Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 61 (1970)

Heft: 5

Artikel: Schwingungsschäden in Leiterseilen

Autor: Möcks, L.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915920

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Schwingungsschäden in Leiterseilen

Von *L. Möcks*, Schwabach

603-621

621.315.1.056.3

Transversalschwingungen in Leiterseilen führen im Bereich der Tragklemme zur Auflösung des Seilverbandes. Die Seildrähte gleiten aufeinander, und es kommt zur Reiboxydation. Die hierbei entstehenden fretting-Marken bilden unter Wechselbiege- bzw. Wechselzugbeanspruchung den Ausgangspunkt für Dauerbrüche in den Seildrähten. Auf die Ermüdungsfestigkeit des Leiterseiles hat die Reibkorrosion einen ähnlich entscheidenden Einfluss wie die Wechselbiegespannung.

Des oscillations transversales dans les câbles conducteurs ont comme conséquence une désagrégation de la gaine du câble dans la zone de la pince portante. Les fils du câble glissant les uns sur les autres, il en résulte une oxydation de frottement. Les points de frottement sont, sous les efforts alternants de flexion ou les efforts alternants de traction, le point de départ de ruptures définitives dans les fils du câble. La corrosion par frottement a la même influence déterminante sur la résistance de la fatigue du câble conducteur que la tension alternante de flexion.

1. Allgemeines

Die Leiterseile einer Freileitung können vom Wind zu gefährlichen mechanischen Schwingungen angeregt werden [1; 2; 3; 4] [1]). Die auftretenden Wechselbeanspruchungen überlagern sich statischen Beanspruchungen, die am Tragpunkt des Leiterseiles ihr Maximum erreichen [5; 6]. Die Lebensdauer des Leiterseiles ist deshalb eine Funktion der einzelnen mechanischen Seilbeanspruchungen am Tragpunkt [7; 8; 9].

In den letzten Jahren wurde in der Literatur wiederholt der Einfluss der sog. Reibkorrosion auf die Seillebensdauer angedeutet [10; 11]. Im englisch sprechenden Ausland wird die Reibkorrosion oder Reiboxydation als «fretting» bezeichnet. Um dieses Phänomen und seinen Einfluss auf die Lebensdauer besser zu erkennen, wurden Schwingungsversuche mit Al/St.-Leiterseilen und einer Spezialhängeklemme durchgeführt. Bevor diese Versuche beschrieben und ihre Ergebnisse diskutiert werden, sind zu dem Phänomen Reibkorrosion einige informierende Bemerkungen zu machen.

2. Reibkorrosion

Reibkorrosion entsteht dort, wo sich Metallteile unter Druck zyklisch gegeneinander bewegen [12]. Bereits nach wenigen Wechselspielen kommt es zu Oberflächenschäden. Die abgeriebenen Metallpartikelchen oxydieren sofort.

Gleiten Aluminiumteile aufeinander, so bilden die oxydierten Metallteilchen ein feinkörniges schwarzes Pulver. Die Partikelchen sind wesentlich härter als das Grundmetall und wirken wie Schmirgel.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

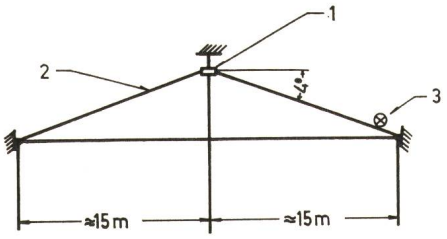

Fig. 1
Seilschwingungsstand
1 Spezialhängeklemme; *2* Al/St.-Seil 240/40 mm²; *3* Schwingungserreger

Reibkorrosion tritt bereits bei sehr kleinen Gleitwegen, etwa in der Grössenordnung der elastischen Dehnung, auf. Das Ausmass der Reibkorrosion wächst mit zunehmendem Relativgleitweg, mit steigendem Anpressdruck, und fällt mit wachsender Frequenz. Werkstoffe von grosser Härte haben wenig Neigung zu Reibkorrosionsschäden.

Wirken Reibkorrosion und Spannungswechsel zusammen, so entsteht ein kräftiger Abfall der Ermüdungsfestigkeit.

3. Schwingungsversuche

In einem Seilschwingungsstand gemäss Fig. 1 wurde das etwa 30 m lange Al/St.-Seil 240/40 mm² an beiden Enden abgespannt und lief in der Mitte unter einem Winkel von

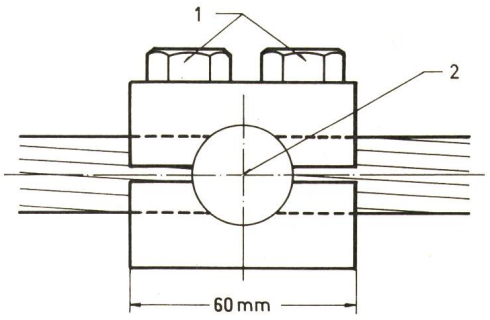

Fig. 2
Spezialhängeklemme
1 Klemmenschrauben M 12, 8,8; *2* Klemmendrehpunkt

4° in eine Spezialhängeklemme. Abweichend von der üblichen Bauart der Hängeklemme hatte die Spezialklemme, wie in Fig. 2 dargestellt, keinen trompetenartig erweiterten Seilauslauf.

Bei einer Seilzugspannung von 5,6 kp/mm² wurde eine Schwingfrequenz von 13 Hz eingestellt. Die Seilamplitude betrug in Bauchmitte ±20 mm. Als Schwingungsform wurde die sog. symmetrische Koppelschwingung eingestellt. Die beweglich gelagerte Hängeklemme verhält sich bei dieser Schwingungsform und Transversalbewegungen wie fest eingespannt. Die symmetrische Koppelschwingung wird in der Praxis vom Wind angeregt und bringt für das Leiterseil die höchste Wechselbeanspruchung.

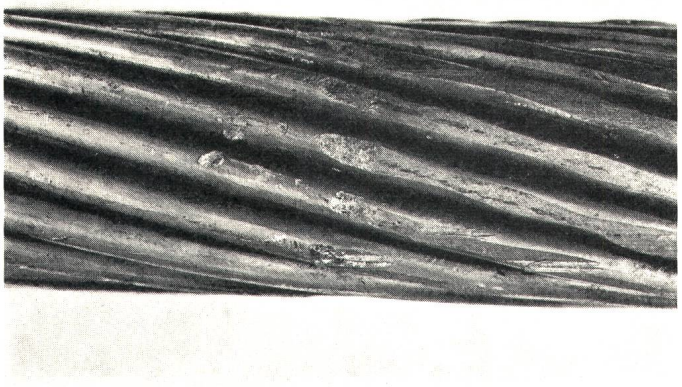

Fig. 3
Seilverformung durch Hängeklemme

Bereits nach kurzer Schwingungszeit wurde zwischen den Seiladern im Bereich der Hängeklemme die allmähliche Anlagerung eines feinen, schwarzen Pulvers beobachtet. Das schliesslich herausrieselnde Pulver wurde zur Kontrolle aufgefangen; es zeigte sich, dass die Menge etwa linear mit der Schwingungszahl wuchs.

Obwohl im Bereich der Hängeklemme in der äusseren Drahtlage keinerlei Drahtbrüche festzustellen waren, wurde der Versuch auf Verdacht gestoppt und das Leiterseil im Bereich der Hängeklemme gründlich untersucht.

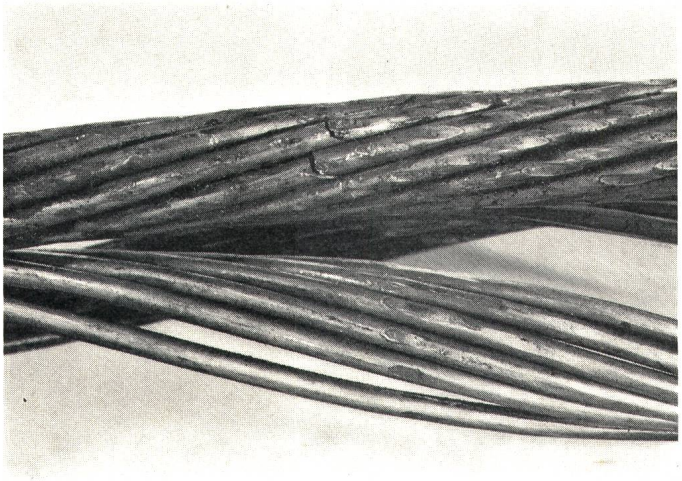

Fig. 4
Schwingungsbrüche

4. Untersuchung des Leiterseiles

Fig. 3 zeigt den von der Hängeklemme befreiten Seilabschnitt. Die rechte Hälfte des Seilstückes zeigt eine deutliche Abflachung der Seildrähte unter Einwirkung der Klemmbacken der Hängeklemme. Die Klemmbacken waren mit 2 Schrauben M 12, 8.8, verspannt. Die Querkraft betrug etwa 6500 kp und wirkte auf eine Klemmlänge von 60 mm.

Der linke Teil der Fig. 3 zeigt das aus der Klemme austretende Leiterseil. Deutlich erkennt man dicht am Klemmeneinlauf kräftige Kerb- oder Quetschstellen an zwei Seildrähten.

In Fig. 4 ist die äussere Drahtlage des Leiterseiles zum Teil abgewickelt. Die Innenlage zeigt etwa 7...9 mm vor der Klemmstelle zwei Aderbrüche. Die ursprüngliche Lage der Klemmstelle ist an den flachgedrückten Drähten der schräg abstehenden Decklage erkennbar. Über der gesamten Oberfläche der inneren Aluminium-Drahtlage ist das Produkt der Reibkorrosion als schwarzes Pulver angelagert.

Fig. 5 zeigt eine Ausschnittsvergrösserung von Fig. 4. Rechts von den Bruchstellen sind die Druckellipsen, erzeugt durch die Klemmenquerkraft, sichtbar. Die Oberfläche der Druckellipsen ist metallisch blank und nahezu frei von Reibspuren. In der Nähe der Drahtbruchstellen sind die Konturen der Druckstellen nur noch ellipsenähnlich. Die Oberfläche ist kraterförmig ausgeworfen und mit Korrosionsprodukten übersät.

Fig. 5
Schwingungsbrüche und Druckellipsen

Fig. 6 zeigt die geöffnete Drahtbruchstelle und die darunter freigewordene Stahlseele.

Die äussere Drahtlage wurde schliesslich im Bereich der Klemmstelle völlig entfernt. Der verbleibende Seilabschnitt wurde gereinigt und zeigte jetzt klar die Verteilung und Grösse der Reibstellen in der Nähe der Klemmstelle (Fig. 7).

Fig. 8 zeigt in etwas vergrösserter Darstellung die Reibstellen seitlich von den Drahtbruchstellen. Das Aussenmass

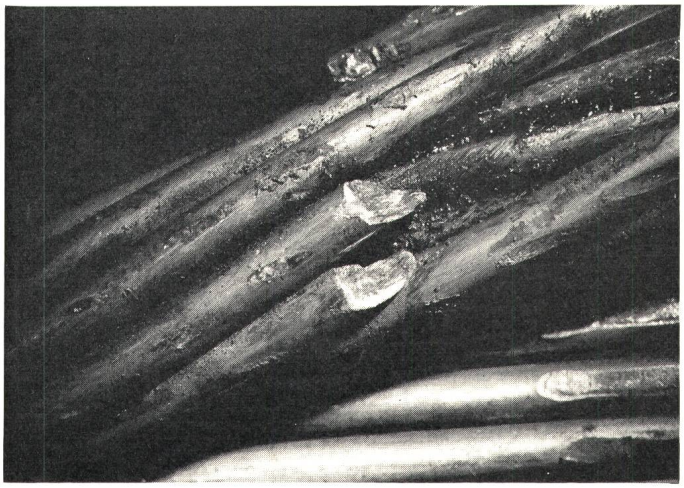

Fig. 6
Schwingungsbrüche und Reibkorrosionsprodukte

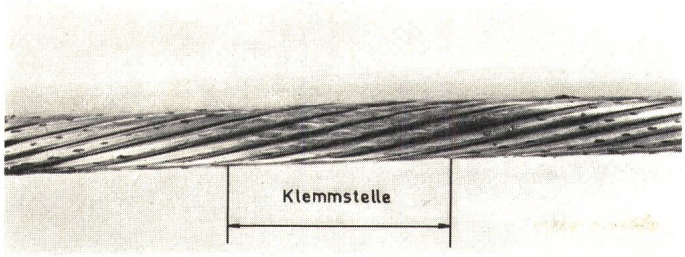

Fig. 7
Klemmstelle
Seilinnenlage

der Reibstellen in Form ihrer Oberflächengrösse wächst von der Klemmstelle ausgehend steil an, um ein Maximum zu durchlaufen und wieder abzufallen.

Fig. 9 zeigt einen Einzeldraht der Aluminium-Innenlage aus der Klemmstelle. Die Druckellipse ist metallisch blank und zeigt im Inneren nur geringe Spuren einer Reibkorrosion.

Fig. 10 zeigt ebenfalls einen Draht der Aluminuim-Innenlage, aber aus dem Seilteil ausserhalb der Klemmstelle. Links ist eine kräftige, typisch ausgebildete Reibkorrosionsstelle zu sehen. Die im rechten Teil des Bildes sichtbare Reibstelle

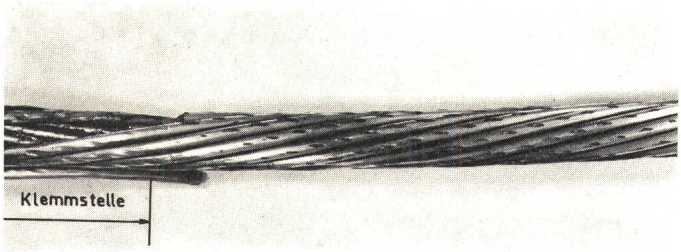

Fig. 8
Verteilung von Reibkorrosionsstellen

ist weniger ausgeprägt und zeigt noch nicht die deutliche Kraterbildung.

Fig. 11 zeigt ein gebrochenes Drahtende und die hier vorhandene Reibkorrosionsstelle.

Die Fig. 12 und 13 zeigen die Oberfläche der Drahtbruchstelle bei unterschiedlicher Ausleuchtung. Werden die gebrochenen Enden aneinandergelegt, so zeigt sich gemäss Fig. 14 eine Neigung der Bruchfläche von etwa 45° zur Drahtachse.

Unter dem Mikroskop wurden die mehr oder weniger zerklüfteten Bruchflächen untersucht und folgendes ermittelt:

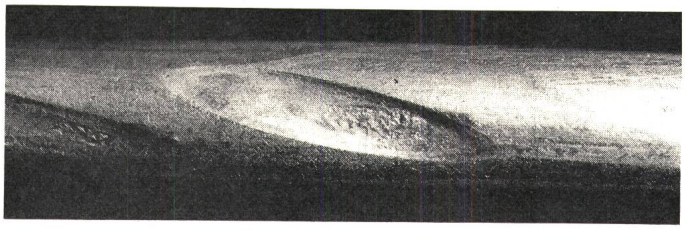

Fig. 9
Druckellipse

Die Brüche sind ausnahmslos Dauerbrüche. Restflächen von Gewaltbrüchen sind kaum festzustellen. Der 45°-Verlauf der Bruchfläche deutet auf die zusätzliche Wirkung von Schub- und Torsionskräften neben der Wechselbiegebeanspruchung hin.

Mit diesen Beobachtungen und Feststellungen ist zwar die Drahtbruchstelle allgemein beschrieben, der eigentliche Einfluss der Reibstelle auf die Lebensdauer des Drahtes aber nicht ausreichend bewiesen. Deshalb wurde durch eine ausgeprägte Reibstelle ein Längsschnitt gelegt und die Tiefenwirkung der zerklüfteten Oberfläche unter dem Mikroskop beobachtet (Fig. 15).

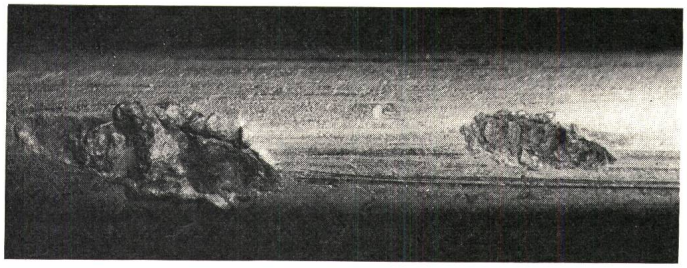

Fig. 10
Reibkorrosionsstellen

Die Ausschnittsvergrösserung aus Fig. 15 zeigt in Fig. 16 Anrißstellen im Draht, wobei links im Bild ein besonders scharfer und tiefer Riss zu erkennen ist. Unter diesen Voraussetzungen leitet schon die niedrige Wechselbeanspruchung den Dauerbruch ein.

5. Folgerungen aus den Versuchsergebnissen

Die anschliessend gezogenen Folgerungen sowie die vorhergehenden Untersuchungen beziehen sich auf eine Reihe von Schwingungsuntersuchungen, wobei das dargestellte Ergebnis stellvertretend für die Summe der Beobachtungen gilt.

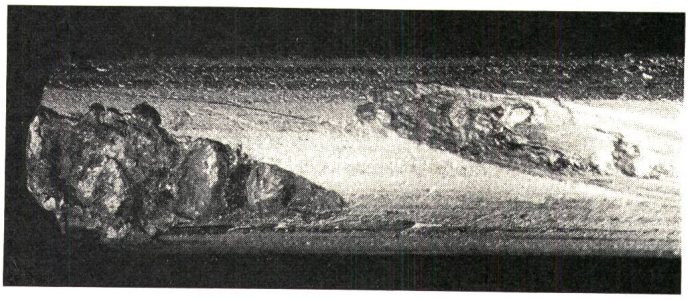

Fig. 11
Bruchstelle und Reibmarke

Die Drahtbrüche in Leiterseilen beginnen in der Seilinnenlage. Trotz deutlicher Oberflächenfehler an einzelnen Drähten der Seilaussenanlage dicht an der Klemme kam es hier nicht zu Brüchen, während in der gleichen Zeit bereits zwei Drähte der Innenlage gebrochen waren. Wahrscheinlich ist die Wechselzug- und Wechselbiegespannung in den Drähten der Aussen- und Innenlage ähnlich gross. Auf stark unterschiedliche Spannungsbeanspruchungen lässt sich also

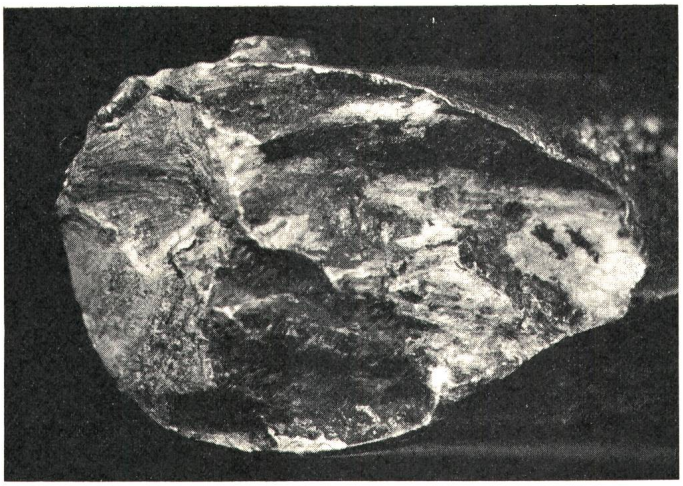

Fig. 12
Bruchfläche

der Beginn der Brüche in der Innenlage nicht ohne weiteres zurückführen.

In Fig. 17 ist die qualitative Beanspruchung der Seildrähte im querschwingenden Leiterseil dicht vor der Hängeklemme dargestellt.

Fig. 17a zeigt den Verlauf der Auslenkung, Steigung und Krümmung des schwingenden Leiterseiles. Die Drahtbruchstelle fällt nicht mit dem Maximum der Krümmung an der

Fig. 13
Bruchfläche

Einspannstelle zusammen. Damit liegt der Bruch nicht an der Stelle höchster statischer und dynamischer Beanspruchung. Bei früheren Schwingungsuntersuchungen im Laboratorium und in der Praxis war diese Tatsache nicht ohne weiteres erkenntlich, da die Hängeklemmen ausnahmslos einen trompetenartig erweiterten Auslauf hatten.

In Fig. 17b ist der Verlauf der Presskraft zwischen den Drähten der Seil-Aussen- und Innenlage dargestellt. Unter der Hängeklemme erreicht die Presskraft ihr Maximum. Der im freien Feld von der Seilgeometrie herrührenden Presskraft zwischen den Drahtlagen überlagert sich hier die Klemmenpresskraft. Von der Klemmenstirnseite aus fällt die Presskraft, abhängig von der Drahtsteifigkeit, schnell ab und erreicht den Wert des freien Seiles.

Während die Seilkrümmung die Relativbewegung der Drähte untereinander sowie zwischen Drähten unterschiedlicher Drahtlagen bewirkt, bildet die Presskraft zwischen den Drähten den zweiten Faktor zur Erzeugung der Reibkorrosion.

Strebt einer der beiden Faktoren einem Grenzwert zu, so kommt die Reibkorrosion nahezu zum Stillstand. Wird die Presskraft so gross, dass die Krümmung den Reibungsschluss zwischen den Drähten nicht überwinden kann, so tritt keine oder nur geringe Reibkorrosion auf. Bei konstanter, relativ niedriger Presskraft zwischen den Drahtlagen ist die Reibkorrosion lediglich eine Funktion der Krümmung. So konnte bei der Untersuchung eines Seilabschnittes aus einem Schwingungsversuch eindeutig festgestellt werden, dass im Knotenpunkt die Reibkorrosion zwischen den Drähten nahezu Null war, während sie in der Mitte des Schwingungsbauches ihr Maximum erreichte.

Fig. 14
Lage der Bruchfläche zur Drahtachse

In Fig 17c wurde das Ausmass der Reibstellen zwischen den Drähten in der Nähe der Hängeklemme graphisch dargestellt. Der Kurvenverlauf wurde anhand der geschilderten Beobachtungen rekonstruiert.

6. Zusammenfassung

Die Reibkorrosion, im Ausland auch «fretting» genannt, hat auf die Ermüdungsfestigkeit des Leiterseiles einen wesentlichen Einfluss. Der Reibungsschluss zwischen den Drähten der Aluminium-Drahtlagen wird bei kräftigen Krümmungsänderungen, aber mässigen Presskräften zwischen den Drähten, überwunden, und die Drähte gleiten aufeinander. Dabei werden aus dem Grundmetall Partikel herausgerieben, die durch sofortige Oxydation härter werden als der

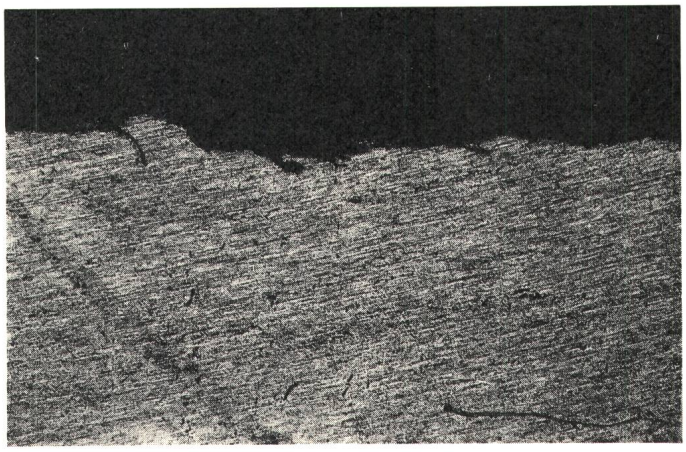

Fig. 15
Längsschnitt durch eine Reibstelle

Ausgangswerkstoff. Diese Partikel geraten erneut in den Reibprozess und beschleunigen das Wachstum der Korrosionsstellen. Nach verhältnismässig kurzer Zeit bilden sich in der Reibstelle Anrisse aus, die den vorzeitigen Ermüdungsbruch der Drähte einleiten.

Die Flächen der Brüche liegen fast regelmässig etwa 45° zur Drahtachse. Die Oberfläche ist mehr oder weniger zerklüftet. Diese Feststellungen bestätigen die zusätzliche Beanspruchung der Drähte durch Schub- und Torsionskräfte. Bedeutende Restflächen eines Gewaltbruches wurden nicht beobachtet.

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse reichen für eine abschliessende Beurteilung des Einflussfaktors Reibkorrosion im Leiterseil nicht aus. Die Untersuchung zeigt jedoch, dass der Reibkorrosion als Einflussfaktor auf die Ermüdungsfestigkeit des Leiterseiles die gleiche Bedeutung beizumessen ist wie der Wechselbeanspruchung. Die eine Beanspruchungsart wird von der anderen zwangsläufig beeinflusst. Ein Abbau der Wechselbiegespannung (Krümmung) wird deshalb ein Nachlassen der Reibkorrosion bewirken. Es bleibt noch zu prüfen, wie sich oberflächengeschützte Drähte (Kunststoffüberzug) im Schwingungsversuch verhalten und wie stark die statische Presskraft zwischen den Drahtlagen die Reibkorrosion beeinflusst.

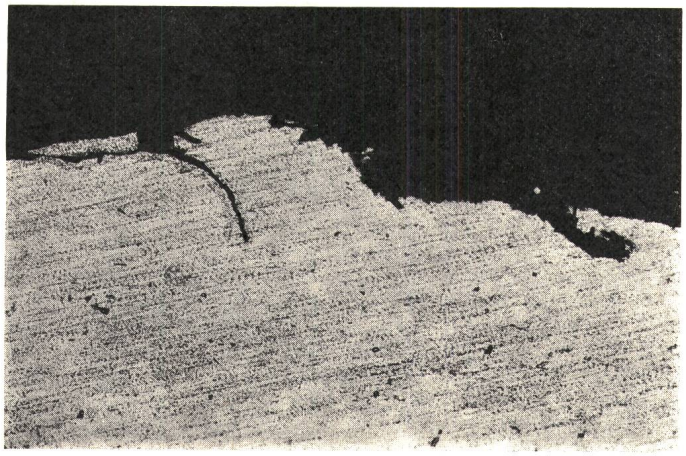

Fig. 16
Längsschnitt durch eine Reibstelle

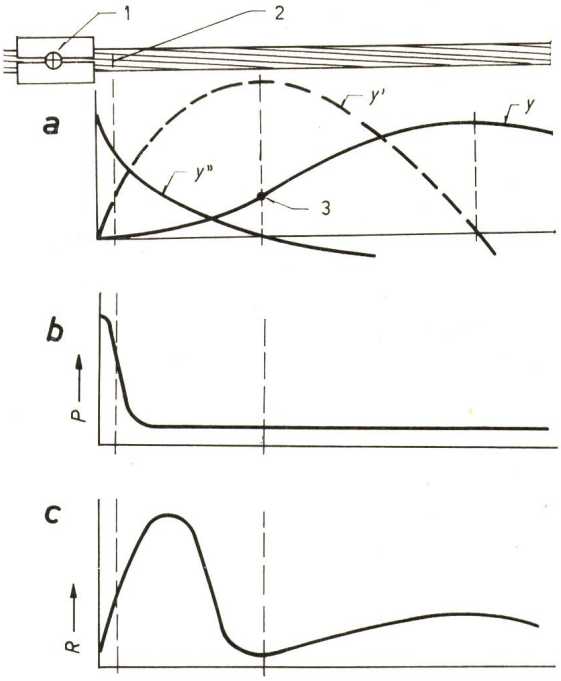

Fig. 17
Qualitative Beanspruchung der Seildrähte bei Transversalschwingungen

a Verlauf der Auslenkung, Steigung und Krümmung im schwingenden Leiterseil in der Nähe der unbeweglichen Hängeklemme
y Auslenkung; *y'* Steigung; *y"* Krümmung; *1* Hängeklemme; *2* Drahtbruchstelle; *3* Wendepunkt

b Verlauf der Presskraft *P* zwischen den Drähten der Aussen- und Innenlage eines Al/St.-Seiles in der Nähe der Hängeklemme

c Verlauf des Ausmasses der Reibstellen *R* an der Drahtoberfläche in der Nähe der Hängeklemme

Literatur

[1] *T. Varney:* Notes on the vibration of transmission-line conductors. Trans. AIEE 45(1926)–, p. 791...795.

[2] *J. Nefzger:* Dérangements occasionnés par les oscillations mécaniques des conducteurs aériens et leur remède. Rapport CIGRE No. 126, 1933.

[3] *J. Nefzger:* Mechanische Schwingungen an Freileitungen. Sächsische Ingenieur-Zeitschrift –(1934)2, S. 17...18.

[4] *H. Bovallius, T. Persson* et *U. Sandström:* Dégâts causés par les vibrations aux conducteurs et aux fils de terre de quelques lignes de transport suédoises. Rapport CIGRE No. 227, 1960.

[5] *H. Mors:* Die Beanspruchung der Freileitungsseile. Bisherige Erfahrungen und ihre theoretische Deutung. Elektr.-Wirtsch. 67(1968)11, S. 271...278.

[6] *L. Möcks:* Die statische Biegespannung im Leiterseil als möglicher Einflussfaktor auf die Seillebensdauer. Aluminium 45(1969)4, S. 210...220.

[7] *W. Bückner:* Quantitative Angaben über die Beanspruchung schwingender Freileitungsseile. Elektr.-Wirtsch. 67(1968)11, S. 286...291.

[8] *R. Helms:* Zur Sicherheit der Hochspannungsfreileitungen bei hoher mechanischer Beanspruchung. VDI-Forschungsheft No. 506, Düsseldorf, VDI, 1964.

[9] *W. Philipps:* Seilschwingungen bei Freileitungen. Versuchsanlage, Messanordnungen und Ergebnisse. Elektr.-Wirtsch. 67(1968)11, S. 279...286.

[10] *W. G. Fricke* and *C. B. Rawlings:* The importance of fretting in vibration failures of stranded conductor. AEEI-Paper-No. 61–1026.

[11] *P. R. Mehta:* Static and dynamic stresses in overhead conductors. Rocky Mountain Electrical Leage, 22. April 1968. Cleveland/Ohio, Performed Line Products, 1968.

[12] *H. Hertel:* Ermüdungsfestigkeit der Konstruktionen. Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 1969.

Adresse des Autors:

Ing. *L. Möcks,* Richard Bergner Elektroarmaturen, Postfach, D–8540 Schwabach.