

# Fortschritte bei der Bestimmung der Lebensdauer von Freileitungsseilen unter dem Einfluß winderregter Schwingungen

Von Walter F. Bückner, Rolf Helms und Konstantin O. Papailiou\*)

Windbedingte Seilschwingungen waren nach den ersten Seilschäden (1925) Gegenstand zahlreicher Beobachtungen und Messungen. Sie führten zu keinen allgemein anwendbaren Dimensionierungsrichtlinien, auch nicht die zahlreichen theoretischen Untersuchungen der letzten 60 Jahre. Eine quantitativ zuverlässige Bestimmung der Lebenserwartung der Seile ermöglichte erst die stürmische Entwicklung der Elektronik. Sie schaffte preiswerte Meßgeräte. Neue interessante Erkenntnisse über den quantitativen Einfluß verschiedener Parameter-Kombinationen wie von Gelände, Seilzugspannung, Wirkung der Dämpfer, Abstandhalter und Hängeklemmen auf die Schwingungsgefährdung der untersuchten Seile wurden bereits gewonnen. Im Laufe der Zeit werden diese Ergebnisse allgemeine Empfehlungen auch für die Planung neuer Freileitungen ermöglichen.

## 1 Allgemeines

Die Fortschritte des Standes der Technik auf dem Gebiet der winderregten Seilschwingungen wurden in einem kürzlich in dieser Zeitschrift erschienenen Aufsatz [1] nicht beachtet bzw. negativ beurteilt und eine Lösung des Problems auf theoretischer Grundlage favorisiert. Die dort getroffenen Schlußfolgerungen werden im folgenden kritisch betrachtet.

Die Verfasser dieses Aufsatzes haben bereits 1985 in dieser Zeitschrift [2] den Stand der Technik erläutert, wie er allgemein in Mechanik und Maschinenbau praktiziert wird und auch für Freileitungen auf internationaler Basis von dem Cigré Studienkomitee 22 (Freileitungen) Arbeitsgruppe 04 (Betriebsfestigkeit der Seile) entwickelt und bereits 1979 vom Komitee 22 offiziell empfohlen wurde [3]. Diese Entwicklung begann 1965 in der Bundesrepublik Deutschland [4; 5].

Fortschritte bei der Berechnung der Lebensdauer von schwingungsbeanspruchten Freileitungsseilen sind in den letzten Jahren durch die zunehmende Anzahl der Schwingungsmessungen an Freileitungen erzielt worden. Sie sind eine zuverlässige Methode, die Lebenserwartung der Seile im Hinblick auf winderregte Seilschwingungen zu bestimmen. In

allen Erdteilen werden heute mit zunehmender Tendenz diese Schwingungsmessungen an Seilen von in Betrieb befindlichen oder von Versuchsfreileitungen vorgenommen.

Die Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit dieser Messungen gegenüber theoretischen Berechnungen und Laboratoriumsversuchen werden in [1] nicht beachtet. Es wird dort abschließend auf die Notwendigkeit des Einbaues von Schwingungsdämpfern bereits bei geringen Beanspruchungen hingewiesen, ohne die Notwendigkeit dafür detailliert und zuverlässig nachzuweisen, was auch angesichts der Vielfältigkeit des Schwingungsproblems, das bereits seit über 60 Jahren einer quantitativen Lösung harrt, wenig befriedigt.

Freileitungsschwingungen sind kein eigenständiger Wissenschaftsbereich. Ihre Untersuchung ist relativ einfach, bedarf jedoch vielseitiger Detailarbeit, nicht so sehr allgemeiner und qualitativer Überlegungen.

Die neuen Erkenntnisse der aeroelastischen Stabilität von Bauteilen in einer

\*) Dr.-Ing. W. F. Bückner ist Beratender Ingenieur nach über 35jähriger Tätigkeit im Fahr- und Freileitungsbau bei Siemens und der Gea Stuttgart-Fellbach und war von 1965 bis 1986 Leiter der Arbeitsgruppe 04 (Lebensdauer der Freileitungsseile) des Cigré Studienkomitees 22 (Freileitungen); Prof. Dr.-Ing. R. Helms ist Leiter der Fachgruppe Werkstoffmechanik und Verhalten von Konstruktionen der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin; Dipl.-Ing. K. O. Papailiou ist Geschäftsführer der Sefag AG, Malters-Luzern.

Windströmung [8], die auch für Seil-schwingungen gelten, bestätigen ebenfalls die Notwendigkeit von umfangreichen Messungen.

Zur Vermeidung von Irritationen bei den Fachingenieuren werden nachfolgend einige bedeutende Punkte des aktuellen Standes der Technik an Hand von Meßergebnissen und neuesten Untersuchungen, auch ausländischer Institute, im Vergleich zu [1], praxisnah aufgezeigt.

## 2 Zur Theorie

Eine physikalisch fundierte theoretische Betrachtung der Seilschwingungen bedarf der Lösung einer inhomogenen nichtlinearen Differentialgleichung des biegesteifen, zugbelastenden Seiles, für mehrere – mindestens 3 – Spannweiten und die Berücksichtigung von Dämpfungsgliedern, sowie der erregenden Kräfte, die auch von der Amplitude und Geschwindigkeit des schwingenden Seiles selbst beeinflußt werden (Mitnahmeschwingungen u. a. durch eine Mathieusche Differential-Gleichung darstellbar). Diese ist noch nie für Freileitungsseile exakt, nur annähernd, gelöst worden [8; 9]. Nur mit der Lösung dieser Gleichung kann man die Schwingungsform des Seiles an den Klemmen und damit die für die Bestimmung der Lebensdauer wichtigen Schwingungs-Beanspruchungen und die Anzahl der Lastwechsel zuverlässig erfassen. Die in [1] beschriebene Lösung, lineare Differential-Gleichung eines einfeldrigen Seiles als mathematisches Modell eines Leitungsabschnittes genügt diesen Anforderungen nicht, auch nicht die schon früher [10] beschriebene Lösung eines zweifeldrigen Seilabschnittes, allein schon wegen der bei diesen Modellen nicht vorgesehenen freien Bewegung der Hängeklemmen an den beiden Endpunkten zumindest einer Spannweite, die die Schwingungsform und maximale dynamische Biegebeanspruchung an der Hängeklemme maßgebend beeinflußt.

Die Einführung von in Kurzzeitversuchen gemessenen Freifeldschwing-Winkel, -amplituden und -frequenzen in die theoretische Betrachtung [1; 11; 31] können diesem Mangel nur unvollkommen abhelfen. Die daraus, auf Basis des Modells eines Einzelfeldes mit eingespannter Lagerung des Seiles an den Hängeklemmen, berechneten Seilbeanspruchungen, sind:

- ungenau, was in dem angenommenen mathematischen Modell begründet ist,
- sehr aufwendig, da die Anwendbarkeit solcher analytischer Lösungen zusätzlich Messungen z. B. mit optoelektronischen Meßgeräten notwendig macht,
- für die Betriebszeit nicht repräsentativ, da nur Kurzzeitmessungen möglich sind.

Die aus Kurzzeitversuchen gemessenen Schwingungsamplituden und Frequenzen wurden in den letzten Jahren zur Berechnung der Freifeldschwingwinkel der Seile im Knotenpunkt und der Biege-wechselbeanspruchung der Seile an der Hängeklemme vorwiegend in Europa benutzt. In Kanada, Australien und in den USA sind routinemäßige Messungen schon seit über 20 Jahren, damals mit dem Ontario Hydro Recorder, üblich. Die Gründe sind schwer zu finden; möglicherweise erschienen hier die genauen Messungen zu aufwendig oder die teuren Schwingungslaboratorien verlangten nach einer besseren Auslastung.

Eine quantitativ verwendbare, theoretische Gesamtlösung verlangt die Einführung der von Zeit und Ort abhängigen, das Seil zu Schwingungen anregenden, Windkräfte. Dies ist aufgrund des bereits an einem Ort stochastischen Charakter des Windes [12; 13] nicht möglich, geschweige denn, längs eines über mehrere Spannweiten verlaufenden Freileitungs-seiles, bei dem sich die Faktoren, die die Windstruktur (Windgeschwindigkeit und Turbulenz) mitbestimmen, wie der Abstand zum Boden, und die geländebedingten Oberflächen-Rauhigkeiten, laufend ändern.

Für die dem Seil durch die Windströmung zugeführte Energie wurde noch keine Formel gefunden, die diese als Funktion der eben beschriebenen Windstruktur zu berechnen erlaubt; ein Blick in die Aeroelastik [8] kann hier vielleicht weiterhelfen.

In den bisherigen theoretischen Untersuchungen nimmt man konstante Windkräfte an [31], die zu stehenden Wellen führen. Praktisch hat man es aber aufgrund der orts- und zeitabhängigen Windkräfte mit einem stochastischen Verlauf der Schwingungen zu tun, die im Abspannfeld zumindest teilweise über die Hängeklemmen hinweg in angrenzende Spannfelder weiterlaufen. Betriebserfahrungen zeigen, daß Hängeklemmen die ein Durchlaufen der Schwingungen erleichtern, wie die 3-Punkt-Aufhängung oder die elastische Halterung des Seiles (AGS), die dynamische Seilbeanspruchung an der Hängeklemme verringern [4; 5].

In dem Freileitungs-Schrifttum findet man häufig Hinweise auf die im Gegensatz zu der turbulenten Strömung gefährlicheren laminaren Windströmungen am Seil. So weit so gut, nur in unseren Breiten und Landschaften haben wir es bis rd. 50 m Höhe über Grund, aufgrund der Bodenrauhigkeiten und unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten längs der Leitung (zum Vorteil für die Schwingungsgefährdung!) mit turbulenten Windverhältnissen zu tun [12; 13]. Die Reynoldszahl für Seile liegt im Bereich zwischen 0 und 15000, d. h. sehr niedrig. Bei glatten Wänden z. B. im Windkanal hätten wir es mit einer laminaren Strömung zu tun, aber nicht bei Freileitungsseilen in der Natur.

Die Annahme der Anhänger der theoretischen Behandlung des Problems, die im Windkanal festgestellte Proportionalität – von Wind und Schwingungsfrequenz (Karmán-Formel) – hat sich bei Messungen an Freileitungen nicht bestätigt, wie in den USA [14] erst kürzlich wieder festgestellt wurde.

In der Praxis des Maschinenbaues werden heute bei Fällen dynamisch beanspruchter Bauteile zunehmend Messungen der Schwingungs-Beanspruchungen als Grundlage der Dimensionierung durch die heute weit entwickelte Meßtechnik ermöglicht. Lediglich bei begrenzter Zugänglichkeit zur Struktur des untersuchten Bauteils werden zusätzlich theoretische Schwingungsuntersuchungen, z. B. an Flugzeugtragflügeln [15], durchgeführt.

Theoretische Untersuchungen des Schwingungsverhaltens gehen von einem Zusammenhang zwischen der Frequenz und der Schwingungsbeanspruchung aus. Der Energieverbrauch eines schwingenden Seiles wird mit einer angenommenen Windeingangsleistung in Verbindung gebracht. Dies führt für jede Frequenz zu einer bestimmten Schwingungsamplitude, die näherungsweise in Schwingbeanspruchungen an der Hängeklemme umgerechnet wird [11; 31]. Wertet man die vorliegenden Messungen aus, ergibt sich jedoch für jede der vorkommenden Frequenzen eine Vielzahl von Schwingungsamplituden, nicht nur eine. Dies ist ein weiterer Beweis für die Ungenauigkeit theoretischer Berechnungen der Seilbeanspruchung.

Eine Weiterentwicklung der theoretischen Betrachtungen ist förderungswürdig, für den Alltag des Freileitungsingenieurs z. Z. aber wegen der Ungenauigkeit der Bestimmung der Biegewechselbeanspruchung am Klemmenrand und der Anzahl der Lastwechsel wenig

brauchbar. Eine zuverlässige wirtschaftliche Lebensdauerabschätzung ist damit z. Z. bedauerlicherweise nicht möglich.

Schwingungsmessungen gemäß [3] führen dagegen zu für die Praxis notwendigen Angaben zur Bestimmung des Risikos von Seilbrüchen durch widerregte Schwingungen.

### 3 Messung der Seilbeanspruchung

In den USA wurden bereits vor 35 Jahren Messungen der dynamischen Beanspruchung der Seile [16] vorgenommen, die 1966 zu einer Standardisierung der Meßmethode durch das IEEE führten [17], die sich heute allgemein durchgesetzt hat. Spezielle Meßgeräte wurden zunächst in Kanada entwickelt; Anlaß waren die zahlreichen Seilbeschädigungen, wie auch bereits 1925 für die Erfindung des Stockbridge-Dämpfers. Heute verfügt man dank der raschen Entwicklung elektronischer Meßgeräte über ein gutes, preiswertes und auswertefreundliches Meßgerät, das bereits weltweit im Einsatz ist [7].

In [1] wird auf frühere Probleme der genauen Messung von Beanspruchungen der Einzeldrähte von Freileitungsseilen hingewiesen und versucht damit die Notwendigkeit von theoretischen Untersuchungen und Messungen im Labor zu untermauern. Es wird dabei übersehen, daß

- mit den neuen Meßgeräten nicht die Dehnung von Einzeldrähten, sondern die Biegeamplitude  $Y_b$  des Seiles gemessen und damit die Wechselbiegebeanspruchung  $\sigma_B$  mittels der allgemein anerkannten Poffenberger-Swart-Formel [18] berechnet wird;

- im Laboratorium das Schwingungssystem der Freileitung aufgrund der nicht realisierbaren Ähnlichkeitsgesetze, d. h. der modellgerechten Relationen zwischen den verschiedenen Parametern (Spannweite, Steifigkeit, Seildurchmesser) und vor allem wegen des nicht möglichen Zusammenwirkens der äußeren Kräfte und der Schwingungsbewegung nicht demonstriert werden kann;
- die genauen Messungen wirtschaftlicher und genauer sind als die Messungen der Freifeldschwingdaten plus der analytischen Berechnung.

Über die Notwendigkeit von Messungen schreibt der auch in [1] zitierte amerikanische Fachmann, Rawlins, erst kürzlich [19]:

»Alle Komponenten des Schwingungsproblems, sei es der Windeinfluß, sei es die Eigendämpfung des Seils oder der Einfluß der Schwingungsdämpfer sind eine Funktion der Frequenz und der Amplitude der Schwingung und müssen grundsätzlich durch Messungen bestimmt werden.«

Die bisherigen Meßergebnisse bestätigen die Notwendigkeit solcher Messungen zur Abklärung von Betriebsgefährdungen und zur Ermittlung der dafür verantwortlichen Faktoren [2 bis 7].

Bei der Verschiedenheit der Leitungen hinsichtlich ihrer Technik und der unterschiedlichen Wind- und Geländeeinflüsse bedeutet dies, daß zur Ermittlung der Betriebssicherheit Messungen der Biegeamplituden und Lastwechsel aller Hochspannungsfreileitungen vorgenommen werden sollten; zumindest wenn es sich um wichtige bzw. schwierig instand zu setzende Leitungen handelt (380-kV-Freileitungen, Flußkreuzungen oder Leitungen in windintensiven Regionen). Eine überschlägige Ermittlung der Schwingungsgefährdung der verschiedenen Leitungen zur Auswahl der zur Messung vorzuziehenden Leitungen ist sinnvoll; eine Methode dafür wird in [6] erläutert.

Vorteile bieten Messungen auch bei der Verwendung höherer wirtschaftlicher Seilzugspannungen in Zusammenhang mit der Entwicklung von Kompaktfreileitungen.

Gemessen werden die dynamische Biegeamplitude  $Y_b$  und die zugehörigen Lastwechsel  $n$ . Damit ermittelt man die kumulierte Belastungshäufigkeit, das Lastkollektiv, wie es in [3; 20; 25] und im Abschnitt Versuchsergebnisse an Beispielen erläutert wird. Dieses Lastkollektiv gibt die zu jeder vorkommenden Beanspruchung  $\sigma_B$  zugehörige Anzahl der gemessenen Lastwechsel  $n$  an und ist die Voraussetzung für die Ermittlung der Betriebsfestigkeit bzw. der Lebensdauer des untersuchten Bauteils.

### 4 Betriebsfestigkeit der Seile

Die Bedeutung widerregter Seilschwingungen und der dadurch bewirkten Ermüdung der Einzeldrähte für deren Lebensdauer ist heute, wie auch schon vor 50 Jahren [22; 23; 24], unbestritten. Die Anzahl der Schwingungen ist, wie bei allen Dauerfestigkeitsproblemen, neben der Schwingungsbeanspruchung eine wichtige Größe, die das Lastkollektiv mitbestimmt. Man vergleicht die Anzahl der gemessenen Schwingungen  $n$  mit den Bruch-Schwingungs-Zahlen  $N$  der Woehler-Kurve, auch  $S-N$ -Kurve genannt, bei jeweils gleicher Beanspruchung  $\sigma_B$  und errechnet daraus aufgrund einer linearen Schadensakkumulation

mit Hilfe der Miner-Formel [20] die Schädigungsanteile und damit die Lebenserwartung des Bauteils – auch bei regellos verteilten Beanspruchungsamplituden. Für die Freileitungsseile sind die gleichen Gesetze anwendbar, wie erst kürzlich in den USA und Kanada festgestellt wurde [21; 25; 26]. Die Seile reagieren, wie die Dauerversuche beweisen [3], sehr empfindlich schon auf kleine Beanspruchungserhöhungen [11; 21].

Im Gegensatz dazu wird in [1] dieser Stand der Technik als unbeachtlich dargestellt, da die Miner-Berechnung eine »sensible Reaktion auf unterschiedliche Woehler-Kurven« zeige. Es wird auch mit dem Hinweis auf eine von der Qualität der Klemmen unabhängige in den USA festgelegte Beanspruchungsgrenze suggeriert, daß die Klemmen keinen Einfluß auf die Seilbeanspruchung haben. Dies steht im deutlichen Widerspruch zu gerade durchgeführten Versuchen in den USA, z. B. von Ramey [21; 26]. Den Einfluß von Klemmen auf die Schwingungsfestigkeit von Seilen haben schon früher deutsche Forscher festgestellt [27; 28].

Eine zulässige Beanspruchungsgrenze in Form einer maximal zulässigen Dehnung von z. B.  $\epsilon = \pm 150 \cdot 10^{-6}$  oder eines entsprechenden zulässigen Biege winkels für alle Klemmentypen als ausreichend anzusehen, wie in [1] vorgeschlagen, entspricht nicht mehr dem Stand der Technik, auch nicht in den USA. Diese Grenze ist von der IEEE in den USA ursprünglich empfohlen worden, nicht von der Cigre wie gelegentlich irrtümlich angegeben wird [1; 11; 32].

Eine Dehnung von  $\epsilon = \pm 150 \cdot 10^{-6}$  in der Außenlage von Aluminiumdrähten entspricht einer Wechselbiegebeanspruchung  $\sigma_{Bmax}$  von nur rd.  $\pm 10$  N/mm<sup>2</sup>. Als Grenze wird wahlweise auch die Empfehlung von Dämpferlieferanten aus den USA genannt, nämlich eine Biegeamplitude  $Y_b < \pm 0,25$  mm, die wohl den Verkauf von Schwingungsdämpfern anregen soll.  $Y_b = 0,25$  mm entspricht bei einem mittleren Poffenberger-Swart-Faktor von 32 einer sehr niedrigen Beanspruchung  $\sigma_{Bmax}$  von nur  $\pm 8$  N/mm<sup>2</sup>. Ferner wird als weitere Möglichkeit eine Grenze nach Rawlins von  $\sigma_{Bmax} = \pm 22$  N/mm<sup>2</sup> genannt.

Diese so unterschiedlichen Grenzbeanspruchungen zeigen ebenfalls die Unzulänglichkeit einer Lebensdauervorhersage ohne Berücksichtigung der Lastwechsel.

Bei jedem der genannten konstanten, von der Anzahl der Lastwechsel unabhängigen Grenzwerte müßte das akkumulierte Lastkollektiv stets unter den Beanspruchungen liegen. Das ist weder unter dem Standpunkt der Sicherheit noch unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit vertretbar. Höhere Werte für  $\sigma_{Bmax}$  sind nicht gefährlich, wenn die ihnen zugeordneten Lastspielzahlen  $n$  klein sind und einen nur geringen Schädigungsanteil – gemäß der Miner-Rechnung – zur Folge haben. Dies beweisen die im Abschnitt Meßergebnisse erläuterten Untersuchungen.

Weitere Meßergebnisse wurden veröffentlicht [3; 6] und bestätigen eine gute Übereinstimmung von Berechnung und Betriebserfahrung. Das vor Augen kann man eine zulässige Biegewechselbeanspruchung von z. B.  $\sigma_{Bmax} = \pm 10 \text{ N/mm}^2$  ( $\Delta \varepsilon = \pm 150 \cdot 10^{-6}$ ) nicht gut heißen, sondern sollte den heute anerkannten Weg bei der Ermittlung der Lebensdauer einschlagen [2; 3; 5; 6].

Der Hinweis in [1], die von der Cigre veröffentlichten »Safe Border Line« erlaube es nicht, einen »Dauerfestigkeitswert« abzuschätzen, geht an der Sache vorbei, denn es gibt bei Freileitungsseilen keine solche Grenze. Der Ermüdungsvorgang im Leiterseil ist durch die Wirksamkeit einer zusätzlichen Reibkorrosion (fretting-corrosion) zwischen den Drähten gekennzeichnet. Dadurch wird die Schwingungsfestigkeit des Seiles drastisch – im Vergleich zum Einzeldraht – herabgesetzt. Die Woehler-Kurve hat auch noch bei sehr hohen aber praxisnahen  $N$ -Werten eine fallende Tendenz, wie es für Aluminium ganz allgemein gilt. Selbst Stahlseile zeigen bei Korrosion, z. B. in Finnland, gleiches Verhalten.

Eine neue im Auftrag der zentralen Forschungsanstalt amerikanischer Energieversorgungsunternehmen Epri, durchgeführte Untersuchung [21] ermittelt die Lebensdauer schwingend beanspruchter Seile mit der Miner-Formel, wie von der Cigre vorgeschlagen. Darin wird auch von großen Unterschieden zwischen den theoretisch berechneten Seilbeanspruchungen und den gemessenen berichtet. Eine weitere Anwendung fand diese Methode durch in- und ausländische Unternehmen. Bei neuen Ausschreibungen in Saudi Arabien ist der Nachweis einer ausreichenden Lebensdauer, ermittelt gemäß der genannten Cigre-Methode, vorgeschrieben. In Brasilien wird die Cigre-Methode bei der Untersuchung von Seilschäden angewandt, ebenso bereits in Pakistan, China und Thailand. In der Schweiz, der Bundesrepublik Deutschland und Jugoslawien werden mit den neuen Gerä-

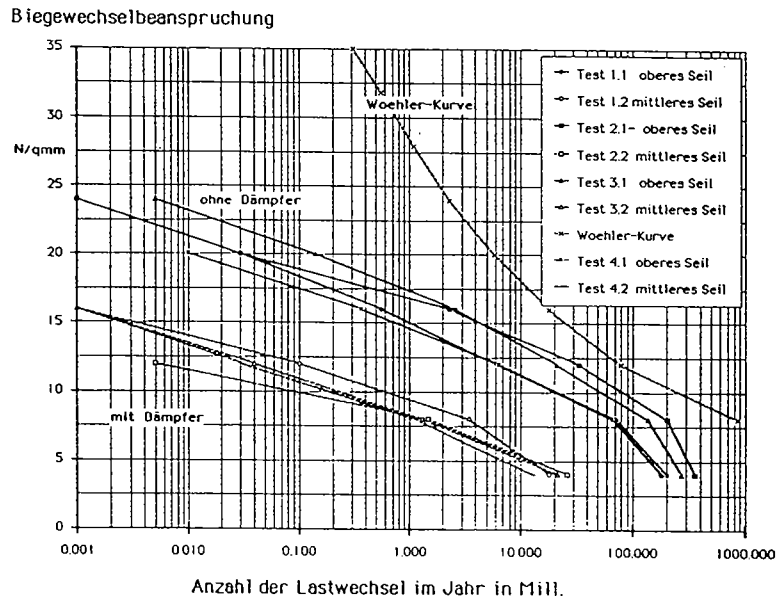


Bild 1. Lastkollektive der Seile – Einfluß von Schwingungsdämpfer

ten systematische Messungen vorgenommen und mit der Cigre-Methode ausgewertet.

Empfehlungen zur Durchführung von Dauerfestigkeitsversuchen zur Bestimmung einer Woehler-Linie wurden ebenfalls von der Cigre CSC22-04 veröffentlicht [29]. Versuche mit Lastspielzahlen  $N$  von  $10^8$  bis  $10^{10}$  wären zur genauen Bestimmung dieser Verhältnisse nützlich. Aus Kostengründen ist die Anzahl dieser Versuche nur beschränkt möglich. Es ist in solchen Fällen sinnvoll diesen Bereich der Woehler-Linien abzuschätzen [3]. So geht heute die Betriebsfestigkeit auch im Maschinenbau den konservativen Weg, bei höheren Lastwechselzahlen Dimensionierungen mit einem angenäherten Verlauf der Woehler-Kurve vorzunehmen.

In der DIN-VDE 0212 Teil 51 1986 werden bedauerlicherweise die Empfehlungen des Cigre-Studien-Komitee No. 22 zur Durchführung von Dauerfestigkeitsversuchen [29] nicht genannt, dagegen ein Entwurf der Arbeitsgruppe 01 dieses Komitee, der bis heute noch nicht offiziell verabschiedet wurde

## 5 Meßergebnisse

Messungen der akkumulierten Belastungshäufigkeit, der Lastkollektive, geben Aufschluß über das Verhalten der Freileitungsseile bei winderregten Seil-schwingungen und erlauben die Bestimmung der Lebenserwartung, einige Beispiele hierzu:

### 5.1 132-kV-Leitung in Westafrika AL/ST Seil 200/12; EDS 22%

Bei einer 1-systemigen 132-kV-Leitung eines zentralafrikanischen Landes wurden bei der Leitungsabnahme Schwingungsuntersuchungen gemäß Cigre verlangt. Die verwendeten Seile, AL/ST 200/12 (ACSR Chickadee) Seildurchmesser 18,9 mm, waren mit einer mittleren Zugspannung  $\sigma$  von  $48 \text{ N/mm}^2$  (EDS = 22%) gespannt. In Bild 1 sind die durch mehrmonatige Meßreihen gewonnenen Lastkollektive für ein Jahr aufgetragen, ebenso die Woehler-Kurve, die die Anzahl der Bruchlastwechsel angibt.

In Tafel 1 werden die Versuchsdaten und die wichtigsten Werte der Lastkollektive von Bild 1 angegeben.

Die oberen Seile, aus Versuchsgründen, ohne Schwingungsdämpfer ausgerüstet, sind mit  $\sigma_{Bmax} \approx \pm 24 \text{ N/mm}^2$  und Frequenzen, von 2 bis 70 Hz, sowie mit rd.  $250 \cdot 10^6$  Lastwechsel/a, dynamisch hoch beansprucht, was eine Lebensdauer von nur drei Jahren zuläßt [Test 1.1; 2.1; 3.1; 4.1].

Die mittleren mit Dämpfer ausgerüsteten Seile werden mit  $\sigma_{Bmax} \approx \pm 15 \text{ N/mm}^2$  und mit Lastwechsel von  $n \approx 22 \cdot 10^6$ , beansprucht, die zugehörige Lebenserwartung liegt bei 400 Jahren, obwohl die in [1] genannte Grenze von  $\sigma_{Bmax} \pm 10 \text{ N/mm}^2$  um 50% überschritten ist [Test 1.2; 2.2; 3.2; 4.1].

Tafel 1. Zusammenfassung der wichtigsten Meß-Daten und -Ergebnisse einer 132-kV-Leitung in Zentral-Afrika

Ort der Messungen	Spannweite (m)	Mast	631-632	184-185	377-378	493-494
Dauer der Messungen, gesamt		1987	3.6.-16.6.	4.7.-12.7.	14.7.-21.7.	23.7.-28.7
Betriebszeit der Meßgeräte	(h)		3.45	2.11	1.92	1.38
Dauer des Windes im Jahr	Test (h)		1.1.-1.4.	2.1.-2.4.	3.1.-3.4.	4.1.-4.4.
mittlere Windgeschwindigkeit	(m/s)		3100	5500	4200	3350
			2.3	1.8	2.1	1.8
Seillage <sup>1)</sup>						
Frequenzbereich	(Hz)	oben	2 - 70	2 - 70	2 - 48	2 - 70
		mitte	2 - 28	2 - 28	4 - 25	2 - 25
		unten		2 - 23	2 - 18	2 - 13
dominierende Frequenz	(Hz)	oben	8 und 28	13 bis 28	13 und 28	13 und 25
		mitte	8	8	8	15
		unten		8	8	8
dynamische Biegespannung maximal (N/mm <sup>2</sup> )		oben	22	23,5	25	22
		mitte	16	12,5	16	16
		unten		12,5	12,5	16
Lastwechsel gemessen kummuliert, Mio/Jahr		oben	180	360	275	205
		mitte	17,8	26,2	21,5	12,5
		unten		11,3	11,8	11,9
Lebensdauer in Jahren <sup>2)</sup>		oben	5,6	1,4	1,9	5,6
		mitte	180	450	420	540
		unten		685	370	160

1) Die oberen Seile hatten aus Versuchsgründen keinen Schwingungsschutz, die mittleren und unteren Stockbridge-Dämpfer  
 2) Bei der Lebensdauerberechnung wurde die von dem Cigre SC 22/WG 04 empfohlene Woehler-Kurve zu Grunde gelegt

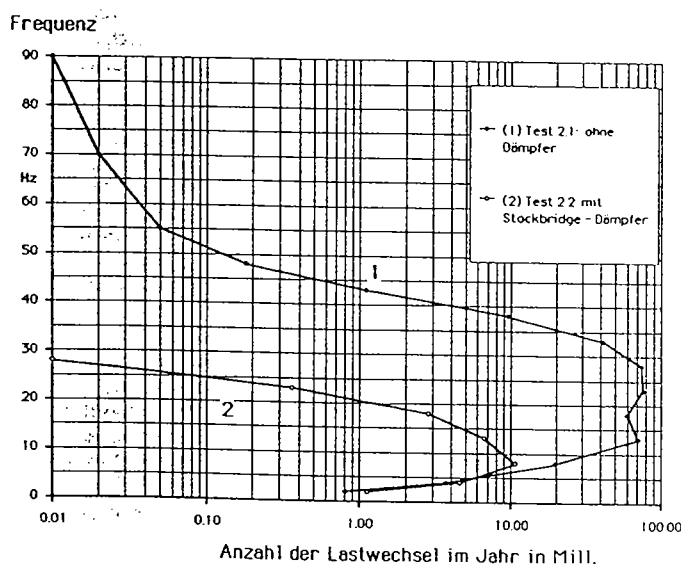


Bild 2. Frequenzverhalten eines ALST-Seiles 200/I12 mit und ohne Stockbridge-Dämpfer

Die Biegebeanspruchung des mittleren Seils liegt bei 70%, die Anzahl der Lastwechsel bei nur 9% der Werte des oberen Seiles, wodurch eine hohe Steigerung der Lebenserwartung von 3 auf 400 Jahre möglich wurde. Hier zeigt sich deutlich der Einfluß der Anzahl der Lastwechsel auf die Lebensdauer. Dies erklärt auch den aus Betriebsstatistiken erkennbaren dominierenden Einfluß von Wind- und Geländeeinflüssen auf die Seilschäden.

Die unteren Seile, ebenfalls mit Dämpfer versehen werden etwa gleich beansprucht wie die mittleren Seile.

Das Frequenzverhalten des Seiles mit und ohne Schwingungsdämpfer in Bild 2 verdeutlicht die gute Auswahl des Dämpfers und seiner Position an die gegebenen Verhältnisse.

Die Messungen wurden jeweils an den Hängeklammern der drei Phasenseile des Mastes simultan durchgeführt und an vier Masten in gleicher Weise. Die Meßzeit betrug jeweils rd. neun Tage, zu kurz, um eine repräsentative Aussage für die mittleren Jahresbelastungen zu erhalten, aber ausreichend für die Bestimmung der Relationen zwischen den Seilen mit unterschiedlichen Armaturen. Zur Berechnung der Lebensdauer wurde die von Cigre CSC 22/WG 04 empfohlene konservative Woehler-Kurve benutzt. Die durchgeführten Windmessungen ergaben eine Dauer des Windes von über 3000 h/Jahr.

## 5.2 132-kV-Leitung Zentralafrika Aldrey-Seil 228 mm<sup>2</sup>; EDS 18%

An einer nach 6 Betriebsjahren bereits teilgeschädigten 132-kV-Freileitung wurden Messungen durchgeführt. In Bild 3 sind die Lastkollektive der Seile mit ver-

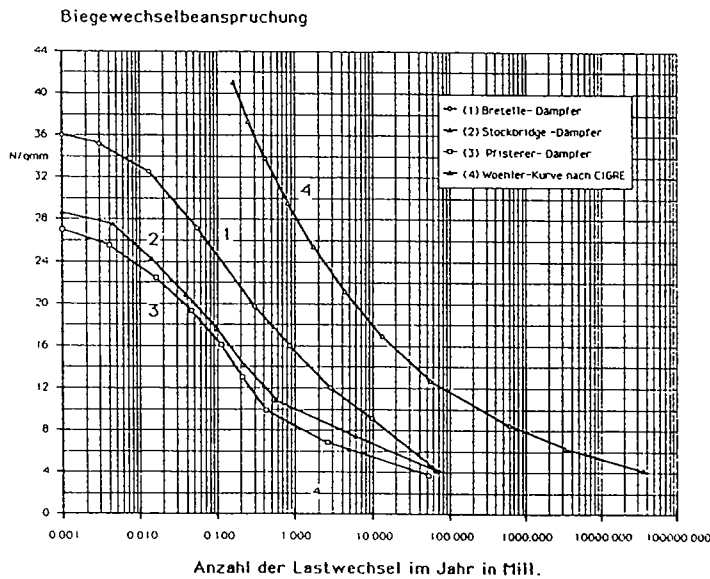


Bild 3. 132-kV-Freileitung Arnou-Araren/Arlit; Schwingungsverhalten von drei Dämpfersystemen; Lastkollektive

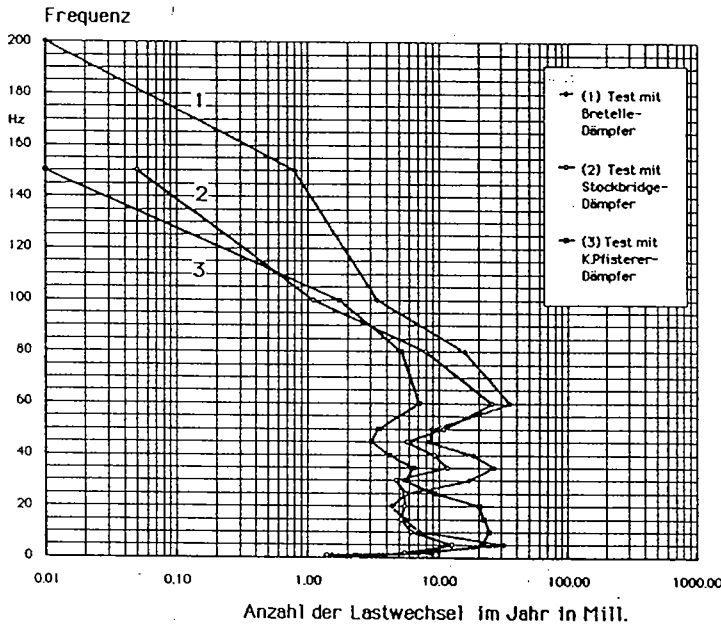


Bild 4. Frequenzverhalten des Aldrey-Seiles 228 mm<sup>2</sup>, EDS 51 N/mm, bei verschiedenen Dämpfern

schiedenen Dämpferanordnungen aufgetragen. Ein Aldrey-Seil 228 mm<sup>2</sup>, mit einer EDS-Zugspannung  $\sigma$  von 51 N/mm<sup>2</sup> (= 18% EDS), geschützt mit Bretelle-

Dämpfern, genügte nicht den durch Windkonstanz und flachem unbewachsenem Gelände bedingten hohen Beanspruchungen von  $\sigma_{Bmax} = \pm 36$  N/mm<sup>2</sup> und 10<sup>9</sup> Lastwechsel je Jahr (Kurve 1 in Bild 3). Die zugehörige nach der Cigre-Methode berechnete Lebensdauer beträgt sechs Jahre, in Übereinstimmung mit der Betriebserfahrung. Als Woehler-Kurve wurde die etwas über der von der Cigre empfohlenen »Safe Border Line« liegende Kurve 4 in Bild 3 zugrunde gelegt.

Ergebnisse von simultan durchgeführten Versuchen mit zwei anderen Dämpfertypen sind in den Kurven 2 und 3 dargestellt. Sie zeigen beide hohe Beanspruchungen von  $\sigma_{Bmax} = \pm 27$  bis  $\pm 29$  N/mm<sup>2</sup>, bei einer etwa gleichen Anzahl von Lastwechseln in Höhe von 10<sup>9</sup> je Jahr. Die maximalen Beanspruchungen liegen deutlich über  $\sigma_{Bmax} = \pm 10$  N/mm<sup>2</sup>, der in [1] empfohlenen Grenze einer Dehnamplitude von  $\epsilon = \pm 150 \cdot 10^{-6}$ . Trotzdem ist eine relativ hohe wenn auch nicht ausreichende Lebensdauer von rd. 40 Jahren bei den Lastkollektiven 2 und 3 gegeben. Die Versuchszeiten betragen im Mittel zwei Monate, ausreichend repräsentativ für die Bestimmung der Lebenserwartung.

In Bild 4 sind die Schwingungszahlen je Jahr für die verschiedenen Frequenzen aufgetragen. Überraschend oft sind sehr hohe Schwingungsfrequenzen bis zu 200 Hz aufgetreten. Der Grund hierzu können nur das leichte hochgespannte Aldrey-Seil und die örtlichen Windverhältnisse sein. Im Frequenzbereich von 0 bis > 60 Hz liegen die Schwingungszahlen der drei Dämpfer nahe zusammen. Bei höheren Frequenzen zeigt der Bretelle-Dämpfer Schwächen, wie auch der Stockbridge-Dämpfer gegenüber dem Pfisterer-Dämpfer im Bereich von 35 bis > 80 Hz.

### 5.3 Versuchsanlage in der Bundesrepublik Deutschland, Zweier-Bündel horizontal, AL/ST 240/40; EDS 26 %

Messungen des Verhaltens von Zweier-Bündel-Abstandhalter – horizontal – zeigen einen bedeutenden schwingungsverringernenden Einfluß der untersuchten Abstandhaltern mit Dämpfungselementen. In Bild 5 sind die Lastkollektive, für ein Jahr von normalen (Kurve 2) und von Abstandhaltern mit Dämpfungselementen (Kurve 1) aufgetragen; Kurve 3 ist die Woehler-Kurve nach Cigre, die die Anzahl der Bruchlastwechsel angibt, d. h. nicht für ein Jahr gilt. Die Abstandhalter mit Dämpfungselementen erhöhen die Lebensdauer von 30 auf 400 Jahre gegenüber normalen Abstandhaltern. Diese als »völlig unwirtschaftlich« zu bezeichnen [31], mit der Begründung Schwingungsdämpfer an den Hängeklemmen seien ausreichend, ist so allgemein nicht zutreffend.