

Schwingungsmessungen an Freileitungsseilen

K.O. Papailiou

Angeregt durch das bestehende Interesse der Fachwelt an Seilschwingungen und durch neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Schwingungsrekorder und der Datenanalyse wird im folgenden Beitrag ein Lösungskonzept für Schwingungsmessungen an Freileitungsseilen beschrieben.

Les oscillations de câbles de lignes aériennes rencontrent un grand intérêt. De nouveaux développements dans le domaine des enregistreurs ainsi qu'en analyse des données ont conduit à un système de mesure de ces oscillations qui est décrit dans cet article.

1. Einführung

Ein grosser Teil der elektrischen Energieübertragung erfolgt über Freileitungen. Dabei sind die Leiterseile die aktiven Energieträger, da für den Transport der elektrischen Energie einzig verantwortlich. Bei Hochspannungsleitungen gehören sie zudem zu den teuersten Komponenten der Anlagen.

Wie jedes andere Bauteil unterliegen diese Seile diversen Alterungsvorgängen. Die durch windangeregte Schwingungen verursachten Materialermüdungserscheinungen an den Seildrähten, die in Extremfällen zu Draht- und Seilbrüchen führen können, spielen dabei eine entscheidende Rolle.

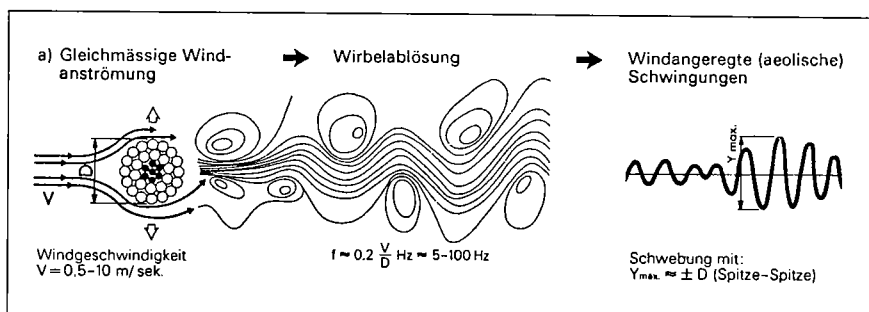
Solche Vorgänge zeigen meistens erst nach längeren Zeiträumen (Jahre bzw. Jahrzehnte) ihre negativen Wirkungen. Andererseits haben in den Industrieländern von Mitteleuropa, so auch in der Schweiz, viele Freileitungen ein Alter von 20-40 Jahren erreicht und können somit derartige Alterungserscheinungen aufweisen. Da der Bau von neuen Leitungen heutzutage durch diverse Umweltschutzaufgaben erschwert wird, wird die Frage nach dem tatsächlichen «Substanzwert» von bestehenden Leitungen bezüglich ihrer Betriebssicherheit aktueller denn je gestellt und über die eventuell erforderlichen Erneuerungsmass-

nahmen nachgedacht. Auch ist es oftmals von Interesse, bestehende Freileitungstrassen bzw. Mastgestänge zu verwenden und die Stromtragfähigkeit durch Verwendung von grösseren Seilen zu erhöhen, was wiederum zur Einhaltung der Mindestbodenabstände eine höhere mechanische Seilspannung erforderlich macht. Alle diese Fragen sind eng mit der Schwingfestigkeit der Seile verknüpft. Im folgenden wird eine Übersicht zum heutigen Stand der Technik für solche grundlegende Untersuchungen gegeben. Der interessierte Leser findet Details in [1; 2].

2. Das Problem

Für die Alterung von Freileitungsseilen sind die unvermeidbaren windangeregten Schwingungen verantwortlich, deren Entstehung und Wirkungsweise in Figur 1 schematisch dargestellt ist. Für diese Alterung ist die Materialermüdung der einzelnen Seildrähte durch Reibkorrosion verantwortlich (engl. «fretting fatigue»). Dabei wird durch mikroskopische gegenseitige Bewegung der Seildrähte Reibung an den Kontaktflächen zwischen den Drahtlagen erzeugt, unter gleichzeitiger Oxydation des Drahtmaterials (Aluminium oder Aldrey).

Dazu kommt eine Überlagerung von mehreren makroskopischen Span-



Figur 1 Mechanismus der Seilschwingungen

Der Aufsatz ist Herrn Dr. Ing. Walter F. Bückner, D-7068 Urbach, zu seinem 65. Geburtstag gewidmet.

Adresse des Autors

Dipl.-Ing. Konstantin O. Papailiou, Direktor der Sefag AG, Elektrotechnische Spezialartikel, Werkstrasse 7, 6102 Malters.



Figur 2 «Fretting»-Marken und Bruchstellen im Seil

nungskomponenten an den Aufhängepunkten der Seile. Das sind verhältnismässig hohe statische Zug-, Radial- und Biegespannungen sowie relativ kleine dynamische Biegewechselspannungen, die allerdings eine beachtliche Häufigkeit (bis zu 10^8 Lastspiele pro Jahr) erreichen könnten.

Die Zusammenwirkung beider Effekte führt letztlich zu Aderbrüchen und Beschädigungen in der Nähe der Berührungspunkte des Seiles mit den Armaturen (Fig. 2).

3. Die EDS-Regel

Die Bemessung von Freileitungsseilen im Hinblick auf Schwingungsfestigkeit basiert heute noch recht oft auf einer, von der CIGRE (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques) aufgestellten sog. «EDS-Regel» (EDS = every day stress). Dabei wird je nach Seilmaterial ein oberer Grenzwert für die statische Seilzugspannung bei der mittleren Jahrestemperatur empfohlen; man spricht in diesem Fall von der Mittelzugspannung.

Leider hat die Einhaltung dieser einfachen anwendbaren Regel in den letzten Jahren vermehrt zu Schwingungsproblemen und -schäden geführt, insbesondere dort, wo neuere Seilkonstruktionen und/oder -materialien angewendet worden sind. Theoretische Überlegungen, um das Problem analytisch zu lösen, stossen schnell an unüberwindbare Grenzen, denn man muss sich dazu zum Teil recht grober Näherungen bedienen, die das Rechenmodell zu weit von der Realität entfernen [6]. Die wesentlichen Merkmale des schwingenden Freileitungsseiles in einem Abspannabschnitt sind nämlich:

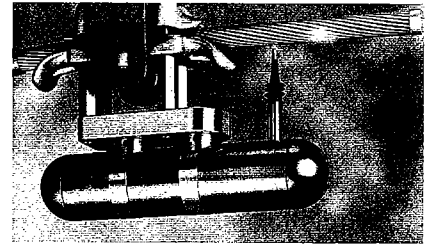
- relativ grosse Systemlänge über wechselndem Gelände
- stochastische Windanregung
- grosse nicht-lineare statische und dynamische Verschiebungen

- Wechselwirkung von mehreren Spannungsfeldern
- Einfluss von anderen Leitungskomponenten mit stark unterschiedlichen Steifigkeitsmerkmalen (Isolatoren, Masten, Fundamente)
- plastisches Materialverhalten an den Berührungsstellen der Seile mit den Armaturen durch Klemmeinflüsse und/oder zu starke Krümmung
- nicht-lineare Lastumlagerung durch Kriechen und Temperatureinflüsse (im Falle von Al/St-Seilen)
- grosser Einfluss der schwierig zu erfassenden Seileigendämpfung

Es leuchtet somit ein, dass man eine Freileitung, welche doch ein recht kompliziertes, dynamisch beanspruchtes System darstellt, nicht durch die Vorgabe eines einzelnen Parameters, namentlich der Mittelzugspannung, auf Schwingungssicherheit dimensionieren kann. Oft tendiert man dann aus Überlegungen der Betriebssicherheit zu eher konservativen Mittelzugspannungswerten, die wiederum die Wirtschaftlichkeit der Leitung beeinträchtigen könnten.

4. Die CIGRE-WG-04-Methode

Aus diesen Gründen hat sich bei den Fachleuten schon seit den 60er Jahren in verschiedenen Ländern die Erkenntnis durchgesetzt, dass nur durch Feldmessungen an echten Freileitungen bzw. an Testleitungen eine realitätsnahe Erfassung des Schwingungsproblems möglich ist. Dies hat zu einer IEEE-Vorschrift für solche Messungen [3] geführt, die international weitgehend befolgt wird. Die dazu erforderlichen Schwingungsrekorder der

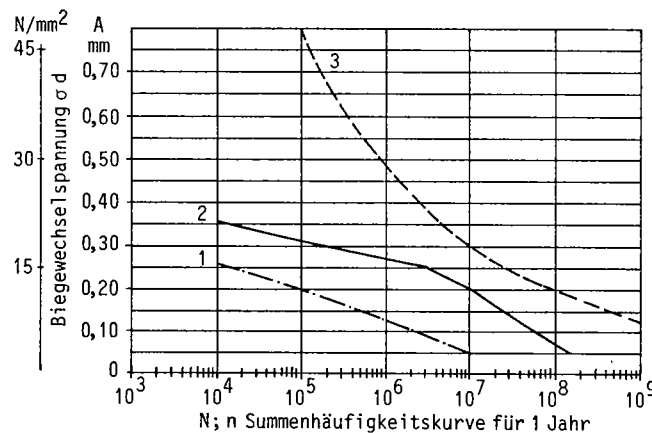


Figur 3 Moderner Seilschwingungsrekorder Sefag VIBREC 100

neuen Generation (Fig. 3) bieten dank dem Einsatz moderner Mikroelektronik beachtliche Möglichkeiten bezüglich Datenerfassung, -klassifikation und -auswertung.

Die CIGRE hat diese Problematik durch eine eigene Arbeitsgruppe, die Arbeitsgruppe SC 22-04, weiterverfolgt und hat dazu Empfehlungen sowohl für die Abschätzung der Lebensdauer von Freileitungsseilen [4] als auch für weiterführende Laborschwingungsversuche [5] herausgegeben. Das Kernstück dieser Empfehlungen ist die Ermittlung durch Messungen an einer Freileitung mit einem Schwingungsrekorder des Häufigkeitskollektivs (engl. «accumulated stress curve») der durch den Wind verursachten dynamischen Seilbeanspruchungen; dies ist ein besonders aussagekräftiges Mass für die Schwingungsintensität und die Schwingungsgefährdung der untersuchten Leitung bzw. des untersuchten Seiles.

Die Kurve in Figur 4 stellt die Anzahl der Lastwechsel dar, die jeweils ein bestimmtes Beanspruchungsniveau (Seilbiegewechselsdehnung am Klemmenrand) übersteigen, und wird auch in anderen Gebieten der Mate-



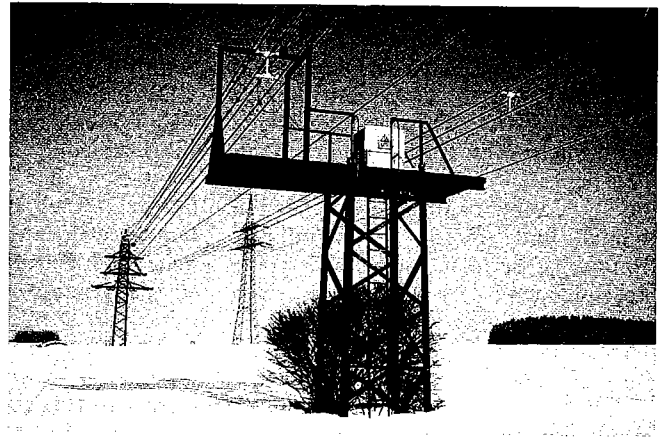
Figur 4 Typische Häufigkeitskollektive

- 1 Lastkollektiv (n), Horizontal-Bündelleiter mit KP-AV-Abstandhalter (Spacer-Damper)
 - 2 Lastkollektiv (n), Horizontal-Bündelleiter mit normalem Abstandhalter
 - 3 Sicherheitsgrenzkurve= Wöhler-Kurve (N)
- A Biegewechselamplitude σ -s

rialforschung, wie z.B. im Flugzeugbau, oft verwendet. Sie erlaubt «mit einem Blick» eine gute Beurteilung des Schwingungsverhaltens des Seiles. Ihre Auswertung und Interpretation ermöglicht es, den Einfluss folgender Parameter auf das schwingende Gesamtsystem zu ermitteln:

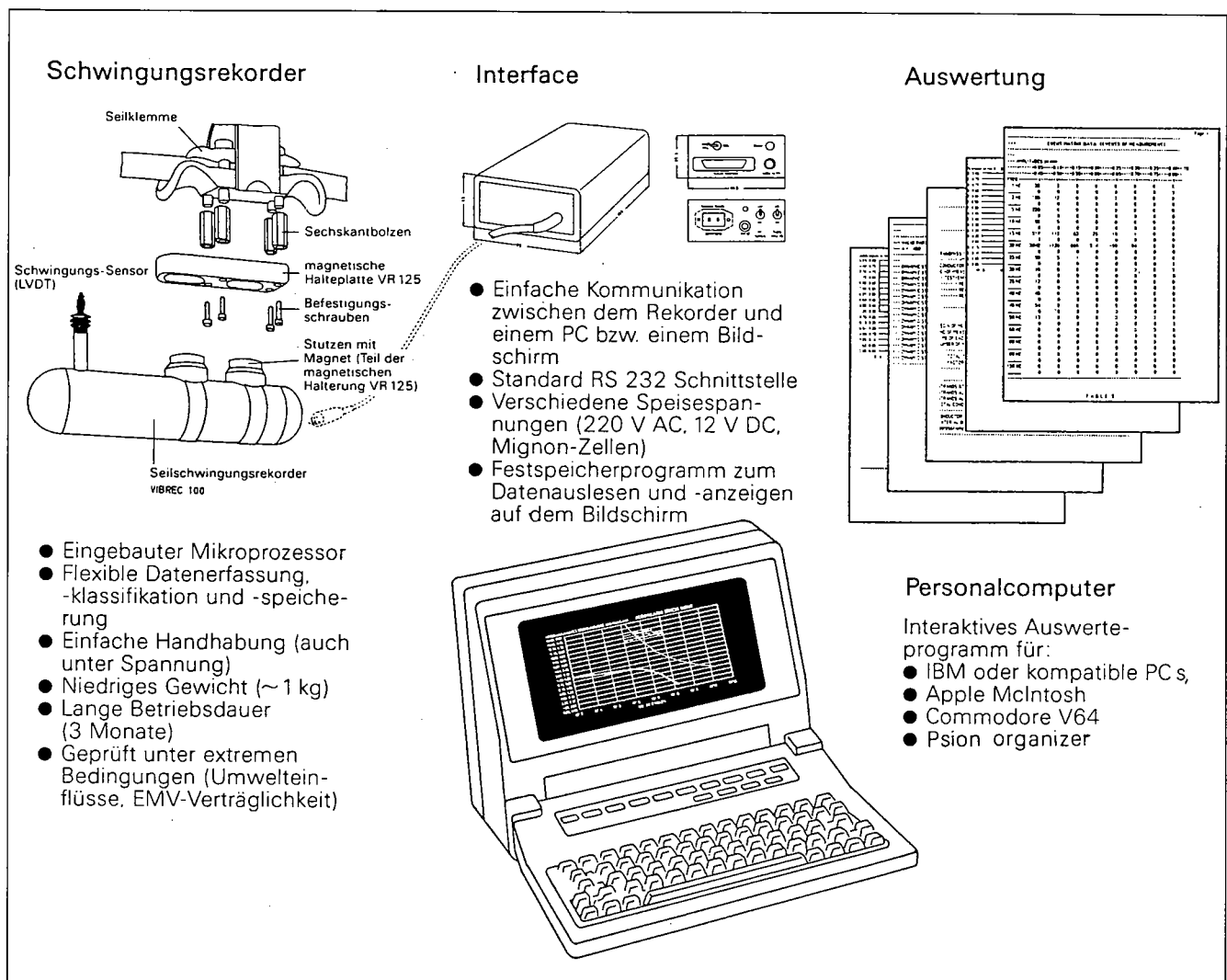
- die tatsächliche Seilzugspannung
- die Seilmaterialeigenschaften / -verhalten
- die Seileigendämpfung
- den Einfluss der externen Dämpfer (falls vorhanden)
- den Einfluss der Armaturen
- den Einfluss der Isolatoren, Masten, Fundamente
- die Wechselwirkung mit Nachbarspannfeldern
- den Einfluss des Geländes auf die Windeingangsenergie (besonders wichtig)

Figur 5
Testfreileitung



Aus Figur 4 ist beim Vergleich der Kurven 1 und 2 beispielsweise die schwingungsdämpfende Wirkung von AV-(Antivibrations-)Abstandhaltern

auf ein Zweierbündel ersichtlich, gegenüber einem Bündel mit normalen Abstandhaltern und Stockbridedämpfern. Dies konnte durch gleich-



Figur 6 Messsystem zur Schwingungsanalyse

zeitige Messungen an einer Testleitung festgestellt werden, die dank ihrer besonderen geographischen Lage und Windverhältnisse eine relativ kurze Testzeit erlaubt (Fig. 5). Im übrigen sind solche Testleitungen ein unentbehrliches Hilfsmittel, um realitätsnahe Schwingungsuntersuchungen schnell und effektiv durchzuführen. Einerseits braucht man dazu keine kostspieligen Abschaltungen, wie sonst bei Leitungen im Betrieb, und andererseits kann man auf langjährige Testerfahrung und eine Fülle von Vergleichsmessungen bei bekannten Windverhältnissen zurückgreifen.

5. Modernes Messsystem

Figur 6 zeigt schematisch eine dem heutigen Stand der Technik entsprechende Lösung für Schwingungsuntersuchungen. Typische Merkmale der verwendeten Hard- und Software sind stichwortartig angegeben. Die modernen Seilschwingungsrekorder bieten den für die Planung und den Betrieb von Freileitungen zuständigen Ingenieuren die Möglichkeit, aufbauend auf internationalen Empfehlungen und Normen (CIGRE, IEEE) zuverlässige Voraussagen bezüglich des Schwingungsverhaltens der Seile und der verwendeten Armaturen (Klem-

men, Dämpfer, Abstandhalter, Verbinder usw.) zu machen. Bedienerfreundliche, anwenderorientierte EDV-Programme für handelsübliche PCs ermöglichen zusätzlich eine ausführliche und aussagefähige Dokumentation der Messergebnisse mit Grafik. Durch den günstigen Gestehtungspreis der Rekorder ergeben sich neue Überlegungen von gleichzeitigen Vergleichsmessungen an einer Freileitung unter Variation verschiedener Parameter (Seilzugspannung, Dämpfertyp und -anordnung, Klemmenart und -form) und führen zu einer wirtschaftlicheren und betriebssichereren Bemessung von neuen Leitungen bzw. zu Empfehlungen für Wartungs- und Erneuerungsmassnahmen von bestehenden Leitungen.

Grundsätzlich werden die mit den Schwingungsrekordern gewonnenen Messdaten mit Messdaten von anderen Leitungen verglichen, wo Informationen über deren Schwingungsverhalten bekannt sind. Jede neue Schwingungsmessung ergänzt die vorhandene Datenbank und macht eine qualifizierte Analyse der Schwingungsgefährdung bezüglich der verschiedenen Einflussfaktoren zuverlässiger. Durch eine systematische Sammlung von Messkurven (Fig. 4) sollte es möglich sein, eine Schwingungsbelastungskur-

ve für die Leitungen eines Gebietes oder eines Elektrizitätswerkes aufzustellen, was wiederum als Grundlage für die Planung von zukünftigen Freileitungen dienen kann. Diese Aufgabe wird auch erleichtert durch den Erfahrungsaustausch mit anderen Anwendern von weltweit im Einsatz stehenden Schwingungsrekordern, eine Arbeit, die durch die dafür zuständige Arbeitsgruppe der CIGRE weiterhin koordiniert wird.

Literatur

- [1] W. Bückner u.a.: Zur Berechnung der Lebensdauer von Freileitungsseilen aufgrund von Schwingungsmessungen und Ermüdungsversuchen. *Elektrizitätswirtschaft* 84 (1985) 1, S. 24...30.
- [2] W. F. Bückner und K. O. Papailiou: Planung und Betrieb von Freileitungen im Hinblick auf windbedingte Seilschwingungen. *Elektrizitätswirtschaft* 86 (1987) 10, S. 397...492.
- [3] Standardization of conductor vibration measurements. *IEEE Trans. PAS* 85 (1966) 1, p. 10...22.
- [4] Recommandations pour l'évaluation de la longévité des conducteurs de lignes de transport aériennes. *Electra* - (1979) 63, p. 103...145.
- [5] Guide pour les essais d'endurance des conducteurs à l'intérieur des pinces. *Electra* - (1985) 100, p. 77...86.
- [6] L. Möcks: Beanspruchung und Lebensdauer von Leiterseilen unter dem Einfluss wind-erregter Schwingungen. *Elektrizitätswirtschaft* 86 (1987) 21, S. 920...925.

VIBREC™

Das intelligente Schwingungs-Messgerät

- Leistungsfähiger Mikroprozessor
- Flexible Datenerfassung, -klassifikation und -speicherung
- DMS- und LVDT-Sensor
- Einfache Handhabung
- Niedriges Gewicht (≈ 1 kg)
- Lange Betriebsdauer ohne Aufsicht
- Geprüft unter extremen Bedingungen
- Anwenderfreundliche Software auf PC
- Vernünftiges Preis-Leistungs-Verhältnis
- Weltweit hundertfach bewährt

SEFAG AG
 Elektrotechnische Spezialartikel
 Werkstrasse 7
 CH-6102 Malters

Telefon 041-97 19 91/92
 Telefax 866 488 SEFG CH
 Telefax 041-97 34 73