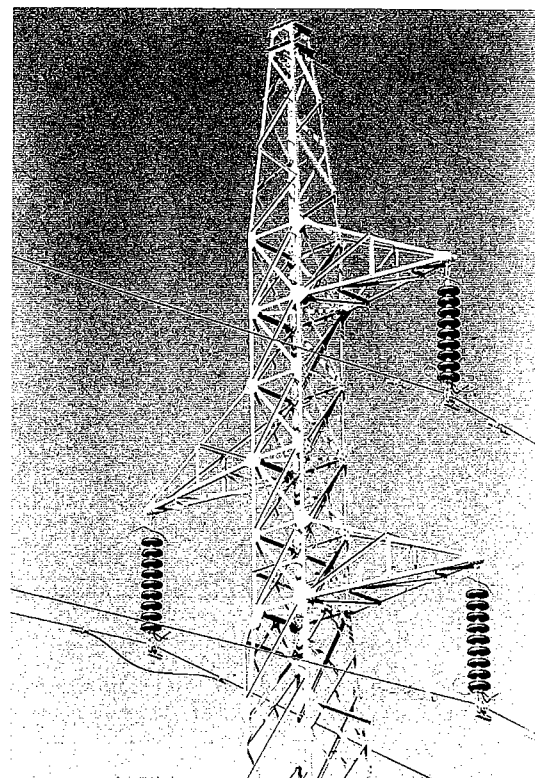


Bild 4. Mastkopf mit verschiedenen Dämpfungsanordnungen und Meßgeräten

ursprünglichen und bei zwei anderen Dämpfungsanordnungen festgestellt.

Die Messungen wurden am gleichen Mast und im gleichen Zeitraum durchgeführt. Damit ist bezüglich des dominierenden Windeinflusses auf das Schwingungsverhalten der drei verschiedenen Anordnungen eine gleiche Ausgangsbasis vorhanden. Die Messergebnisse können daher zu einem objektiven Vergleich herangezogen werden.

Es handelt sich um eine Leitung in einem Gebiet mit langanhaltenden, gleichmäßigen Winden in dem gefährlichen Geschwindigkeitsbereich von 0,5 bis 0,7 m/s. Die Messungen bestätigten die Gefährdung der Leitung im ursprünglichen Zustand (s. Bild 4, linke untere Phase, Nr. 1) und die Verbesserung durch die Dämpfer Nr. 2 (obere Phase rechts) und Nr. 3 (untere Phase rechts).

Die Messergebnisse dieser Leitung, ersichtlich aus den akkumulierten Beanspruchungskurven 1, 2 und 3 in Bild 5 entsprechend der oben festgelegten Zuordnung, erlauben eine zuverlässige Beurteilung. Die Lebensdauer der ursprünglichen Leitung ergab sich in Übereinstimmung mit der Praxis zu etwa vier Jahren. Die Dämpfer 2 und 3 erhöhen die maximale Lebenserwartung um das 6fache auf etwa 40 Jahre. Die Messergebnisse erlauben eine zuverlässige quantitativ belegbare Festlegung von Rehabilitationsmaßnahmen. Die Kurve 4 in Bild 5 stellt die gewählte Woehlerkurve dar.

Das wesentliche Ergebnis aller bisheriger Messungen ist in Übereinstimmung mit den Umfrageergebnissen der dominierende Einfluß der Dauer und der Gleichförmigkeit des Windes senkrecht zur Leitung in Höhe der Seile über Grund, d. h. der Anzahl der Lastwechsel. Dies hat man bisher, in quantitativer Hinsicht, nicht genügend beachtet.

Es empfiehlt sich daher zumindest bei Messung der Seilschwingungen laufend die Windgeschwindigkeit zu registrieren, um diese mit der Dauer und Größe der mittleren Windgeschwindigkeit eines Jahres vergleichen zu können.

Die Unterschiede der Anzahl der Lastwechsel je Jahr, ermittelt durch Messungen, ist beachtlich. Sie schwanken im Jahresmittel von  $10^5$  im hügeligen Gelände Mitteleuropas bis zu etwa  $10^{10}$  in ebenen, un bebauten Landstrichen mit konstanten, dauerhaften leichten Winden. Bezogen auf die Lebenszeit von 40 Jahren und einer Sicherheit von 2,5 liegen die notwendigen Bruchlastwechsel bei  $10^7$  bis  $10^{12}$ . Bild 1 zeigt die damit verbundene Problematik.

Die Einhaltung einer maximalen »Bending-Amplitude-Dehnung« von  $\pm 150 \times 10^{-6}$  bzw.  $10 \text{ N/mm}^2$ , wie in den USA eingeführt, erscheint nicht sinnvoll. Bei diesem Wert sind nur Bruch-Lastwechsel bis zu rd.  $200 \times 10^6$  zulässig. Bei einer Lebensdauer von 30 Jahren und einem Sicherheitsfaktor von 2,5 ergibt sich eine zulässige Anzahl von Lastwechseln von  $200 \times 10^6 / 75 = \text{rd. } 2,7 \times 10^6 / \text{Jahr}$ . Diese wird in vielen Gebieten überschritten, womit die nötige Sicherheit unterschritten wird.

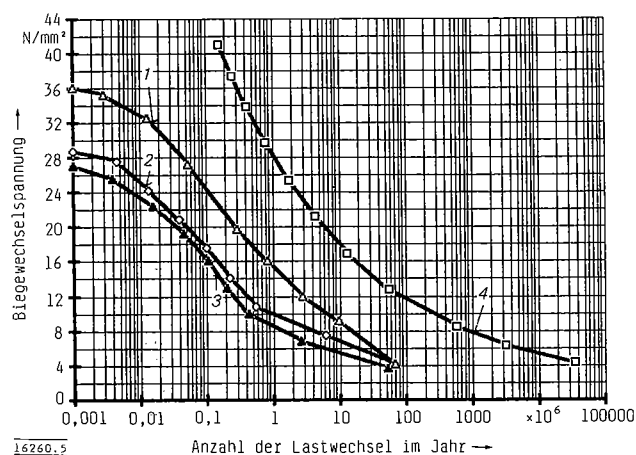


Bild 5. 132-kV-Freileitung Arnou-Araren/Arlit; Schwingungsverhalten von drei Dämpfersystemen; akkumulierte Beanspruchungskurve

- 1 Bretelle-Dämpfer
- 2 Stockbridge-Dämpfer
- 3 K. Pfisterer-Dämpfer
- 4 Safe Border Line »Cigré«

Bei einer kleineren Anzahl von Lastwechseln z. B. in hügeligen oder bebauten Gebieten mit geringer Windaktivität ist andererseits diese USA-Empfehlung unwirtschaftlich, da man ohne weiteres höhere Beanspruchungen zulassen kann, d. h. höhere Seilzugspannungen oder Verzicht auf Schwingungsdämpfer.

Es sei noch erwähnt, daß eine Meßzeit von 6 bis 7 Wochen notwendig ist, um ein für unsere Breiten repräsentatives Ergebnis für ein Jahr zu erhalten. Vergleicht man verschiedene Anordnungen zur gleichen Zeit am gleichen Mast, genügt eine kürzere Meßzeit von 3 bis 4 Wochen, da es hier nicht so sehr auf den absoluten Wert der Lebensdauer ankommt, sondern auf deren Relationen.

Bei solchen Vergleichsmessungen sind die Anforderungen an die Genauigkeit der Woehlerkurve nicht allzu groß. Für genaue Lebensdauerermittlungen läßt sich diese bei bekannter Betriebszeit von Leitungen mit Seilschäden durch Probieren feststellen. Im übrigen empfiehlt es sich, für die Seile und Armaturen eines Einheitsgestänges die Dauerfestigkeit feststellen zu lassen, wie es sinngemäß zur Ermittlung der Bruchsicherheit von Masten üblich ist. Empfehlungen für die Durchführung solcher Versuche hat die Cigré 1985 veröffentlicht [10].

## 5 Bestimmung der Schwingungsgefährdung der Seile

Bei kleinen Beanspruchungsamplituden ohne plastische Verformungen unter dem zusätzlichen Einfluß von Korrosion und Reibverschleiß, wie im vorliegenden Fall winderregter Seilschwingungen wird zur Bestimmung der Lebenserwartung  $L$  die »Miner«-Formel [11], häufig auch im Automobil- und Flugzeugbau, verwendet. Sie beruht auf einer linearen Schadensakkumulationshypothese und hat den Vorteil einer einfachen ingenieurmäßigen Abschätzung. Der Schadensanteil bei einem Spannungsniveau  $\pm S$  wird ermittelt aus dem Verhältnis  $n/N$ ;  $n$  ist die für ein Jahr zu erwartende Anzahl von Lastwechseln in diesem Beanspruchungsbereich und  $N$  ist die für den gleichen Bereich aus der Woehlerkurve zu entnehmende Bruchlastwechselzahl. Näheres kann dem Schrifttum entnommen werden [1; 2; 11].

Die Restbetriebszahl  $LR$  erhält man gemäß

$$LR = L - LB;$$

wobei  $LB$  = Betriebszeit bis zum Zeitpunkt der Messung.

Die in den Abschnitten 3, 4 und 5 erläuterte Methode fand in letzter Zeit zunehmendes Interesse in verschiedenen Ländern, wie vorliegende Berichte zeigen [16].

## 6 Abschätzung der Schwingungsgefährdung durch Gefährdungsfaktoren

Eine überschlägige Ermittlung der Schwingungsgefährdung von Freileitungen ist notwendig, wenn z. B. über Messungen von gefährdet erscheinenden Leitungen entschieden wird oder wenn Messungen während der Planungszeit nicht möglich sind. Dabei kann der Freileitungsingenieur zusätzlich zu den Erfahrungen im eigenen Versorgungsgebiet auch die Erfahrungen anderer Kollegen zu Rate ziehen, wozu u. a. die Cigré durch die Umfragen beiträgt, ebenso die vorliegenden Messergebnisse [1; 7]. Diese Erfahrungen sind die Grundlage der folgenden Methode zur Abschätzung der Lebenserwartung von Freileitungsseilen.

Die Schwingungsgefährdung ist von zahlreichen mehr oder weniger bedeutenden Faktoren abhängig. Die wichtigsten werden durch Gefährdungsfaktoren im folgenden berücksichtigt und ergeben einen Gesamtfaktor  $F$  der die Lebenserwartung  $L$  angibt und die Einheit »Jahr« hat.

Ausgangspunkt der Methode ist eine Lebensdauer (bis zum Bruch von drei Einzeldrähten) von 100 Jahren bei einer Sicherheit von 2,5 und damit eine effektive Lebenserwartung von 40 Jahren. Vorausgesetzt ist eine Freileitung in Mitteleuropa mit 1000 Stunden Winddauer  $< 7 \text{ m/s}$  Geschwindigkeit, bei einer Gleichförmigkeit vom 70%; 70% bedeutet, daß der Wind während 10 Minuten um  $\pm 70\%$  schwankt. Angenommen werde ferner hügeliges Gelände und drei Spannweiten im örtlich kritischen Bereich, Al/St-Seile mit Drahtdurchmesser von  $> 3,5$  bis 4 mm mit einer Mittelzugspannung von 18%, sowie einer Spannweite von 400 m und normale Hängeklammern:

