Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 105 (1987)
Heft: 48

Artikel: Wirkung von Lichtbogen auf Seilbahnseile
Autor: Oplatka, Gabor / Roth, Mladen
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-76763

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: 04.08.2025

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

Wirkung von Lichtbogen auf Seilbahnseile

Von Gabor Oplatka und Mladen Roth, Zürich

Für die Neufassung der Vorschriften über die Gestaltung der Kreuzungsstellen von Seilbahnen mit Hochspannungsleitungen waren technische Unterlagen bereitzustellen. Diese sollen zur Vermeidung von hässlichen Schutzbauten beitragen und in einem Schadenfall ermöglichen, vom visuellen Befund des Seiles auf dessen tatsächliche Schwächung zu schliessen. Zu diesem Zweck wurden gespannte Seile einer Lichtbogenwirkung ausgesetzt, anschliessend visuell beurteilt und – sofern nicht bereits gebrochen – einer Ermüdungsprüfung unterzogen. Schliesslich erfolgte eine metallographische und fraktographische Untersuchung.

Einleitung

Kommt es zwischen einem Stahldrahtseil und einem Leiter einer Hochspannungsleitung zur Berührung (z. B. wenn bei der Kreuzung einer Seilbahn mit einer Hochspannungsleitung ein Isolator bricht), so entsteht ein Lichtbogen. Das unter Zugspannung stehende Seilbahnseil wird durch die dabei auftretende zusätzliche thermische Belastung beschädigt.

Es stellte sich die Frage, wie gross die Schädigung der Seile infolge der Lichtbogeneinwirkung ist, und speziell:

a) Unter welchen Umständen ist ein Bruch des Seiles zu erwarten; d. h. müssen vorbeugende Massnahmen ergriffen werden?

b) Sofern das Seil nicht bricht, ist es möglich, durch visuelle Bewertung zu entscheiden:
   - ob man die Evakuierung der Passagiere ohne Bewegung der Bahn durchführen muss oder
   - ob die begonnene Fahrt noch beendet werden darf?

Um diese Fragen zu beantworten, wurden Seile mit betriebsmässiger Kraft gespannt und zwischen denselben und einer quergespannten Hochspannungsleitung ein Lichtbogen mit definiertem Energieinhalt gezündet. Dabei achtete man darauf, dass der Lichtbogen konzentriert, d. h. auf einem möglichst kurzen Abschnitt des Seiles wirkte.

Anschliessend wurden die Seile

- auf sichtbare Beschädigungen untersucht,
- metallographisch untersucht zur Feststellung der Werkstoffbeeinflussung durch die hohe lokale Wärmeeinwirkung,
- welche unter der Wirkung des Lichtbogens nicht gerissen sind, zwecks Feststellung der restlichen Lebensdauer, einer Schwellbiegeprüfung unterzogen.

Versuchsobjekte

Seilbahnseile

Die technischen Daten der Versuchsseile sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Leiterseil

Freileitungsseil «Aldrey», Aluminium-Stahl-Seil, Durchmesser: 20 mm, metallischer Querschnitt: 240 mm².

Versuchseinrichtungen

Lichtbogenprüfstand

Die Seile waren während der Lichtbogeneinwirkung mit einer konstanten Kraft gespannt. Sie betrug

für die Litzenseile 100 kN und
für die verschlossenen Seile 300 kN

Diese Kraft musste – ähnlich wie in einem freien Seilfeld – auch während der wärmebedingten Dehnung des Seiles aufrechterhalten bleiben. Dazu diente die in Bild 1 skizzierte Vorrichtung.

Mit Hilfe des grossen Blasenspeichers (3) wurde die Zugkraft im Seil trotz der durch die Wärmeeinwirkung verursachten Dehnung weitgehend konstant gehalten. Die Holme (4) und die Füsse (5) des Rahmens bestanden aus elektrisch nicht leitendem Material.

Der Prüfstromkreis

Das Prinzipschema des elektrischen Anschlusses ist in Bild 2 enthalten.

Gemessen und in Funktion der Zeit aufgezeichnet wurden:

$U_{R\text{-}S}$ = Verkettete Spannung des Generators
I und I_R = Stärke des Stromes und des Teilstromes R
U_R und U_S = Spannung der Phasen R und S gegen Erde

Die Seilenden bzw. der Starkstromleiter wurden an einem Drehstrom-Kurzschlussgenerator zweipolig angeschlossen. Die gewünschte Stromstärke konnte im Bereich 1,5 bis 20 kA bei einer Generatorspannung zwischen 5,5 und 7,0 kV gewählt werden. Dabei wurde zur Erleichterung der Messwertbeurteilung stets eine Lichtbogendauer von 1 s angestrebt. Die sich ergebenden, kleine zeitliche Abweichungen aufweisenden Messwerte wurden auf die thermisch äquivalente, 1 s dauernde Lichtbogenenergie umgerechnet.

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{\int_0^t i^2\,dt}{t}}$$ es ist also

stets

$$(I_{eff})^2 \cdot t = (I_{1s})^2 \cdot 1\,s$$

Schwellbiegeprüfung

Die Seilabschnitte wurden in der Schwellbiegeprüfmaschine mit derselben Zugkraft wie im Lichtbogenprüfstand gespannt und mit einer belasteten Rolle hin- und herbefahren. Dabei wurden die Seile:

- der Länge nach so angeordnet, dass sich die Kreuzungsstelle mit dem Leiterseil in der Mitte der Prüfstrecke befand,

Tabelle 1. Daten der Versuchsseile

Seilmachart	*Verschlossenes Seil*	*Litzenseil*
Durchmesser	29 mm	27,5 mm
Aufbau	1+6+12+18+24+22–Z	H+6 (1+8+8) Gleichschlag
Metallischer Querschnitt	550 mm²	285 mm²
Bruchspannung der Drähte		
Runddrähte	1,8 kN/mm²	1,5 kN/mm²
Profildrähte	1,4 kN/mm²	
Bruchkraft	900 kN	442 kN

Tabelle 2. Wichtigste Daten der durchgeführten Schwellbiegeprüfung

– Prüfstrecke	bei verschlossenen Seilen	: 420 mm
	bei Litzenseilen	: 620 mm
– Prüfgeschwindigkeit		: 50 Schwellbiegungen/min
– Prüfrolle	Durchmesser	: 200 mm
	Fütterung	
	bei verschlossenen Seilen	: Polyamid
	bei Litzenseilen	: Polyurethan

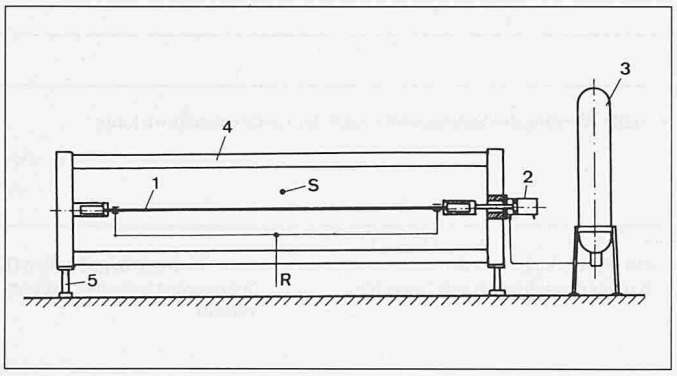


Bild 1. Im skizzierten Lichtbogenprüfstand wurde das beidseitig vergossene Versuchsseil (1) verdrehsicher befestigt und mit dem hydraulischen Zylinder (2) gespannt. Zwischen dem Leiterseil (S) und dem Versuchsseil wurde ein Lichtbogen gezündet. Die Rückleitung des Stromes erfolgte über die Phase R von beiden Seilenden symmetrisch

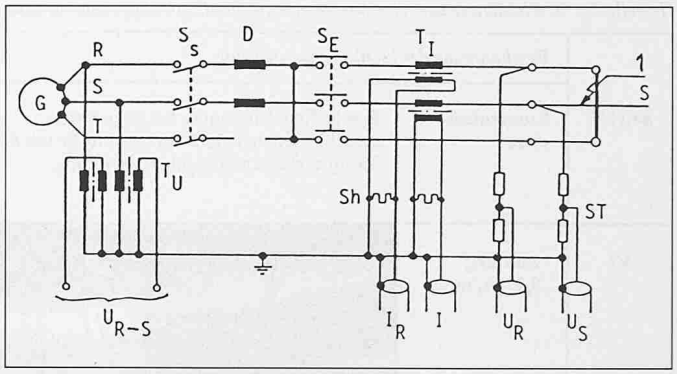


Bild 2. Aufbau des Prüfstromkreises und der Messeinrichtungen

G	= Drehstromgenerator	1	= Seilbahnseil (Prüfling)
S_S	= Schutzschalter	T_U	= Spannungswandler
D	= Drosselspulen	Sh	= Shunt
S_E	= Einschalter	ST	= Spannungsteiler
T_I	= Stromwandler	S	= Leiterseil

- radial so orientiert, dass die meistbeschädigte Mantellinie 90° zur Prüfrolle lag, damit die grösste Beanspruchung in den zum Teil zusammengeschweissten Drähten entsteht. (Eine Ausnahme bildete hier das Seil L 5, welches mit der Rolle an der meistbeschädigten Mantellinie befahren wurde.)

Die wichtigsten Daten der Schwellbiegeprüfung sind in Tabelle 2 zusammengefasst, während die eingestellten Kräfte und die erzielten Resultate aus den Tabellen 3 und 4 hervorgehen.

Resultate

Verschlossenes Seil

Die Beschreibung der Befunde und die Resultate der Schwellbiegeprüfungen sind mit den Fotoaufnahmen der Seilzustände nach den Lichtbogenversuchen in der Tabelle 3 zusammengestellt.

Die metallographische und fraktographische Untersuchung ergab, dass

- die Z-Drähte in den äusseren Randbereichen unterschiedlich dicke, mit Rissen und Lunkern durchsetzte Schmelzzonen aufweisen. Die Drähte haben in diesem Bereich eine niedrige Härte;
- sich an die Schmelzzone eine ausgeprägte Anlasszone anschliesst (Bild 3);
- die Fussbereiche der Z-Drähte keine Wärmeeinflüsse zeigen;
- keine Aufhärtung mit Martensitbildung stattfand;
- die Runddrähte keine Wärmeeinflüsse aufweisen;
- die bei den Schwellbiegeprüfungen entstandenen Drahtbrüche von den Rissen im Randbereich ausgehen.

Litzenseil

Für die Litzenseile enthält die Tabelle 4 die Beschreibung der Befunde, die Resultate der Schwellbiegeprüfungen und ebenfalls die Fotoaufnahmen der Seilzustände nach den Lichtbogenversuchen.

Die metallographische und fraktographische Untersuchung ergab, dass die Litzenseile gegenüber den verschlossenen Seilen wesentlich vielfältigere Arten des Wärmeeinflusses zeigen, nämlich:

- lokale Martensitbildung ohne erkennbare Anlasszone,
- Anschmelzung mit Martensitbildung ohne erkennbare Anlasszone,
- zusammengeschmolzene Drähte mit Anlass- und Normalisierungsgefüge,
- zusammengeschmolzene Drähte mit Martensitbildung und teilweise wärmebeeinflussten Zonen (Bild 4),
- mit vom Hochspannungsleiter stammendem Aluminium auflegierte Randzonen an einem durchgehend wärmebeeinflussten Draht.

Diskussion der Ergebnisse

Frage a)
Unter welchen Umständen ist ein Bruch des Seiles zu erwarten?

Die Versuche ergaben, dass unter den vorliegenden Umständen ab einer Strombelastung von 20 A/mm² mit starken Schäden und ab 35 A/mm² mit dem Bruch des Seiles gerechnet werden muss. Dies bedeutet u. a., dass bei einer Abschaltdauer des Stromes von 0,5... 0,3 s bei den angegebenen Kurzschlussströmen eine bis zwei Schnellwiedereinschaltungen zulässig sind. (Bild 5)

Bild 3. Die äussere Ecke eines Z-Drahtes in 40facher Vergrösserung zeigt eine mit Aluminium auflegierte Randzone mit anschliessender Anlasszone (Aufnahme EMPA)

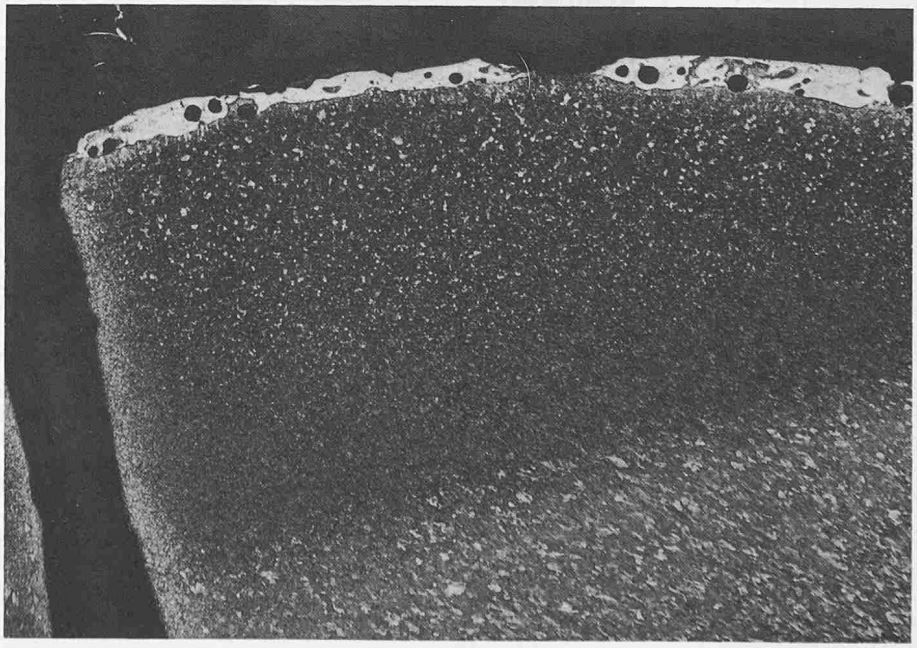


Tabelle 3. Beschädigung der verschlossenen Seile durch Lichtbogeneinwirkung

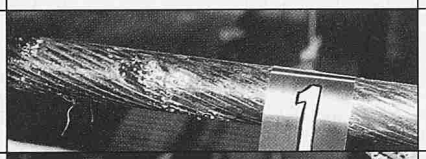
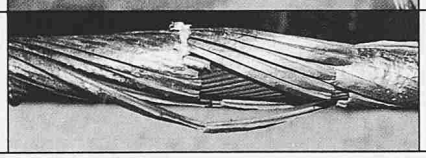
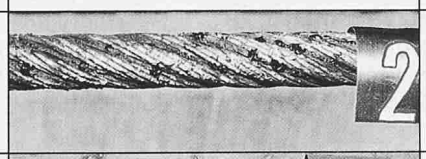
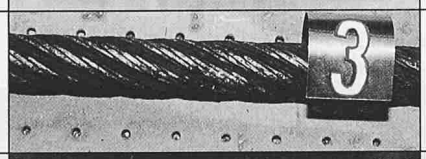
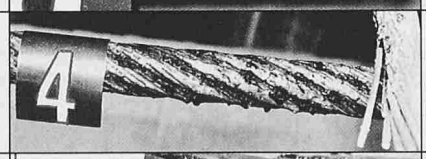
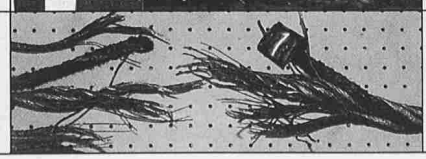
Seil Nr.	*Beschädigung der Lichtbogeneinwirkung*			
	Kurzschluss-strom	Beschädigte Abschnitte der gespannten, verschlossenen Seile. Man beachte die mit der Stromstärke zunehmende Rissbildung.	Visuelle Wertung des Seilzustandes nach der Lichtbogeneinwirkung	
V1	2,88 [kA] 5,2 [A/mm²]		- ein grosser Krater an der Kreuzungsstelle mit dem Leiterseil.	- ca. 14 kleinere Brandstellen (Krater mi Schweissperlen) auf insgesamt 330 cm verteilt
V2	9,14 [kA] 16,6 [A/mm²]		- ca. 20 kleinere Brandstellen (Krater mit Schweissperlen) auf insgesamt 180 cm gleichmässig verteilt	
V3	15,1 [kA] 27,5 [A/mm²]		- Seileinschnürung mit verschweissten Drähten an der Kreuzungsstelle mit dem Leiter auf eine Länge von 10 cm infolge Ausglühens der Profildrähte	- ca. 20 kleinere Brandstellen (Krater mi Schweissperlen und Schlackenbildung) auf insgesamt 120 cm verteilt
V4	19,0 [kA] 34,6 [A/mm²]		- grosses Loch in der Decklage; Hälfte der Z-Drähte auf einer Länge von 8 cm weggeschmolzen, wobei äusserste ∅-Drahtlage intakt geblieben	- ca. 20 kleinere Brandstellen (Krater mi Schweissperlen) auf insgesamt 100 cm verteilt

Tabelle 4. Beschädigung des Litzenseiles durch Lichtbogeneinwirkung

Seil Nr.	*Beschädigung durch Lichtbogeneinwirkung*			
	Kurzschluss-strom	Beschädigte Abschnitte der gespannten Litzenseile. Man beachte die mit der Stromstärke zunehmende Riss- und Schlackenbildung sowie Verschweissungen.	Visuelle Wertung des Seilzustandes nach der Lichtbogeneinwirkung	
L2	4,08 [kA] 14,3 [A/mm²]		- mehrere kleine Brandstellen (Krater mit Schweissperlen) auf einer Länge von insgesamt 94 cm gleichmässig verteilt	
L3	4,26 [kA] 14,9 [A/mm²]		- mehrere kleine Brandstellen (Krater mit Schweissperlen) auf insgesamt 180 cm verteilt	
L6	6,23 [kA] 21,8 [A/mm²]		- einige starke Krater (Verschweissungen der Drähte mit starker Schlackenbildung) auf einer Länge von 25 cm vorhanden	- mehrere kleine Brandstellen (Krater m Schweissperlen) auf 90 cm Länge verte
L4	8,61 [kA] 30,2 [A/mm²]		- mehrere starke Krater (Verschweissungen der Drähte mit starker Schlackenbildung) auf 50 cm verteilt	- mehrere Brandstellen (Krater mit Schlacke überdeckt) auf 210 cm verteil
L5	10,2 [kA] 35,8 [A/mm²]		- mehrere starke Krater (Verschweissungen der Drähte mit starker Schlackenbildung) auf 40 cm Länge verteilt	- mehrere Brandstellen (Krater mit Schlacke überdeckt) auf 140 cm verteil
L1	12,07 [kA] 42,4 [A/mm²]		- alle 6 Litzen an der Kreuzungsstelle mit dem Leiterseil gebrochen	

	Schwellbiegeversuche		
	Beschädigte bzw. befahrene Strecke	(S = Seilzugkraft; P = Rollenlast; n = Anzahl Überrollungen) Belastungsstufe I: S = 300 kN, P = 5 kN	Belastungsstufe II: S = 300 kN, P = 10 kN
mässiger Schaden (keine bleibende Seilverlängerung: $\Delta l = 0$)		$n_1 = 2000$	$n_2 = 1\,505\,900$ (8 Z-Drahtbrüche; Seil mit der Prüfrolle nicht mehr befahrbar)
geringer Schaden (keine bleibende Seilverlängerung: $\Delta l = 0$)		$n_1 = 2000$	$n_2 = 1\,258\,140$ (8 Z-Drahtbrüche; Seil mit der Prüfrolle nicht mehr befahrbar)
mittlerer Schaden (bleibende Seilverlängerung an der Einschnürungsstelle: $\Delta l = 0{,}7$ cm)		$n_1 = 2000$	$n_2 = 103\,424$ (12 Z-Drahtbrüche; Seil mit der Prüfrolle nicht mehr befahrbar)
schwerer Schaden (bleibende Seilverlängerung an der Schadenstelle: $\Delta l = 1{,}8$ cm)	Seil infolge der Lichtbogeneinwirkung mit der Prüfrolle nicht befahrbar		

	Schwellbiegeversuche	
	Beschädigte bzw. befahrene Strecke	(S = Seilzugkraft; P = Rollenlast; n = Anzahl Überrollungen) S = 100 kN, P = 5 kN
geringer Schaden (bleibende Seilverlängerung: $\Delta l = 0{,}1$ cm)		$n > 0{,}5 \cdot 10^6$ (abgestellt; keine Drahtbrüche sichtbar)
geringer Schaden (keine bleibende Seilverlängerung: $\Delta l = 0$)		$n > 0{,}5 \cdot 10^6$ (abgestellt; keine Drahtbrüche sichtbar)
mässiger Schaden (bleibende Seilverlängerung: $\Delta l = 0{,}1$ cm)		$n > 4{,}0 \cdot 10^6$ (abgestellt; keine Drahtbrüche sichtbar)
starker Schaden (bleibende Seilverlängerung: $\Delta l = 0{,}5$ cm)		$n > 0{,}5 \cdot 10^6$ (abgestellt; keine Drahtbrüche sichtbar)
starker Schaden (bleibende Seildehnung: $\Delta l = 0{,}6$ cm)		$n = 313\,962$ (Seilbruch)
Seilbruch	Seil infolge der Lichtbogeneinwirkung gebrochen	

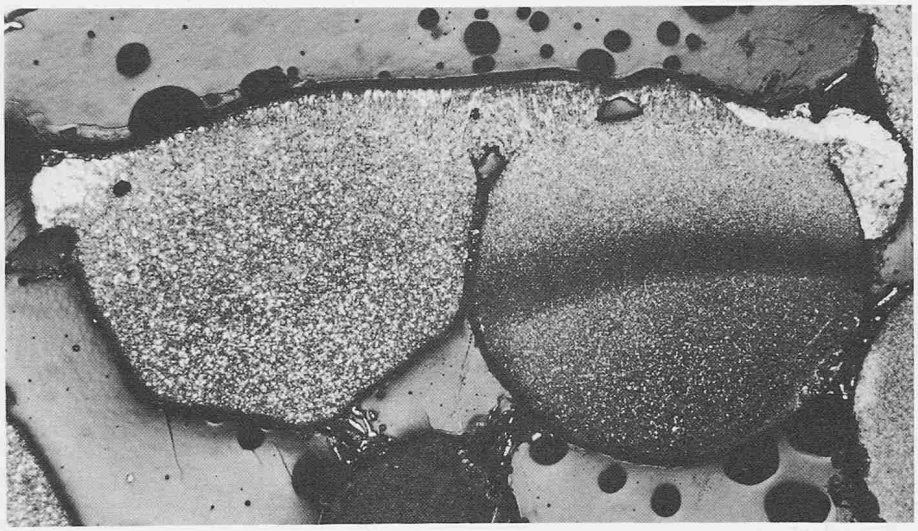


Bild 4. Querschliff eines Litzenseiles (Detail, 20fach vergrössert). Die durch Lichtbogenwirkung zusammengeschmolzenen Aussendrähte weisen eine Martensitschicht und teilweise wärmebeeinflusste Zonen auf (Aufnahme EMPA)

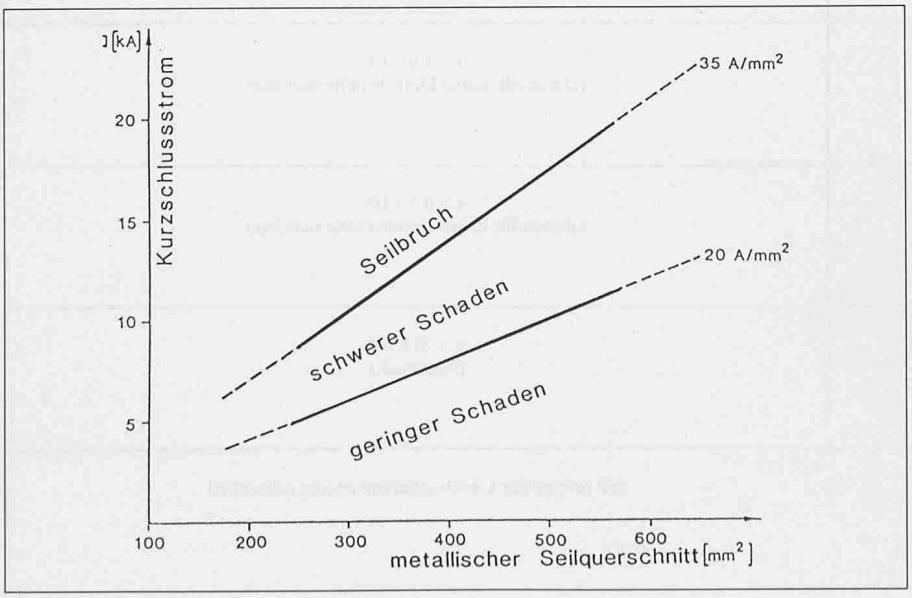
In den vorliegenden Versuchen wurde durch die symmetrische Anordnung des Stromflusses und durch das Festhalten des elektrischen Leiters angestrebt, den Lichtbogen auf das Seil lokal-konzentriert wirken zu lassen. Trotzdem zeigt die Verteilung der lokalen Schadstellen (Kraterbildung, Aufschweissungen usw.) eine grosse zufällige Variation. In der Praxis ist zu erwarten, dass ein Lichtbogen unter dem Einfluss der elektrodynamischen Kräfte entlang des Seiles wandert bzw. hin und her springt, weshalb eher örtlich ausgedehnte, aber leichtere Schäden auftreten dürften. Damit reduziert sich die Gefahr eines unmittelbaren Seilbruches. Allerdings zeigten Vorversuche, dass bei starker äusserer Fettung des Seiles der Lichtbogen die Tendenz hat, an einem einmal entstandenen Fusspunkt länger stehen zu bleiben.

Frage b)
Betriebssicherheit von nicht gerissenen Seilen

Die von der Lichtbogeneinwirkung stammenden Schäden sind am Seil gut sichtbar. Es sind dies Lunker- bzw. Rissbildung, Verschweissungen, Aufschmelzungen und Drahtbrüche. Die Intensität dieser sichtbaren Schäden nimmt mit der Strombelastung eindeutig zu, so dass sie gute Indikatoren sind für die tatsächliche Schädigung. Sämtliche Seile, welche nach der Lichtbogeneinwirkung mit einer Rolle noch befahrbar waren, haben im Schwellbiegeversuch eine wesentlich grössere Anzahl von Überrollungen ausgehalten, als dies normalerweise für die Evakuierung einer Seilbahn nötig ist. Dies zeigt, dass für das Seil der bei der Lichtbogeneinwirkung stattfindende «Warmzugversuch» gefährlicher ist als die Beanspruchung auf konstanten Zug und gleichzeitige schwellende Biegung nach erfolgter Abkühlung. Deshalb muss auch die zulässige Strombelastung nicht tiefer angesetzt werden, als dies für die Vermeidung des Seilrisses nötig ist.

Selbstverständlich müssen derart geschädigte Seile saniert bzw. abgelegt werden, umso eher, als nebst den sichtbaren auch nichtsichtbare Schäden wie Ausglühung und Martensitbildung aufgetreten sind.

Bild 5. Die zulässige Strombelastung in Abhängigkeit vom metallischen Querschnitt des Seiles. Ab etwa 20 A/mm² sind schwere Schäden und ab 35 A/mm² Seilbruch zu erwarten



Schlussbemerkungen

Wegen der Streuung der Verteilung der Beschädigung und wegen der kleinen Zahl der Versuche sind die numerischen Aussagen als Näherungswerte zu betrachten. Wieweit diese Resultate auf andere Verhältnisse extrapolierbar sind, sei dahingestellt. Eine weitere Erhöhung der zulässigen Werte kann nur dann empfohlen werden, wenn zusätzliche Versuche ausgeführt werden und deren Resultate dies rechtfertigen. Insbesondere für Seile mit grossem Durchmesser sind solche Versuche zu empfehlen. Hierfür wären allerdings bedeutende Aufwendungen notwendig.

Ferner sei auf die Wichtigkeit der fachmännischen Ausführung der Austrittstelle des Stromes hingewiesen. Andernfalls können hier nicht mindere Schädigungen auftreten. (Solche Austrittsstellen können übrigens bei nichtgeerdeten Seilen die in den Stationen ein- und aussteigenden Passagiere bilden!)

Schliesslich sei an dieser Stelle gedankt
- dem Bundesamt für Verkehr in Bern für die Unterstützung der Versuche,
- der ETH Lausanne für die Durchführung der Lichtbogenversuche und
- der Eidg. Materialprüfungsanstalt Dübendorf für die metallographischen und fraktographischen Untersuchungen.

Adresse der Verfasser: *G. Oplatka*, Prof. Dr., und *M. Roth*, dipl. Ing., Institut für Leichtbau und Seilbahntechnik, ETH-Hönggerberg-HIF, CH-8093 Zürich.

Literaturverzeichnis

[1] Beschädigung von Stahldrahtseilen durch Lichtbogeneinwirkung. Schlussbericht vom 18. November 1983. Bern, Bundesamt für Verkehr
[2] *Stender, B.* Beschädigung von Stahldrahtseilen durch Lichtbogeneinwirkung. Bulletin ASE/UCS Nr.5/1987, Seiten 242–244
[3] *Thiede, D.W.S:* Festigkeitsminderung von Drahtseilen unter Schweissstrom-Einfluss. Drahtwelt Nr. 11/1975, Seiten 445–47
[4] *M. Waeber:* Dynamische Vorgänge bei der mechanischen und thermischen Kurzschlussbeanspruchung von Starkstromanlagen mit Leitungsseilen. Dissertationen an der Technischen Fakultät Erlangen-Nürnberg, 1985