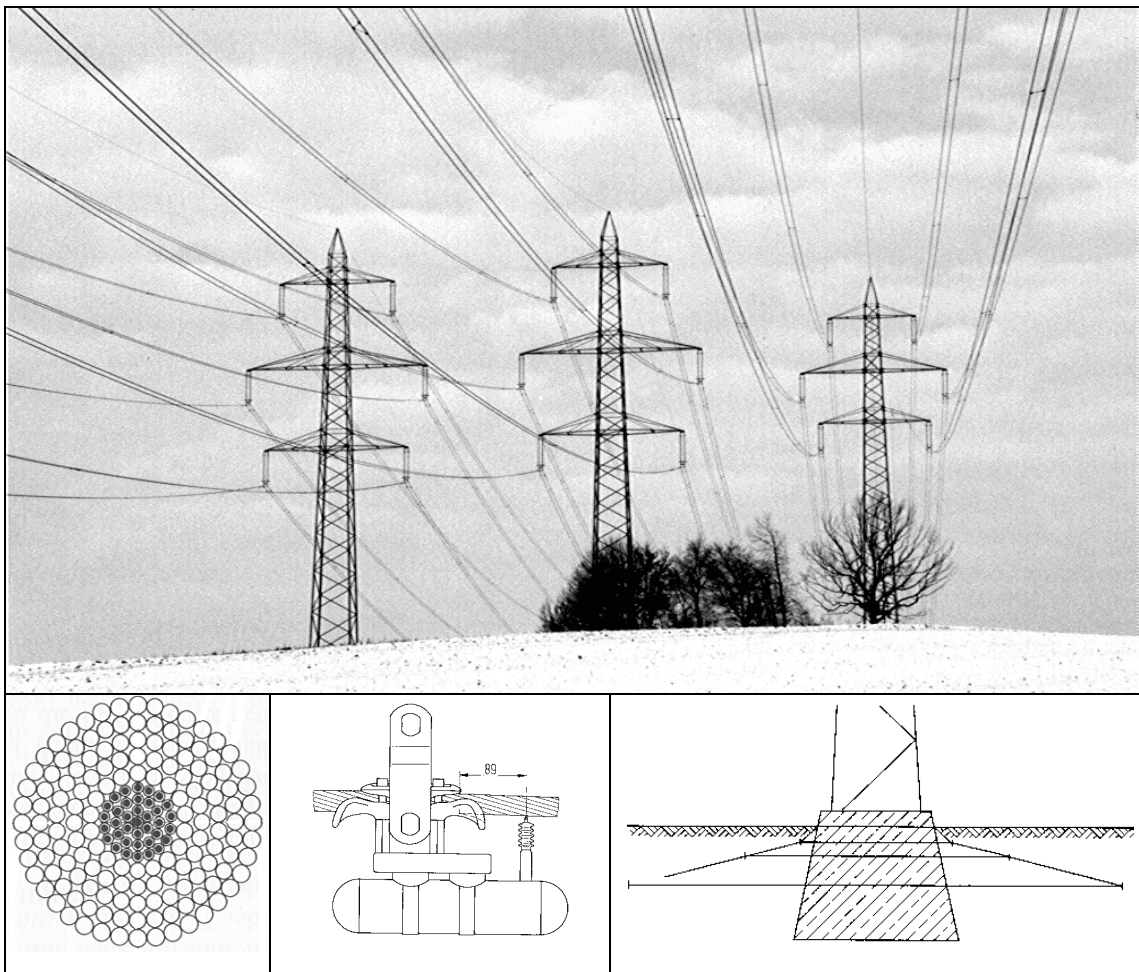


FKH - / VSE - Fachtagung
4. Oktober 2000
Hotel Arte
Riggenbachstrasse 10
4600 Olten

Hochspannungsfreileitungen
Technik, Ökonomie und Umwelt



VSE-Druckschrift 5.64 d/f





FKH - / VSE - Fachtagung 2000 „Hochspannungsfreileitungen“

***FKH - / VSE - Fachtagung
4. Oktober 2000
Hotel Arte
Riggenbachstrasse 10
4600 Olten***

Hochspannungsfreileitungen

Technik, Ökonomie und Umwelt

Veranstalter:

*Fachkommission für Hochspannungsfragen, FKH
Voltastrasse 9
8044 Zürich*



*Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke, VSE
Postfach 6140
8023 Zürich*



VSE-Druckschrift 5.64 d/f



***FKH - / VSE - Fachtagung, 4. Oktober 2000
Olten, Hotel Arte***

Hochspannungsfreileitungen

Technik, Ökonomie und Umwelt

Vorwort

Nach einer intensiven Aufbauphase des europäischen Verbundnetzes in der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts werden heute Höchstspannungsfreileitungen nicht zuletzt auch wegen der aufwändigen Bewilligungsverfahren nur noch vereinzelt zur Verbesserung der Versorgungssicherheit oder zur wirtschaftlichen Optimierung realisiert. Ein neuer Schwerpunkt stellt indessen der Aus- und Umbau bestehender Leitungen dar.

Die aktuelle Situation im Freileitungsbau ist ausserdem wesentlich durch einige neue Gesichtspunkte und Bedürfnisse geprägt: Einerseits gewinnen Anforderungen des Umwelt- und Landschaftsschutzes zunehmend an Bedeutung. Andererseits sind seit der aktivsten Phase des Netzaufbaus neue Methoden und Technologien bei der Auslegung und Realisierung von Freileitungen verfügbar, die heute zur Anwendung kommen. Schliesslich bietet aber auch die jüngst aktuell gewordene Nutzung von Freileitungen für Kommunikationssysteme neue interdisziplinäre Herausforderungen.

Die Tagung setzt sich zum Ziel, wichtige klassische Erkenntnisse aus dem Freileitungsbau zusammenzufassen und dabei Hintergründe für zurückliegende Entscheidungen während des Netzaufbaus aufzuzeigen. Im weiteren werden die aktuellen Probleme der Instandhaltung sowie der Umweltverträglichkeit diskutiert, wobei auf vorliegende Lösungswege hingewiesen wird.

Mit der angekündigten Veranstaltung soll der Gedankenaustausch zwischen Fachleuten aller betroffenen Teilgebiete sowie die Vermittlung von Sachinformationen an das interessierte Publikum gefördert werden. Die Tagung spricht insbesondere Projekt Ingenieure, Betreiber, Lieferanten und Dienstleistungsbetriebe des Fachbereichs Freileitungstechnik an.



Tagungsprogramm

Datum, Zeit: 4. Oktober 2000 Beginn 09³⁰

Ort: Hotel Arte, Olten

Titel: Hochspannungsfreileitungen: Technik, Ökonomie und Umwelt

Tagungsleitung: Georges Neher, ehem. BKW FMB Energie AG

	Titel / Inhalt	Referent
09 ³⁰ -09 ³⁵	Begrüssung im Namen des VSE und des FKH-Vorstands	J.-P. Blanc, VSE
09 ³⁵ -09 ⁵⁰	Einführung in das Tagungsthema	G. Neher
09 ⁵⁰ -10 ³⁰	Auslegung von Hochspannungsfreileitungsmasten, Zusatzlasten und Sturmbeanspruchungen	M. Gerber BKW FMB Energie AG
10 ³⁰ -10 ⁵⁰	Utilisation de solutions compactes pour des lignes aériennes 400 kV Einsatz von Kompaktlösungen für 400-kV-Hochspannungsfreileitungen	M. Ammann EOS
10 ⁵⁰ -11 ¹⁵	Kaffeepause	
11 ¹⁵ -11 ⁴⁵	Trasseewahl zur Vermeidung von Lawinenschäden	M. Schär, M. Ammann SLF Davos, Einführung: Dr. H. Zimmermann ATEL
11 ⁴⁵ -12 ¹⁵	Instandhaltung von Hochspannungsfreileitungen	H. Strub, NOK
12 ¹⁵ -12 ⁴⁵	Nutzung von Freileitungsnetzen für Telekommunikationsanlagen (Fest- und Mobilnetz)	Dr. G. Friedrich diAx
12 ⁴⁵ -14 ¹⁵	Mittagessen	
14 ¹⁵ -14 ⁴⁵	Nouvelles évolutions dans la technique des conducteurs Neue Entwicklungen in der Leiterseiltechnik	J. Ch. Delomel Dr. Th. Heizmann ALCATEL Cable
14 ⁴⁵ -15 ³⁰	Koronaschallemissionen, physikalische Grundlagen und Einflussgrössen. Mit Video- und Akustikwiedergabe	Dr. R. Bräunlich, FKH Dr. K. Heutschi, EMPA H.-J. Weber, ETHZ
15 ³⁰ -16 ⁰⁰	Diskussion	G. Neher

Ende der Veranstaltung ca. 16⁰⁰

Zusammenfassung der Referate

Inhaltsverzeichnis

Auslegung von Hochspannungsfreileitungsmasten, Problematik der Zusatzlasten und Sturmbeanspruchungen

M. Gerber, BKW FMB Energie AG 1

Utilisation de solutions compactes pour des lignes aériennes 400 kV

Einsatz von Kompaktlösungen für 400-kV-Hochspannungsfreileitungen
M. Ammann, EOS 19

Trasseewahl zur Vermeidung von Lawinenschäden

M. Schär, M. Ammann, SLF Davos 20

Instandhaltung von Hochspannungsfreileitungen

H. Strub, NOK 26

Nutzung von Freileitungsnetzen für Telekommunikationsanlagen (Fest- und Mobilnetz)

Dr. G. Friedrich, diAx 32

Nouvelles évolutions dans la technique des conducteurs

Neue Entwicklungen in der Leiterseiltechnik
J. Ch. Delomel, Dr. Th. Heizmann, ALCATEL 39

Koronaschallemissionen, Grundlagen und Einflussfaktoren

Dr. R. Bräunlich, FKHDr. K. Heutschi, EMPA 41

Teilnehmerverzeichnis 54

Referentenadressen 57

Auslegung von Hochspannungsfreileitungsmasten, Problematik der Zusatzlasten und Sturmbeanspruchungen

M. Gerber BKW FMB Energie AG, Bern

Zusammenfassung

Der Sturm „Lothar“, hat viele Stromleitungen in der Schweiz und auch in den angrenzenden Ländern beeinträchtigt und dabei viele Tragwerke beschädigt. Diese Schäden gaben Anlass dazu, die in der Schweiz angewendeten Bemessungsgrundlagen zu überprüfen. Nachdem 1994 die LeV vom Bund verabschiedet wurde und die CENELEC ihre Normen „Overhead electrical lines exceeding 45 kV (a.c.)“ in der vierten Vorfassung vorgelegt hat, stellt sich insbesondere die Frage, ob diese Unterlagen zur Tragwerksbemessung den Anforderungen in der Praxis genügen. Die Frage ist nicht einfach zu beantworten, da die Hauptbelastungen der Tragwerke von den Leiterseilen eingebracht werden, deren Verhalten sehr komplexe Beanspruchungen ergeben. Trotz grosser Unsicherheiten in den Belastungsannahmen wurden nur sehr wenige Tragwerke in der Schweiz direkt durch die Sturmwinde beschädigt. Die meisten Masten wurden durch umstürzende Bäume in Waldregionen beschädigt. Aufgrund eines Vergleiches zwischen der CENELEC-Bemessung und der StV-Bemessung werden Vermutungen zum unterschiedlichen Verhalten der Leitungen in Frankreich und in der Schweiz angestellt. Mit praktischen Beispielen wird das typische Schadensbild von unterschiedlichen Mastkonstruktionen erläutert.

1 Auswirkungen des Sturmes „Lothar“



Sturm-Lastungen dimensioniert sind.

Der Sturm „Lothar“ der nach Weihnachten 1999 unser Land und auch die Nachbarländer heimsuchte, hat uns wieder einmal vor Augen geführt, wie abhängig die heutige Gesellschaft von Verkehrswegen und vom elektrischen Strom ist.

Viele Haushaltungen mussten zum Teil mehrere Tage ohne Strom auskommen, weil irgendwo eine Leitung unterbrochen war.

Für die Elektrizitätswerke war es selbstverständlich, dass Mitarbeiter unter grossem zeitlichen und finanziellen Aufwand das Möglichste unternahmen, um die Stromversorgung wieder herzustellen. Dies auch im heftigen Schneetreiben, das einen Tag nach „Lothar“ einsetzte.

Abb. 1 Instandsetzung unter schwierigen Bedingungen

Bei BKW sind durch den Sturm Lothar neben vielen Holzstangen auch einige Beton und Stahlvollwandmasten beschädigt worden. Ein teurerer Schaden sind jedoch die fünf 220 KV-Fachwerkmaste, die teilweise oder ganz zerstört wurden. Die Frage muss gestellt werden, ob die Maste für diese Die Antwort lautet: die Bemessung ist korrekt.

Theoretisch ist ein Defekt bei ca. 150 km/h Windgeschwindigkeit zu erwarten, praktisch haben diese Konstruktionen noch etwas Reserve.

Alle Defekte an Fachwerkmasten erfolgten nicht durch den Wind, sondern durch Bäume die umstürzten und in die Leiterseile fielen. Durch die Schockbelastung werden die Maste auf Torsion (Verdrehung) belastet, eine Belastungsart die bei verschiedenen Masttypen in der Berechnung unterschiedlich stark berücksichtigt wird. Die schwächeren Konstruktionen, ertragen erfahrungsgemäss nicht mehr als eine Fichte pro Spannweite ohne einen Defekt zu erleiden. Bei „Lothar“ sind bis zu zehn Fichten in eine Spannweite gestürzt. Weitere Schäden traten anschliessend auf, als der Schnee die Bäume, die in den Leiterseilen hingen, zusätzlich belastete.

1.1 Einige Schadensbilder vom Sturm Lothar:

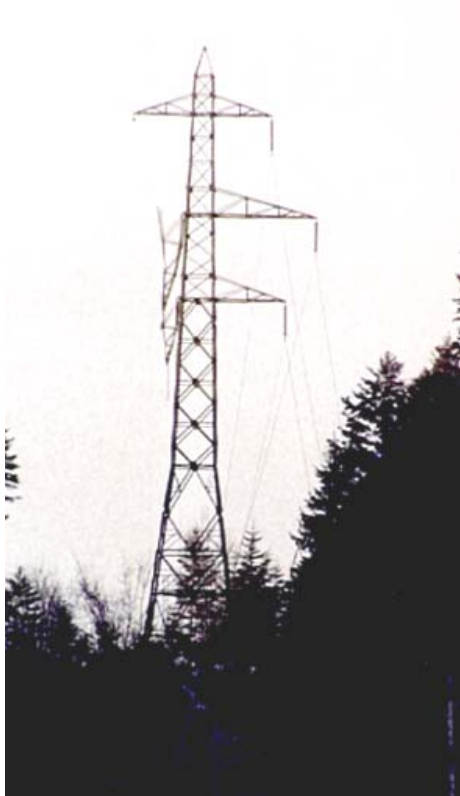


Abb. 2
Abgerissene Mastausleger.

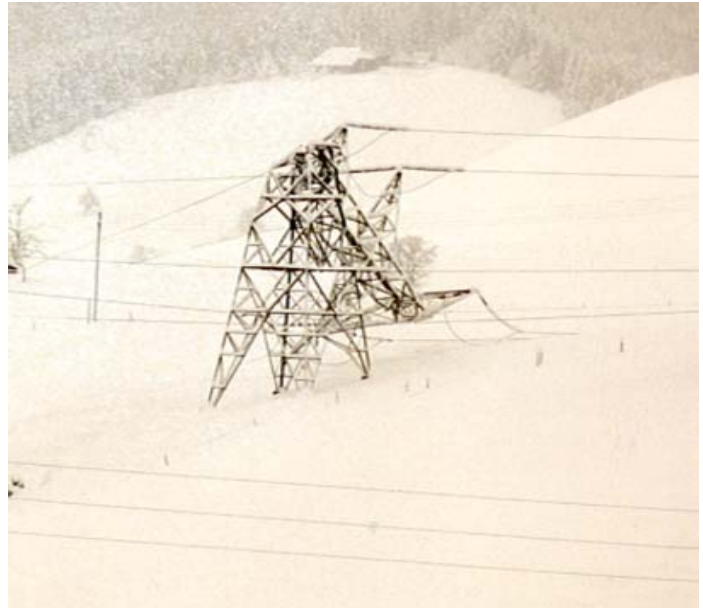


Abb. 3
Dieser Abspannmast wurde durch Torsionsbeanspruchung unterhalb der Ausleger geknickt.



Abb. 4

Dieser Tragmast (eine Spannweite vom Mast Abb. 3 entfernt) wurde durch Torsionsbeanspruchung instabil und stürzte anschliessend in Richtung der Windbelastung.

2 Entwicklung der Tragwerkbemessung in der Schweiz

Nach dem 1. Weltkrieg etablierten sich in der Schweiz viele grössere und kleinere Elektrizitätswerke und verteilten den Strom zunehmend auch in private Haushalte (Fachwerkmasten und Holzstangen)

1919 fühlte sich der Bundesrat genötigt, eventuell auch auf Druck der Räte, Richtlinien herauszugeben, die den Umgang mit Strom regelten und auch bereits Angaben für die Berechnung von Tragwerken enthielten.

Bereits ab 1922 wurden jedoch grössere 150 KV-Leitungen mit Spannweiten bis 300 m gebaut, so z. B. Mühleberg - Bassecourt oder Pieterlen - Rathausen. Die Leiter bestanden aus Stahlseilen, die mit einer oder zwei Lagen Aluminium-drähten umwickelt waren.

1933 erliess der Bundesrat die Bundesverordnung für Starkstromanlagen. In dieser Verordnung ist ein gewichtiges Kapitel dem Bau, der Berechnung und der Konstruktion von Leitungen gewidmet. In diesen Verordnungen waren auch Belastungsannahmen für Seile und Tragwerke sowie Berechnungsvorschriften für den Stabilitätsnachweis von Profilen geregelt. Als Material wurde lediglich Stahl St37 behandelt, eine Qualität wie sie in ähnlicher Art heute noch üblich ist und die den bis 1919 vorherrschenden Flusstahl ablöste. Das Eidgenössische Starkstrominspektorat ESTI hatte darüber zu wachen, dass die Vorschriften eingehalten wurden.

Nach dem 2. Weltkrieg kamen zunehmend bessere Stahlsorten auf den Markt.

Da die Tätigkeit im Leitungsbau, bedingt durch die Kriegserfahrungen und dem Aufschwung der Industrie, stark erweitert wurde, wollten die Elektrizitätswerke grössere Masten für grössere Spannweiten und damit auch besseren Stahl einsetzen.

Ende der 70'er Jahre hat die damalige Fachkommission 11 (FK11) des SEV (schweiz. Elektrotechnischer Verband) den Auftrag entgegengenommen, eine neue Leitungs-Verordnung aufzubauen. Nachdem 1985 ein Entwurf vom Bund zurückgewiesen wurde, weil er zu umfangreich war und 1986 ein Zweiter weil er zu stark gekürzt war, wurde eine Arbeitsgruppe für eine definitive Fassung eingesetzt.

Diese letzte Fassung wurde unter dem Namen „Verordnung über elektrische Leitungen“ oder den Abkürzungen „Leitungsverordnung“ oder „LeV“ am 30. März 1994 vom Bundesrat in Kraft gesetzt.

3 Grundlagen der Leitungsverordnung (LeV) im Hinblick auf die Belastungsannahmen und die Bemessung

3.1 Die Belastungsgrundlagen

Die statische und dynamische Belastung der Leitungsmaste besteht im Wesentlichen aus Windlasten auf Seile und Konstruktion, Schnee- oder Eislasten auf Seile und Konstruktion sowie Eigenlasten der Konstruktion, der Seile und der Befestigungsarmaturen.

3.1.1 Windkräfte:

Die Leitungsverordnung sagt nichts über die Windverhältnisse auf dem Gebiet der Schweiz aus. Die SIA Norm 160 [2] (Norm des schweizerischen Ingenieur- und Architektenverbandes) enthält jedoch Angaben, versehen mit einer Karte, in der für Windverhältnisse günstige und ungünstige Gebiete in der Schweiz markiert sind.

Die CENELEC [4] sehen vor, dass die Staaten oder die Leitungsbetreiber 10-jährige Untersuchungen vornehmen, die über die Belastungsgrößen an den einzelnen Standorten Auskunft geben. Mit probabilistischen Methoden werden die gemessenen 10-Jahres-Mittelwerte auf Böenspitzen oder Eiswalzen für 50, 100 oder 500 jährige Maximalwerte hochgerechnet. Diese bilden die Grundlage der Bemessung. Diese Werte müssen je nach Bauteil und der Windrichtung in Lasten umgerechnet werden.

Die SIA 160 [2] stützt sich ebenfalls auf langjährige Messwertreihen, verzichtet jedoch auf komplizierte Umrechnungen. In ihr wird ein Bemessungsgrundwert angegeben der je nach örtlicher Lage, dem Gebiet und der Bauwerkshöhe angepasst wird. Dieses Bemessungsverfahren genügt um sichere Bauwerke auf dem Gebiet der Schweiz zu erstellen bis auf eine Meereshöhe von ca. 2000 Meter ü.M. Um kompatibel mit den CEN-Dokumenten zu werden, hat die SIA in nationalen Zusatzdokumenten zur CEN-Vorschrift lediglich spezifizieren müssen, bei welcher Windgeschwindigkeit der Basiswert gerechnet wurde.

Die Leitungsverordnung hat für die Vereinfachung der Berechnung und für verschiedene Tragwerke Werte für die Windbelastung (Winddruck in N/m^2) angegeben. Eine Umrechnung in Werte nach CENELEC [4] ist nicht möglich. Die CENELEC [4] sieht jedoch vor, dass Länder auch Erfahrungswerte für Belastungen anwenden können. Von dieser Möglichkeit wird in der Schweiz Gebrauch gemacht.

Die Belastungstabelle der LeV sieht folgendermassen aus:

Lastannahmen für Starkstromfreileitungen

1 Windkräfte

1.1 Die Tragwerke, ihre Bestandteile und Fundamente müssen folgenden horizontalen Windkräften standhalten:

Winddruck in Abhängigkeit der Tragwerkshöhe in N/m²

Tragwerke	Höhe 0 bis 30 m	Höhe 0 bis 80 m	Teile über 80 m
vollwandige, flache Masten	1200	1450	1900
Gittermasten mit Winkelprofilen	1000	1200	1600
Gittermaste mit Rohrprofilen, Masten mit rundem oder annähernd rundem Querschnitt (6 oder mehr Kanten), Isolatoren und Luftpfeiler	700	850	1100
blanke Leiter, Ankerseile	500	650	850

Dass solche Annahmen der statischen Windlasten, auf welche Art sie auch entstanden sein mögen, in keiner Weise mit der Wirklichkeit des auftretenden Windes etwas zu tun haben, liegt auf der Hand.

In Wirklichkeit treten Böenspitzen auf sehr begrenztem Raum auf, deren Richtung und Intensität nicht vorauszusehen ist. Insbesondere sind die Windlasten auf die Seile eine sehr komplexe Angelegenheit, die in Normen nicht erfasst werden kann.

Mit andern Worten: die Ermittlung von Windlasten auf Tragwerke und Leiter wird nie vollständig erfassbar sein. Man bleibt auf theoretische Werte angewiesen, welche die in Wirklichkeit vorkommenden Windbedingungen genügend abdecken müssen. Die Konsequenz ist, dass, wenn schon Annahmen getroffen werden müssen, die der Wirklichkeit nicht entsprechen, diese möglichst einfach zu gestalten sind. Dieser Gedanke ist in der LeV umgesetzt, während in den CENELEC-Vorgaben [4] sehr unklare Verhältnisse herrschen.

Der Sturm „Lothar“ mit seinen extremen Windlasten hat bewiesen, dass die in der Schweiz zu Grunde gelegten Annahmen genügen. Dies gilt insbesondere für Leitungen mit Fachwerkmasten mit Spannweiten über 200m. Die Holzmastenleitungen sind wesentlich schwächer ausgelegt, was sich bei den Lothar-Schäden auch ausgewirkt hat.

An einigen Stellen in der Schweiz wurden auch Betonmastenleitungen, ohne Einwirkung von umgestürzten Bäumen direkt durch den Wind beschädigt. Diese Vorfälle sollten eingehend untersucht werden, insbesondere auch bezüglich der inneren Struktur der Betonmaste, der Betonqualität und der gesamten Leitungsauslegung.

Ein weiterer Aspekt bei dem sich der Wind auf die Leiter auswirkt, sind die Abstände zwischen Leiterseilen und gegenüber geerdeten Teilen.

3.1.2 Seilkräfte:

Im Grunde genommen sind die Seilkräfte das Wesentliche der Belastung einer Leitung. Die Belastungen (z.B. Wind), die unmittelbar auf Maste wirken und die zuweilen diejenigen der Seilkräfte übersteigen können, sind nur unumgänglicher Nebeneffekt.

Die Seilkräfte werden für die Berechnung in Horizontal- und Vertikalanteile aufgeteilt. Die Seilkräfte wirken nur in der Seilachse, die oben besprochenen Windkräfte auf Seile sind demnach keine Seilkräfte.

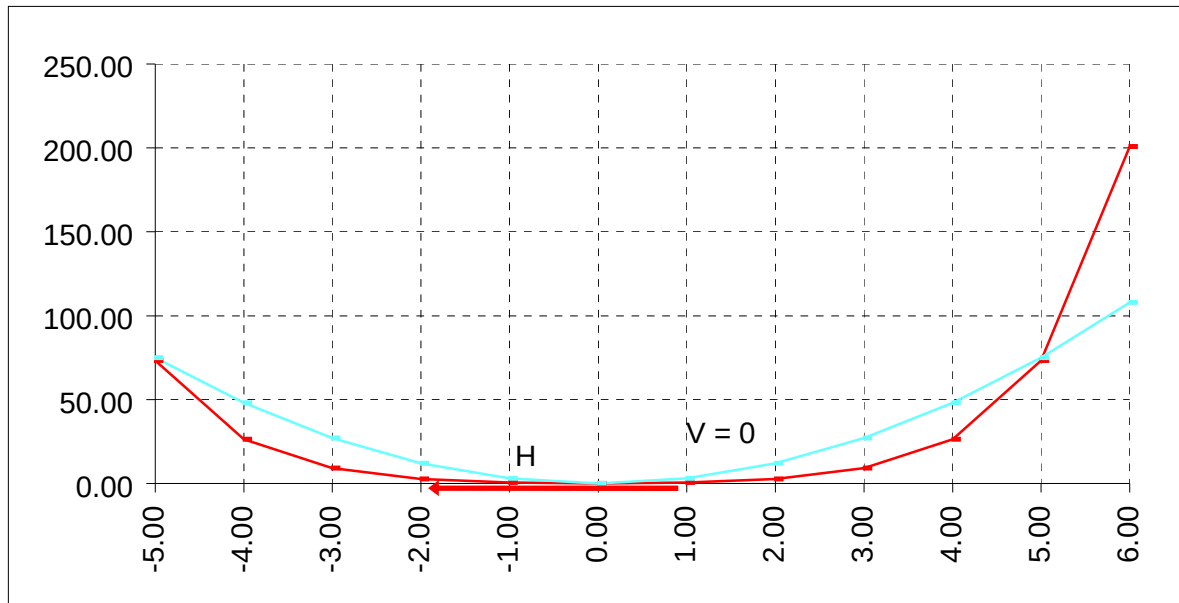


Abb. 5 Vergleich der Funktionen: Coshyp(x)-1 (x=-5 bis x=6), und $a \cdot x^2$

Im Scheitelpunkt existiert nur noch die Horizontallast die Vertikallast ist 0.

Im statischen Zustand ergibt sich aus $\sum H = 0$, dass die Horizontalkraft über die ganze Spannweite konstant sein muss (im Vergleich die blaue Kurve als quadratische Parabel, die Unterschiede sind markant).

Die Seilstatik, wie sie in der Schweiz angewendet wird, ist an und für sich eine sehr einfache Angelegenheit. Die wesentlichen Formeln wurden bereits 1936 von einem Ingenieur E. Maurer publiziert [5]. Später kamen nur noch einige verbesserte Formulierungen dazu, die die Berechnungen mit moderneren Hilfsmitteln erleichtern (Formeln siehe Anhang 1). Zu erwähnen ist auch, dass genauere Berechnungen mit iterativen Verfahren auf Computern vor allem in Deutschland angewendet werden. Die jedoch wegen den bereits erwähnten unerfassbaren Umgebungseinflüssen in der Praxis kaum bessere Resultate ergeben. Die Genauigkeit ist somit nur vorgetäuscht.

Die Windlast kommt in den Formeln nicht vor. Jedoch das spezifische Gewicht γ als Seilgewicht oder als Seilgewicht mit Zusatzlast (Schnee, Rauhref oder Eis). Das praktische Vorgehen in der Schweiz ist, dass Werte für γ_0 ein Wert p_0 bei einer Temperatur T_0 angenommen werden. Es werden darauf mit verschiedenen Temperaturen und Zusatzlasten die Spannungen p_i berechnet. Die Grundwerte werden normalerweise als Reglagewerte bezeichnet.

z. B. $p_{10} = 22$ bedeutet, dass bei einer Temperatur von 10 Grad C ohne Zusatzlast die Spannung im Seil 22 N/mm² beträgt. Aus den Spannungen p in verschiedenen Zusatzlast- und Temperaturzuständen können daraufhin die Seilkurven und Seillängen ermittelt werden.

In Anhang 2 ist eine Konsequenz der Windbelastung und der Seilstatik aufgezeigt, die in der Normung nicht berücksichtigt wird.

3.2 Die Belastungsannahmen

3.2.1 Tragwerksarten

In der Schweiz sind folgende Tragwerksarten definiert:

- Stützmasten
- Tragmasten
- Sondertragmasten
- Abspannmasten
- Endmasten

Jedem Tragwerksart ist eine Funktion in einer Leitung zugeschrieben. Auf Grund dieser Funktion können Lastfälle zugeordnet werden, die soweit es die Erfahrung zulässt, sicherstellen, dass die Funktion erfüllt werden kann. Es wird eine Leitung als ganzes gebaut und der Planer muss sich überlegen an welcher Stelle der Leitung welche Mastfunktion erforderlich ist. Dementsprechend wird er die einzelnen Mastarten in der Leitung anordnen.

Durch die der Mastart zugeordneten Belastungsannahmen kann einigermaßen sicher festgelegt werden, dass der Mast an diesem Standort den Beanspruchungen gewachsen ist und gleichzeitig wird verhindert, dass im Fall eines eventuellen Defektes ganze Leiterzüge zusammenbrechen.

Sicherheitstechnisch gesehen hat dieses Vorgehen, dass Leitungen als Gesamtbauwerk angesehen werden, sicher grosse Vorteile gegenüber dem Bau einer Leitung aus Einzelmasten an denen Leiter aufgehängt werden. Für das dicht besiedelte Gebiet der Schweiz dürfte sich der Mehraufwand für eine sicherer gebaute Leitung eher lohnen als z.B. für eine Leitung im Norden Kanadas, wo die Wahrscheinlichkeit, dass beim Zusammenbrechen einer Leitung ein Mensch getroffen würde, sehr gering ist.

3.2.2 Betriebliche Belastungsannahmen nach LeV

Die betrieblichen Belastungsfälle decken Belastungen ab, die durch äussere Einflüsse unter gewissen Umständen auftreten können. So sind Windkräfte unter Berücksichtigung der Seilzüge bei einer bestimmten Temperatur anzunehmen.

Ebenfalls sind bei Tragwerken Differenzen von Leiterzügen zwischen beiden Mastseiten bei maximaler Vereisung zu berechnen.

Werden Maste nach diesen Lastfällen gebaut, ist garantiert, dass sie Winkel-

züge der Leiter und Windlasten von ca. 140 km/h überstehen. Auch können Differenzzüge bei verschiedenen Temperaturen aus ungleich langen Spann-

weiten aufgefangen werden und dies auch wenn sich an den Leitern Eis- oder Rauhreifwalzen von 20 N/m Seil gebildet haben.

Dass, auch wenn die Temperaturdifferenzen oder die Zusatzlasten erhöht werden, diese Lastfälle nicht genügen, wurde bei den Leitungsbauingenieuren sehr früh erkannt, wobei anfänglich die Art der zusätzlichen Beanspruchung nicht klar war.

Die zusätzlichen Beanspruchungen treten durch ungleichmässigen Zug der einzelnen Leiter auf, was zu lokalen Überbeanspruchungen oder gefährlicher: für den Mast zu Torsionsbeanspruchungen führen kann.

Um solche zusätzlichen Beanspruchungen aufnehmen zu können, hat die CENELEC [4] relativ komplizierte Teilbelastungen der Leiter definiert.

Die LeV hat zu diesem Zweck die „Theoretischen Belastungsannahmen“ eingeführt.

3.2.3 Theoretische Belastungsannahmen

Die theoretischen Belastungsannahmen basieren auf den tatsächlich auf-

treten den Leiterzügen der Leitung und Temperaturen. Was theoretisch ist, sind die Mastbelastungen, die durch keinen Zustand der Temperatur oder von un-gleichen Eis- oder Rauhref-ansatz erklärt werden können. Sie sind „willkürliche“ Prozentsätze der Seilzüge.

Die angenommenen Seilkräfte in verschiedenen Angriffspunkten sollen nun die wirklichen Belastungen wie eine Hüllkurve umschliessen. Diese Belastungen sind für jede Tragwerksart derart vorgenommen, dass das Tragwerk seine Funktion in der Leitung erfüllen kann.

Da die tatsächlichen Belastungen nicht erfassbar sind, ist auch die LeV auf Er-fahrungen angewiesen. Dass diese Betrachtungsweise und die Lastannahmen im Wesentlichen ausrei-chen, wurde gerade durch den Sturm Lothar bewiesen, der trotz stärkerer als in der Norm vor-gesehenen Windlasten nur wenige Masten direkt beschädigen konnte. Dass keine Fachwerk-masten beschädigt wurden, liegt daran, dass für diese genügend Erfahrungswerte vorhanden sind, während für Betonmasten erst ca. 35 bis 40 Jahre Erfahrung zur Verfügung stehen.

3.3 Die konstruktiven Belange/Schadensbilder

3.3.1 Fachwerkkonstruktionen

Für den Nachweis, dass ein Bauteil oder das ganze Bauwerk seinen Belastungen standhält sind einerseits die Belastungen zu betrachten und diese sind zu vergleichen mit dem Wider-stand der das Bauteil oder das Bauwerk gegen diese Belastungen aufbringen kann.

In den SIA-Normen (160) [2] ist seit 1980 dieser Vorgang auf folgende Weise beschrieben:

$$S_d \leq \frac{S_r}{\gamma_r} \quad \text{oder für Maste gleichbedeutend:}$$

$$S_d \cdot \gamma_r \leq S_r$$

wobei S_d die äusseren Lasten vergrössert mit diversen Sicherheitsfaktoren darstellt, S_r der Widerstand des Bauteils und γ_r einen generellen Sicherheits-faktor für Material und die Quer-schnittswerte.

Die Berechnung erfolgt in der Schweiz nach den europäischen Knickspannungs-kurven (Abb. 6) oder den Formeln für Biegung mit Druckkraft, wobei auch gleichzeitiges Kippen berücksichtigt werden kann, im deutschen Sprachgebrauch das so ge-nannte Biegedrillknicken.

$$\frac{N_d \cdot \gamma_r}{N_k} + \frac{1}{1 - \frac{N_d}{N_{cr}}} \cdot \frac{\omega \cdot M_d \cdot \gamma_r}{M_R} \leq 1$$

Im Gegensatz zur Leitungsverordnung darf gemäss CENELEC [4] für die Stabilitäts-berechnung die Knicklänge in Eckpfosten und Diagonalen nicht reduziert werden. Bei gleichen Belastungen weisen daher Maste, die nach CENELEC [4] gerechnet sind leicht höhere Gewichte auf.

a $\alpha=0.21$				
b $\alpha=0.34$				
c $\alpha=0.49$				

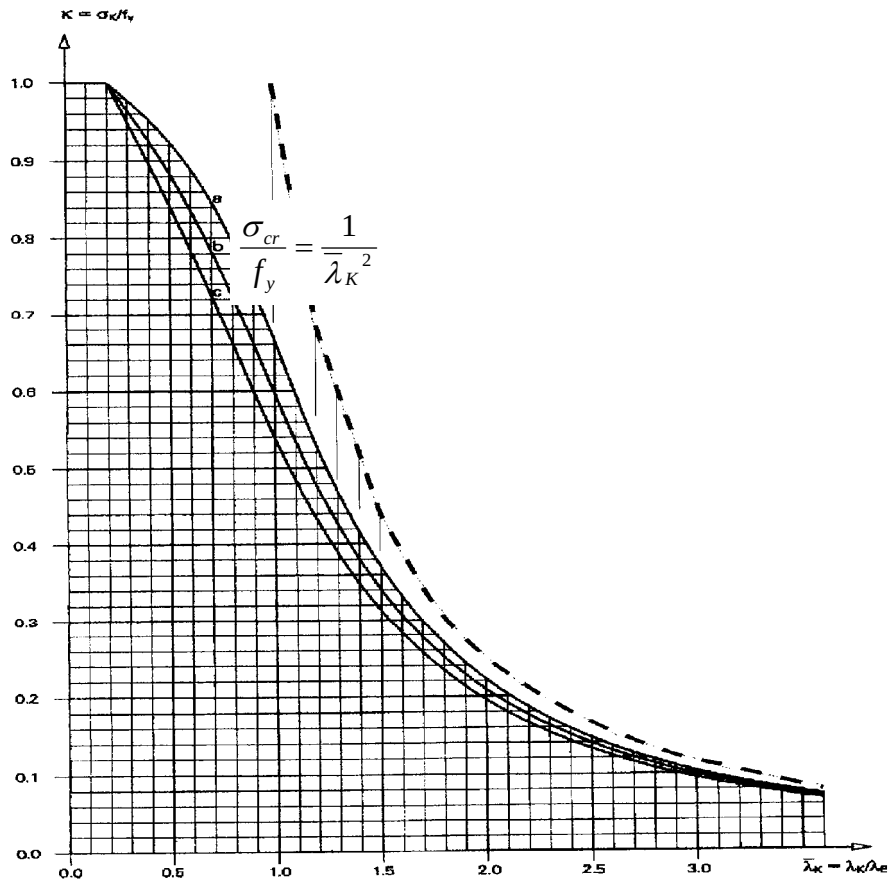


Abb. 6 Knickspannungskurven.

3.3.2 Mastdefekte

Im folgenden wird an einem Mast, der nur teilweise geknickte Stäbe aufweist, der Bruchvorgang aufgezeigt.

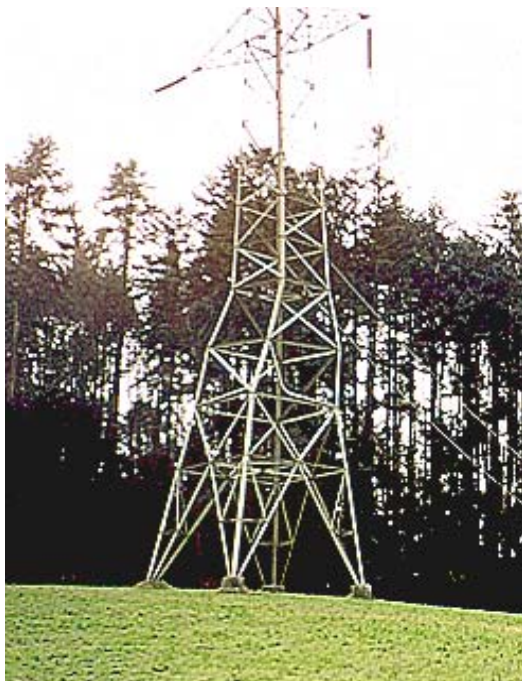
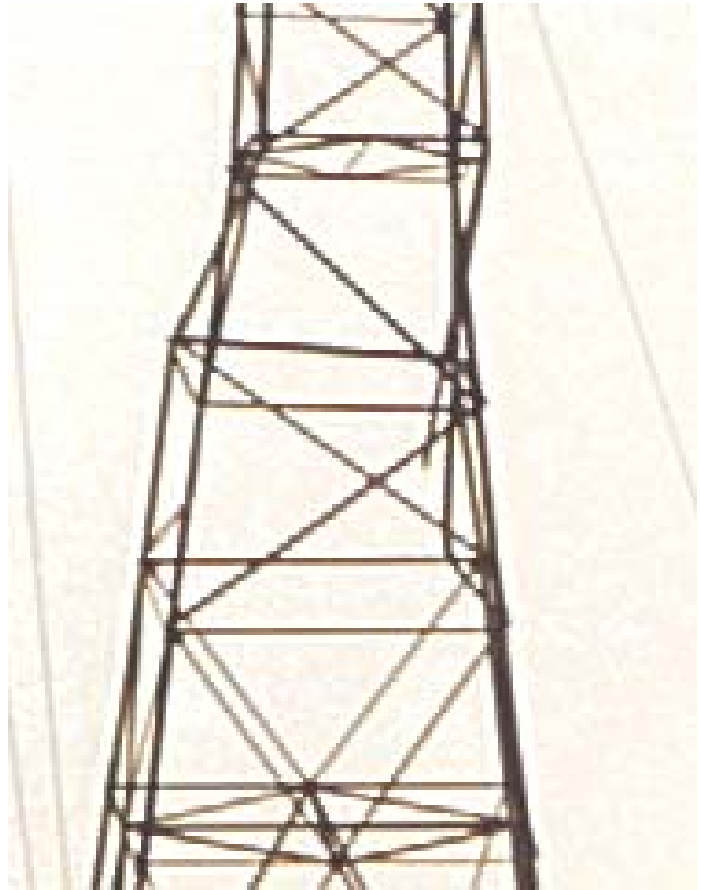
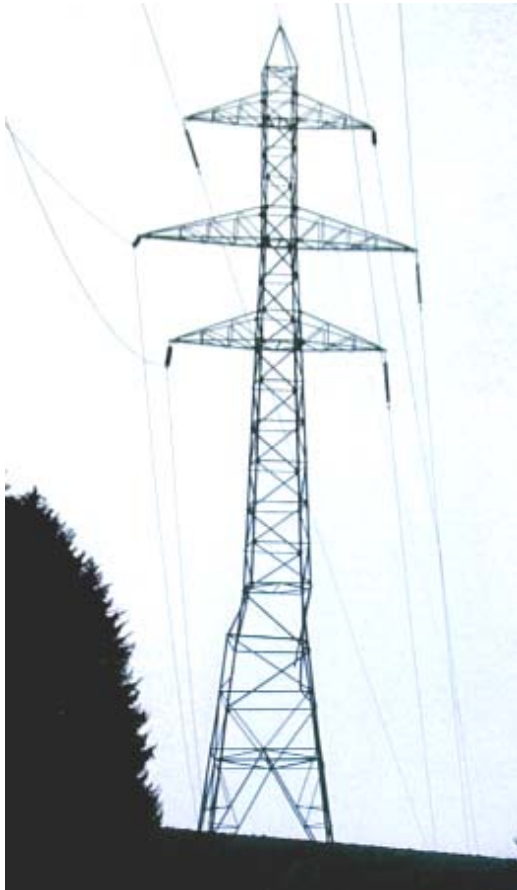
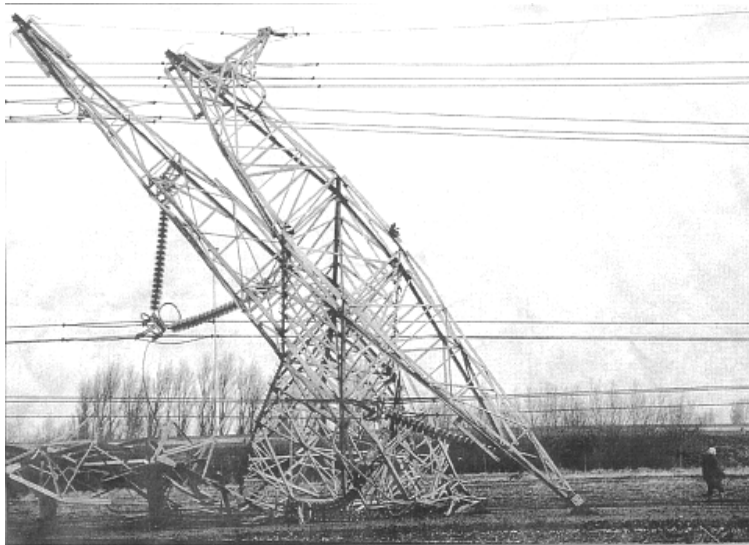


Abb. 7a,b,c

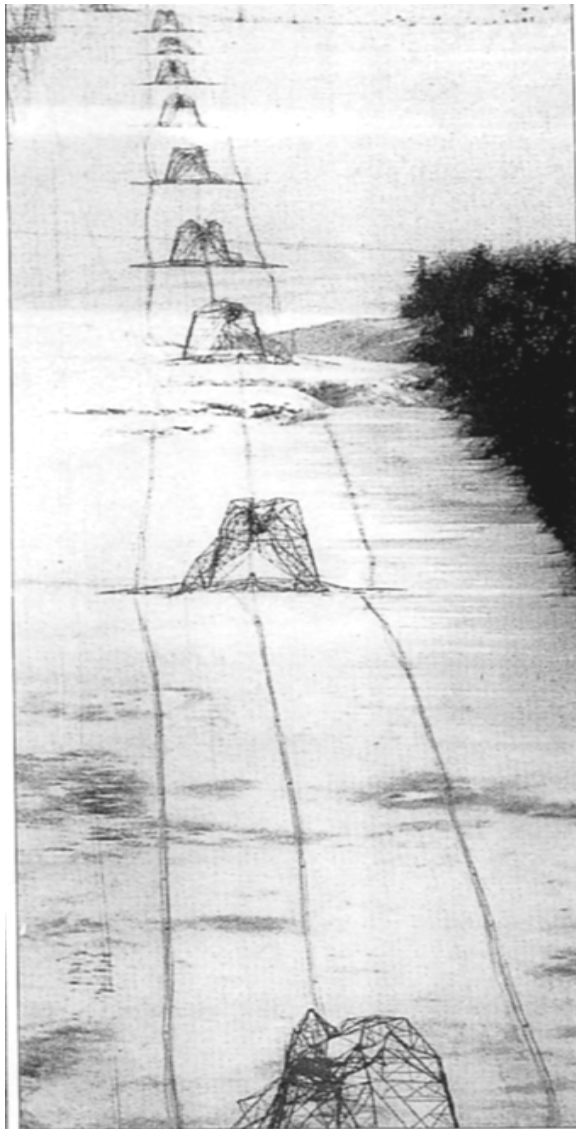
Der Mast ist durch die Seilkräfte auf die abgebildete Art deformiert worden. Der benachbarte Mast wurde durch umstürzende Bäume total zerstört. Weshalb dieser Mast stehen geblieben ist, kann nicht erklärt werden. Deutlich zu sehen ist eine abgerissene und eine ausgeknickte Diagonale. Die Knicke in den Eckpfosten sind Sekundärreaktionen. Der Oberteil des Mastes konnte unversehrt demontiert werden und nach Montage eines neuen Zwischenstückes problemlos wieder montiert werden, trotz Schachtelstößen. Das Baujahr der Füße und des Säulenoberteils ist 1924 der Rest wurde während den Kriegsjahren und später noch einmal 1973 teilumgebaut.



Saint-Omer-Chapelle an der französischen Kanalküste

Abb. 8

Ein Beispiel aus Frankreich, Füsse und Untersatz mochten den Belastungen nicht standhalten. Die Ursache dürfte eine Torsionsbelastung sein.



südlich Montreal (Canada)

Abb 9

Dieses Beispiel aus CANADA zeigt eine Leitung, die infolge von Zusatzlasten zusammenbrach. Offensichtlich waren nicht nur die einzelnen Masten zu schwach, sondern auch die ganze Leitung war zu schwach ausgelegt. Diese Situation dürfte in der Schweiz bei Gittermasten-leitungen nicht auftreten. Der Leitungsdefekt basiert auf einer über längere Strecken nicht verankerten Leitung. Die Ueberlastung führt zu einem Domino-Effekt.

3.3.3 Betonmasten

Die Betonmasten brauchen in konstruktiver Hinsicht nicht stark diskutiert zu werden.

Im Gegensatz zum Ausland ist es in der Schweiz den Herstellern für den Nachweis bis zu einer gewissen Masthöhe erlaubt die sog. EMPA - Formel anzuwenden, dies jedoch unter Beachtung eines grösseren Sicherheitsfaktors.

Die EMPA - Formel ist die Berechnung eines Momentenwiderstandes bei voll plastifiziertem Querschnitt am runden Mast wobei Normalkräfte und Einflüsse 2. Ordnung nicht berücksichtigt werden. Die Berechnung wurde in den 50'er Jahren nach Versuchen an der EMPA im Auftrag der Fa. SACAC in Lenzburg ausgearbeitet und ist seither vom ESTI anerkannt.

Bei Betontragwerken können über die Qualität und die Einhaltung der Vorschriften ohne zerstörende Prüfung keine genügenden Aussagen gemacht werden.



Abb. 10 Bei Betontragwerken ist es relativ schwierig grössere Torsionskräfte zu übertragen, weshalb die hauptsächlichsten Defekte auch Torsionsdefekte darstellen.



Abb. 11

Bei diesem Mast in Italien ist die Festigkeit nicht mehr gegeben. Die Ursachen können im schlechtem Beton oder in einem ungenügendem Fabrikationsvorgang liegen.

3.4 Stahlvollwandmasten

Die Statik und die Bemessung von Rohren und mehreckigen Stahltragwerken ist bekannt [2] und muss nicht speziell erwähnt werden.

Ein Problem, das bei Stahlvollwandmasten bis heute nur teilweise gelöst wurde, ist das Beulen. Beulen ist ein statischer Stabilitätsfall für Scheiben und ist für vieleckige Querschnitte gelöst. Die Vorstellungen nach DIN, CENELEC und SIA weichen wenig voneinander ab. In der Schweiz gilt die Berechnung seit 1980 [2]. Die übrigen europäischen Staaten haben sie etwas später eingeführt oder haben die Einführung noch vor sich.

Das Beulen von Kreisquerschnitten mit kleinen Wanddicken ist dagegen weniger erforscht. In den 30'er - Jahren hat ein niederländischer Ingenieur, J. Plantema für das Militär der USA Versuche vorgenommen und Berechnungsansätze ausgearbeitet [9]. Für Rohre, die auf Druck beansprucht werden, konnte die Theorie allgemein in die Berechnung Eingang finden. Für Rohre, die auf Biegung beansprucht sind, ist die Berechnung von Plantema nicht anwendbar.



Abb. 11

Durch Biegebeanspruchung eingebeultes dünnwandiges Rohr, mit einer sehr ausgeprägten Beulform.

Da allgemein ein kleines Interesse an dieser Problematik herrschte, wurden erst wieder in den USA in den 50'er Jahren Versuche durchgeführt, diese jedoch nicht veröffentlicht. Die ASCE

[3] hat in einem Tagungsskript die Versuche mitsamt einem Lösungsansatz veröffentlicht (siehe Anhang 3).

4 Schlussfolgerungen

Wie aus den Ausführungen hervorgeht, sind die Tragwerkbelastungen wie sie in der Natur vorkommen nicht erfassbar. Die Belastungsannahmen für Tragwerke sind damit eher willkürlich und theoretisch. In der Schweiz hat sich aber gerade in den vergangenen Jahren gezeigt, dass unsere Belastungsannahmen den Anforderungen genügen.

Da die Belastungsannahmen und die damit verbundenen Sicherheitsfaktoren eine grosse wirtschaftliche Bedeutung haben, kann gesagt werden, dass in der Schweiz wirtschaftlich und trotzdem sicher gebaut wird.

Bei einer zu grossen Sicherheitsmarge wären bei Extrembeanspruchungen (z.B. Sturm Lothar) eventuell keine Masten zu Schaden gekommen, dafür wären alle übrigen zu stark gebaut. Beim Abbau der Sicherheit könnte zwar billiger gebaut werden, die Schäden würden bei seltenen Naturereignissen jedoch unverhältnis-mässig anwachsen. Aus dieser Sicht stellen die vorhandenen Vorschriften der LeV einen optimalen Kompromiss dar.

Trotzdem soll hier aufgezeigt werden, wie Verbesserungen an der LeV vorgenommen werden könnten:

1. Die Formulierungen und die Wertangaben für Belastungen sollten in der LeV derart sein, dass sie kompatibel zu den CENELEC-Dokumenten werden.
2. In der LeV sollten die Gebiete mit erhöhten oder verminderten Windbelastungen oder Schneebelastungen wie sie in den Normen der SIA angegeben sind, berücksichtigt

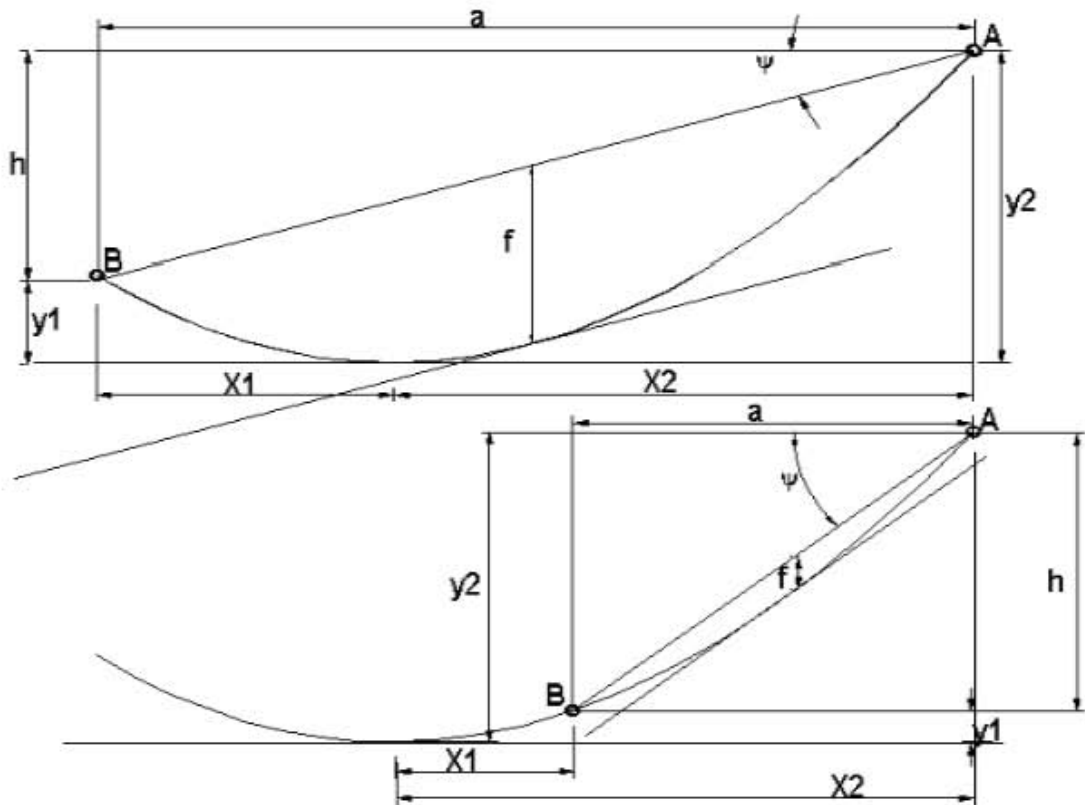
werden, wobei keinesfalls die Werte der SIA - Normen übernommen werden dürfen. Die SIA hat nicht die gleiche Sicherheitsvorstellung ihrer Bauwerke wie die Betreiber von Energieübertragungsleitungen.

Zitierte Literaturstellen und weiterführende Unterlagen:

- [1] Leitungsverordnung vom 30. März 1994
- [2] SIA 160, 161, 162
- [3] ASCE (american society of civil engineers)
- [4] Design of steel transmission pole structures, meeting preprint 2021
- [5] CENELEC Overhead electrical lines exceeding 45 kV, fourth pre-draft
- [6] Sonder-Abdruck SEV-Bulletin 1936 No. 2 und 3
- [7] DAST - Richtlinie 013
- [8] Stahlbauhandbuch 1, 2
- [9] DIN 18 800 Teil 1,2,3
- [10] Collapsing stresses of circular cylinders and round tubes: Ir. F. J. Plantema
- [11] Formulas for stress and strains: Raymond J. Roark and Warren C. Young
- [12] ECCS (european convention for construction steelwork), TC 8 , structural
- [13] stability,
- [14] Recommendations for angles in lattice transmission towers (No 39, 1985)
- [15] CIGRÉ 2000, Group 22, Overhead lines

ANHANG 1

Seilstatik Formeln: $p = \frac{H}{A}$ (Spannung) und $\gamma = \rho \cdot A \cdot g$ (spez. Gewicht / m')



Zustandsgleichung:

$$p^3 + p^2 \cdot \left[\frac{\gamma_0^2 \cdot a^{*2} \cdot E}{24 \cdot p_0^2 \cdot u} + \Delta T \cdot \alpha \cdot \frac{E}{u} - p_0 + r \cdot \frac{E}{u} \right] = \frac{\gamma_1^2 \cdot a^{*2} \cdot E}{24 \cdot u}$$

wobei:

$$a^{*2} = \frac{\sum_1^n a^3 \cos \psi}{\sum_1^n a} \quad \text{und} \quad u = \frac{\sum_1^n \frac{a}{\cos \psi}}{\sum_1^n a}$$

und:

$$l = \sqrt{h^2 + \left(2c \cdot \sinh \frac{a}{2c} \right)^2}$$

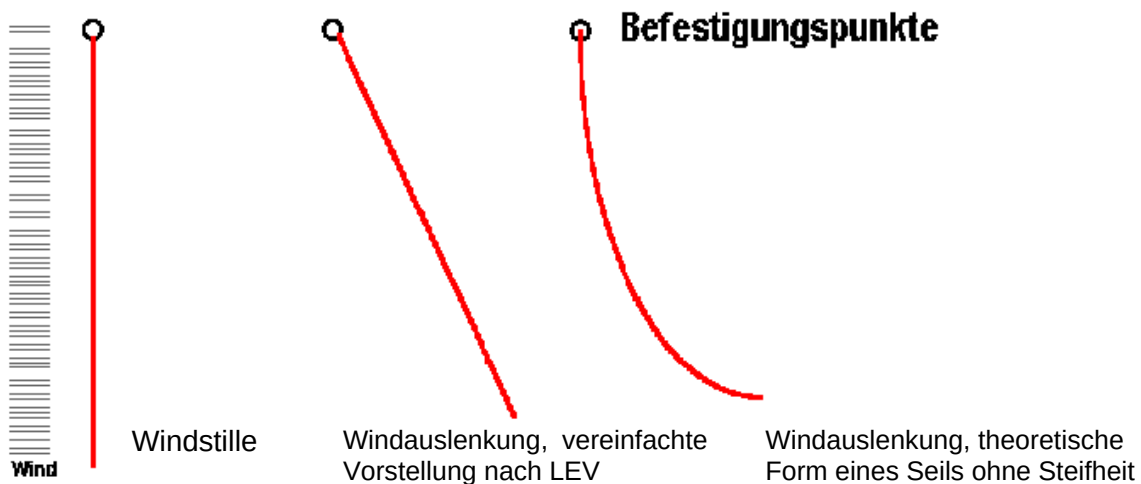
und $c = \frac{p}{\gamma}$ der Inkreisradius der Seilkurve im Scheitel

$$f = 2c \cdot \sinh^2 \left(\frac{x}{2c} \right)$$

ANHANG 2

Interessant werden die Formeln der Seilstatik, wenn mit ihnen verschiedene Temperaturen mit verschiedenen Spannweiten und Geländeneigungen untersucht werden. Sehr oft verhalten sich die Seilkräfte entgegen dem „gesunden Menschenverstand“.

Wird eine Spannweite in Längsrichtung der Leitung betrachtet, ergibt sich zum Beispiel für gleich hohe Abspannpunkte folgendes Bild:



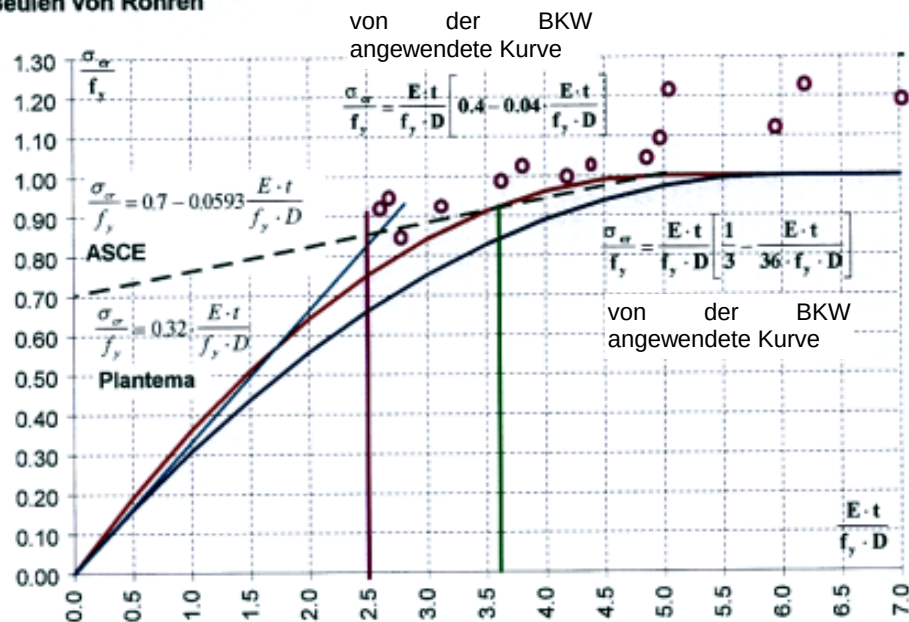
Im mittleren Bild die Annahme der Auslenkung nach LeV oder auch den meisten andern Vorschriften. Unter der sehr unwahrscheinlichen Annahme, dass der Wind über die ganze Spannweite konstant weht, müsste die Seilform eher wie rechts dargestellt aussehen. Der obere Ausgangswinkel hängt von der Vertikal- zur Windkraft ab. Im untersten Punkt der Seilkurve muss theoretisch die Tangente horizontal verlaufen, da die Vertikalkraft immer 0 ist.

Wegen der Torsions- und Biegesteifigkeit der Seile ist aber auch diese Annahme nicht zutreffend. Zudem ist das Auftreten eines gleichmäßig blasenden Winds über eine Breite von 300 m bis 400 m unrealistisch.

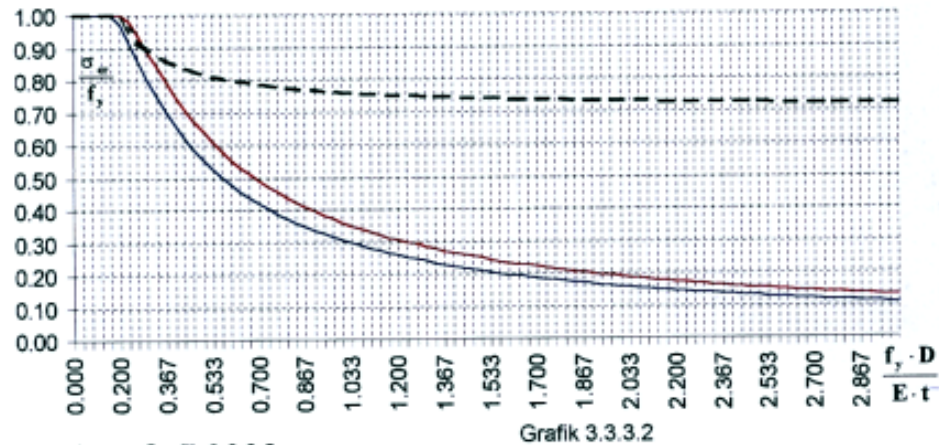
ANHANG 3

Der grüne Vertikalstrich gibt die Gültigkeitsgrenze der CENELEC-Theorie an.

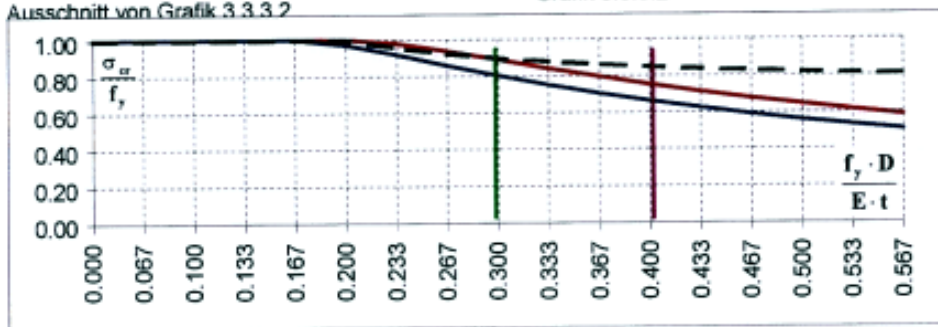
Beulen von Rohren



Darstellung nach CENELEC Rev. 4



Ausschnitt von Grafik 3.3.3.2



Utilisation de solutions compactes pour des lignes aériennes 400 kV

(Einsatz von Kompaktlösungen für 400-kV-Hochspannungsfreileitungen)

Michel Ammann, EOS, Lausanne

Dans le cadre de la construction de son réseau 400 kV, eos a eu l'opportunité de développer et d'appliquer dans les deux cas suivants des solutions avec des pylônes compacts.

Le premier cas en 1990 a été la mise en place au départ du poste de Romanel sur la ligne 380/132 kV Romanel-Yverdon d'un pylône "raquette". Le pylône a été développé pour des raisons essentiellement esthétiques à la demande des autorités communales. Ce type de pylône permet une réduction de l'emprise de la ligne ainsi qu'une réduction de l'impact visuel.

Le deuxième cas est un tronçon de ligne d'environ 1 km formé de 3 pylônes compacts, de type bidimensionnel, à deux montants, équipés de consoles isolantes.

La contrainte consistait à construire pour ce tronçon la nouvelle ligne 380/132 kV avec une emprise similaire à celle de l'ancienne ligne 125 kV.



Fig. 1 Pylône „raquette“

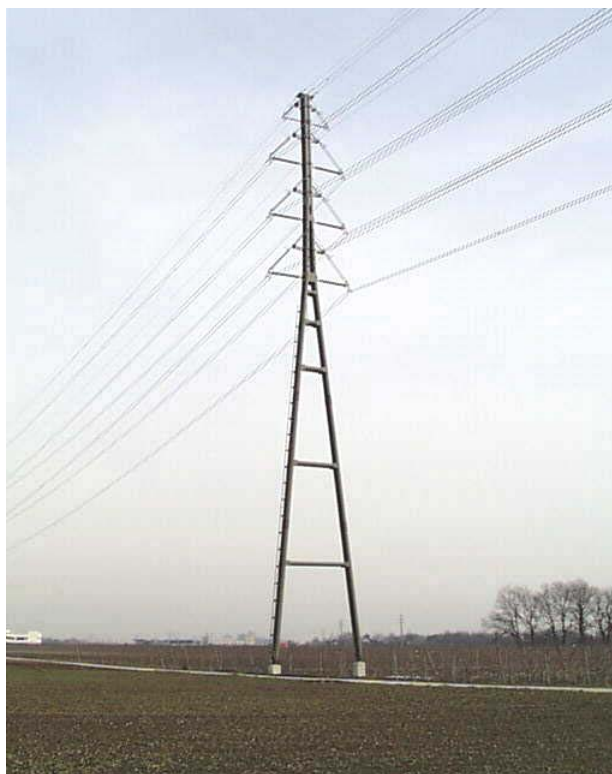


Fig. 2 Pylône compacte

Trassewahl zur Vermeidung von Lawinenschäden

M. Schaer*, W. Ammann*, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos

Einführung

Übertragungsleitungen im alpinen Gelände sind verschiedenen Einwirkungen durch Schnee und Lawinen ausgesetzt. Dabei sind sowohl die Masten, wie auch die Seile betroffen. Der Lawinenwinter 1998/99 hat zu zahlreichen Schäden mit vielen direkten wie indirekten Folgekosten geführt (vgl. SLF2000, Abb 1). Die Einwirkungen durch Schnee und Eis auf Hochspannungsleitungen umfassen:

- Lawineneinwirkungen
- Schneedruck
- Rauhreif- und Eisbehang
- Bodenbewegungen und Kriechdrücke in Gebieten mit Permafrost

Die Abwehr von Schäden verlangt genaue Kenntnisse des räumlichen Umfanges und der Intensität der verschiedenen Einwirkungen.



Abb. 3 Zerstörter Strommast in Engi (GL). Foto NOK.

Lawinen

Lawinen können Kräfte entwickeln, welche – vor allem für die Seile – mit konstruktiven Mitteln nur sehr schwer beherrschbar sind. Daher wird die Trassewahl von Freileitungen im Gebirge oft imperativ durch die Lawinengefährdung diktiert. Bei Lawinen unterscheidet man zwischen Fliesslawinen und Staublawnen.

* Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Flüelastrasse 11, 7220 Davos

Fliesslawinen

Fliesslawinen bestehen aus Schollen, die während der Bewegung mit dem Boden in Kontakt bleiben. Die Dichte einer Fliesslawine beträgt bis 300kg/m^3 .

Die Grösse und Intensität von Fliesslawinen werden von der Grösse und Neigung des Anrissgebietes, der Neuschneehöhe sowie der Art (offen oder kanalisiert) und Neigung der Sturzbahn bestimmt.

Im Bereich von Rinnen und Runsen ist die seitliche Ausdehnung von Fliesslawinen oft behindert und deshalb gut festzustellen. Lawinen, welche seitlich nicht geführt werden, können oft überraschend grosse und scheinbar unmotivierte Richtungswechsel vollführen (Siehe Abbildung 2). Fliesslawinen erreichen in Runsen Fliesshöhen von bis 20m und Fliessgeschwindigkeiten von über 50m/s. Spitzendrücke von bis 2000kN/m^2 sind hier möglich.

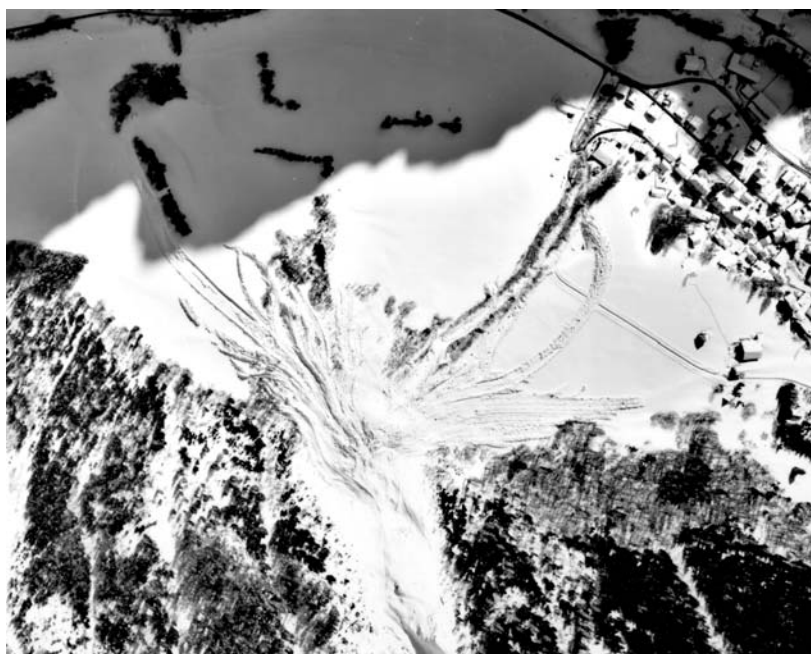


Abb. 2
Lawine in Vättis (SG): Deutlich zu erkennen die starken Ablenkungen im Auslaufgebiet. Luftbild L&T.

Staublawinen

Staublawinen bestehen aus einer aufgewirbelten Schneewolke, die sich stiebend durch die Luft bewegt. Die Dichte ist viel kleiner und die Fliesshöhe grösser als bei Fliesslawinen. Staublawinen erreichen Frontgeschwindigkeiten von über 80m/s und Dichten bis 10kg/m^3 . Die Staubwolke kann Höhen von 400m erreichen.

In grösseren Lawinenzügen können sich ab mittleren Höhenlagen fast immer gemischte Fliess-Staublawinen bilden. Staublawinen entstehen immer aus Fliesslawinen (oder Eislawinen): Aus Schneeknollen, die an der Oberfläche der Fliesslawine hüpfen, bildet sich eine Schneewolke, welche aufgrund ihrer Schwerkraft zu Tal fliesst und weiteren Schnee aufnimmt. Die Intensität von Staublawinen hängt von folgenden Grössen ab: Sturzbahnneigung, Grösse der ursprünglichen Fliesslawine, Länge der Sturzbahn, Schneeigenschaften. Der Wirkungsbereich und die Grösse von Staublawinen sind auch von erfahrenen Lawinenexperten oft nur schwer zu quantifizieren. Die Analyse von Vegetation und sogenannten stummen Zeugen im Gelände, von Hinweisen in Katastern und Archiven sowie numerische Berechnungen ist unabdingbar. Das SLF konnte in den letzten Jahren verschiedene Staublawinenereignisse analysieren und so neue Computerprogramme validieren. Es ist nun in der Lage, ein- sowie dreidimensionale Berechnungen von Staublawinen durchzuführen. Das kommerziell erhältliche SLF-Programmpaket AVAL-1D zur Berechnung von Fliess- und Staublawinen enthält ein eindimensionales Staublawinenprogramm (SLF1999, Abb. 3).

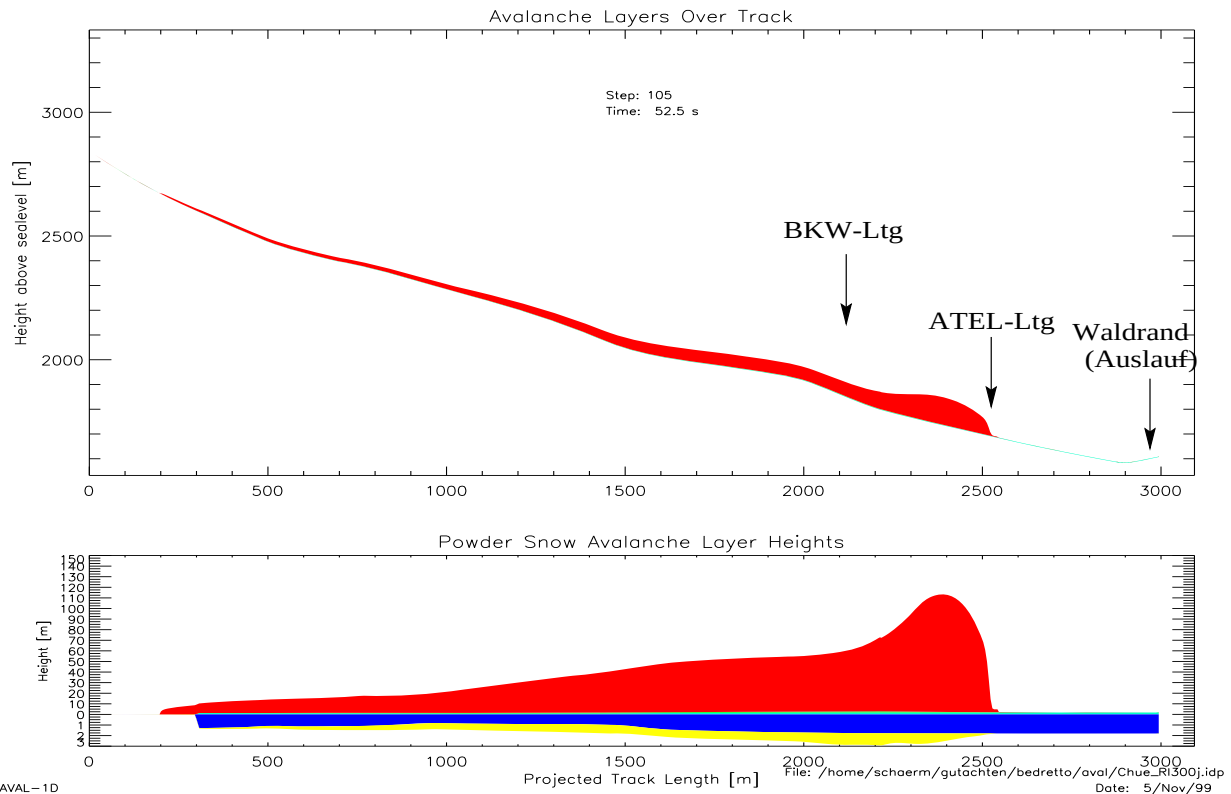


Abb. 3: Berechnung einer StaUBLawine mit AVAL-1D: Visualisierung der Lawine beim Erreichen einer Hochspannungsleitung (All'Acqua, V. Bedretto (TI)) .

Der unterste Bereich von StaUBLawinen besteht aus einer – bis einige m dicken – Schicht von hüpfenden Schneeknollen, welche aus der Fliesslawine herausgeschleudert oder aus der Schneedecke gerissen wurden. Diese Schneeknollen können eine Grösse von über einem halben Meter erreichen und beim Aufprall auf Hindernisse Stossdrücke bis 1500kN/m^2 mit ca. 10ms Dauer hervorrufen (SCH2000) .

Schneedruck

(Abb. 4) Die Grösse von Schneedruckwirkungen hängt von folgenden Faktoren ab (SLF1990): Hangneigung, Schneehöhe, Bodenbeschaffenheit, Exposition und Höhenlage. In extremen Lagen können auf Masten durchaus Schneedrucke von mehreren hundert kN/m^2 auftreten.

Rauhreif- und Eisbehang

Die dramatischen Auswirkungen, welche Reif- und Eisbildung auf die Stromversorgung haben kann, wurden 1997 in Nova Scotia (Canada) sichtbar. Die wichtigsten Faktoren bei der Bildung von Rauhreif sind feuchte Luft (Nebel) sowie Wind. Die Gefahr von Rauhreifbehang wird meist wenig Konsequenzen auf die Trassewahl haben: Extreme Rauhreifstandorte wie Bergsättel können allenfalls gemieden werden.

Fundationen im Permafrost

Permafrost kann bei hochgelegenen Fundationen zu Problemen infolge von Kriechbewegungen führen. Einflussfaktoren für das Auftreten von Permafrost sind Sonneneinstrahlung (insbesondere die Hangexposition), Höhenlage, Windverhältnisse, Oberflächenbeschaffenheit und Schneeverhältnisse. Haeberli entwickelte eine einfache Methode um abzuschätzen, wo Permafrost auftritt (HAE1975). Die Möglichkeiten und Methoden, um im alpinen Permafrost Bauwerke zu fundieren, waren Inhalt des SLF-Forschungsprojektes "Lawinenverbauungen im Permafrost" (STO1995, THA1999).



Abb. 4: Schneedruckschaden: Ein Mastfundament der Bergbahnen Elm wird durch die gleitende Schneedecke mehr als 8m weg gedrückt. Foto: S. Margreth, SLF.

Wiederkehrdauern

Lawinen, Schneedruck, und Reif sind abhängig von der betrachteten Wiederkehrdauer. Während die Grösse von Fliesslawineneinwirkungen und Schneedruck in der Regel langsamer wächst als die Wiederkehrdauern, kann mit länger werdender Wiederkehrdauer die Intensität von Staublawinen sehr stark ansteigen.

Üblicherweise werden das „normale“ Ereignis mit ca. 30 Jahren Wiederkehrdauer sowie das „aussergewöhnliche“ Ereignis mit 200 bis 300 Jahren Wiederkehrdauer unterschieden.

Die Planung von Lawinenschutzmassnahmen verlangt immer, dass die minimale tolerierbare Wiederkehrdauer von Schäden festgelegt wird. Dieses Schutzziel kann bei derselben Leitung durchaus örtlich variieren (Kostenwirksamkeitsüberlegungen).

Trassecwahl

Bei der Planung sind in einem ersten Schritt allfällige *Gefahrenzonenpläne* und das *Lawinenkataster* zu konsultieren. *Geländebegehungen* erlauben eine wesentlich detailliertere Geländebeurteilung als Kartenunterlagen und alte Lawinenspuren können zudem festgestellt werden. Die *Geländebeurteilung* umfasst die Ausscheidung von Anrissgebieten, das Festlegen von Sturzbahnen, die Neigungs- und Expositionsanalyse u.a.m. *Klimatische Verhältnisse* sowie *Lawinenarten und -wiederkehrdauern* müssen abgeschätzt werden. Mit *lawinentechnischen Berechnungen* lassen sich Lawineneinwirkungen quantifizieren. Schliesslich müssen die Ergebnisse durch den Lawinensachverständigen *abschliessend beurteilt* werden.



Abb. 4
Künstlich ausgelöste Staublawine im Vallée de la Sionne. Der Mast, welcher an der Lawinenfront sichtbar ist, hat eine Höhe von 21m.

Grosse potentielle Staublawinenzüge bestimmen oft die generelle Linienführung: Staublawinen können bis in grössere Höhen Kräfte entwickeln, auf die Freileitungen nicht mehr bemessbar sind (Abb.4). Nicht immer führt bei solchen Fällen die Vergrösserung des Bodenabstandes der Leiterseile weiter, da die Lawinenkräfte oft langsamer abnehmen als die Momente an den Masten zunehmen. Wo ein Ausweichen auf die andere Talseite nicht möglich ist, kann das Trasse eventuell höher oben an der Bergflanke geführt werden: Die Höhe von Staublawinen nimmt entlang der Sturzbahn generell zu.

Als nächstes sind möglichst lawinensichere Maststandorte festzulegen: Im allgemeinen sind solche Standorte auch bezüglich Schneedruckeinwirkungen günstig. Wenn keine sicheren Standorte gefunden werden können, ist es oft zweckmässig, die Masten in Gelände zu platzieren, das über 20-22° geneigt ist: Hier ist im allgemeinen nicht mit grossen Ablagerungshöhen zu rechnen und die notwendige Wirkungshöhe von Schutzmassnahmen bleibt beschränkt.

Freileitungen können auch durch kleinere Staublawinen und Staublawinen vom Gegenhang gefährdet werden: Diese Gefährdung ist nicht immer leicht erkennbar, Einwirkungen können weit über den Talboden oder sogar eine bedeutende Strecke am Gegenhang hinaufreichen.

Schutzmassnahmen

Es muss nach dem Ort der Einwirkung unterschieden werden:

Fundament, Fundamentsockel oder Schutzkeil: Masten lassen sich durch verstärkte Bauweise, vorgebaute Lawinenkeile oder mittels erhöhten Fundamentsockeln gegen Fliesslawinen verstärken. Direktschutz aus Beton bewährt sich gegenüber Stahlkonstruktionen allgemein besser .

Unterer Mastbereich: Der untere Mastbereich kann im Bereich der Saltationsschicht zu liegen kommen. Hier sind schlanke oder dünnwandige Profile zu vermeiden, sonst können punktuelle Stösse zu Deformationen mit nachfolgendem Beul- oder Knickversagen führen.

Oberer Mastbereich / Seile: Um die auftretenden Kräfte auf die Seile zu minimieren, sind wenn möglich Zwillings- oder Drillingsleiter durch Einfachleiter zu ersetzen. Unseres Wissens bisher noch nicht näher untersucht wurde die Möglichkeit, Lawinenschäden zu begrenzen, indem

durch Sollbruchstellen in den Leitern verhindert wird, dass Masten durch die Seile umgerissen werden.

Bemessung

Bei der Bemessung ist es wichtig, die Dauer und Art der Einwirkungen zu berücksichtigen.

- Fliesslawinenkräfte werden normalerweise als stationäre Lasten betrachtet. Sie sind proportional zur Schneedichte und dem Quadrat der Lawinengeschwindigkeit.
- Staublawinenwirkungen werden wie Windlasten gemäss der Norm SIA160 behandelt. Bauwerksschwingungen, dem plötzlichen Abwerfen von Reifbehang sowie Querschnittsveränderungen durch Reifbehang ist bei der Bemessung auf Staublawinen speziell Beachtung zu schenken.

-Im Wirkungsbereich der Saltationsschicht sind die Bauteile auf einzelne Kraftstösse zu dimensionieren.

Bei der Ermittlung von Lastkombinationen für die Bemessung muss die Wahrscheinlichkeit des gemeinsamen Auftretens verschiedener Belastungen durch einen Sachverständigen abgeschätzt werden. Er hat fallweise festzulegen, welche Einwirkungen als Leiteinwirkung gelten, und mit welchen Lastfaktoren die Begleiteinwirkungen zu berücksichtigen sind.

Aktuelle Forschungen

Bei der Beurteilung von Risiken durch Schnee und Lawinen bestehen noch viele Unsicherheiten, welche das SLF in verschiedenen Projekten untersucht. Nachfolgend seien einige Beispiele erwähnt:

- Systematische Erfassung und Analyse von Schadenereignissen.
- Messungen an künstlich ausgelösten Grosslawinen im europäischen Lawinenversuchsgelände Vallée de la Sionne.
- Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit von Lawinenschutzmassnahmen
- Erforschung der Zusammenhänge zwischen Wiederkehrdauer und Grösse von Lawinen.

Weitere Informationen sind auf der Homepage des SLF unter www.slf.ch erhältlich.

Referenzen:

- BUW1990 BUWAL, Eidgenössische Forstdirektion; WSL, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung (Hrsg.) 1990: Richtlinien für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet. 73S. Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale (EDMZ), 3000 Bern.
- HAE1975 Haeberli, W. 1975: Untersuchung zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch (GR), ETH Zürich, VAW Mitteilung Nr. 17.
- SCH2000 Schaer, M., Issler, D., (im Druck) Particle densities, velocities, and size distributions in large avalanches from impact-sensor measurements. Cambridge, J. of Glaciology Vol. 32.
- SIA160 SIA (Hrsg.) 1990: Norm SIA 160. Einwirkungen auf Tragwerke. Zürich, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein.
- SLF1999 Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (Hrsg.) 1999: Neue Berechnungsmethoden in der Lawinengefahrenkartierung. 261S. Davos, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung.
- SLF2000 Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (Hrsg.) 2000: Der Lawinenwinter 1999. Ereignisanalyse. Davos, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung. 588S.
- STO1995 Stoffel, L. 1995: Bautechnische Grundlagen für das Erstellen von Lawinenverbauungen im alpinen Permafrost. 171S.
- THA2000 Thalparpan, P. 2000: Lawinenverbauungen im Permafrost. Davos, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung. 92S. Davos, Eidg. Insitut für Schnee- und Lawinenforschung, Flüelastrasse 11, 7220 Davos

Instandhaltung von Hochspannungsfreileitungen

Helmut Strub, Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Baden

1 Einleitung

Das Thema Instandhaltung von Hochspannungsfreileitungen gewinnt zunehmend an Bedeutung, wenn Leitungen einen wesentlichen Anteil ihrer Lebensdauer erreicht haben. Das ist inzwischen bei vielen Leitungen im Schweizerischen Hochspannungsnetz der Fall.

Natürlich betreibt wohl jeder Eigentümer von Hochspannungsleitungen auch Instandhaltung. Es steht mir im Prinzip nicht zu, zu sagen, was diese zu tun und zu lassen haben. Ich verstehe meine Aufgabe auch nicht in dem Sinne. Ich möchte Ihnen von meinem Erfahrungsbereich als Abteilungsleiter der Leitungsbauabteilung ausgehend zeigen, wie ich bei NOK diesen Themenkreis angehe. Vieles ist dabei im Fluss und im Aufbau.

Wenn es mir gelingt, Ihnen einige Anregungen und diskussionswürdige Tipps zu vermitteln, dann glaube ich, damit einen Beitrag im Sinne der Tagung geleistet zu haben.

Mein Vortrag besteht aus zwei Teilen:

Im ersten Teil möchte ich Ihnen (m)eine Instandhaltungsstrategie näher bringen. Im zweiten Teil möchte ich Ihnen anhand einer kurzen Liste einige kritische Freileitungskomponenten vorstellen, deren Instandhaltung nach meiner Erfahrung gerne vernachlässigt wird, obwohl sie wichtig wäre.

2 Überlegungen für eine Instandhaltungsstrategie

Was ist Instandhaltung?

In freier Diskussion führt die Beantwortung dieser Frage leicht ins Chaos. Und weil das offensichtlich erkannt wurde, hat das Deutsche Institut für Normung die Norm DIN 31051 "Instandhaltung", Begriffe und Massnahmen geschaffen.

Die Norm definiert mehrere Dutzend Begriffe, die grundsätzlich leicht verständlich sind, allerdings nur so lange man sie nicht in die Praxis einbringen muss. Dann nämlich tauchen die eingangs erwähnten Fragen wieder auf: Was ist (noch) Wartung? Was ist (noch) Inspektion? Was ist (noch) Instandsetzung? usw. Viele Grauzonen, welche für Unklarheiten sorgen.

Ich gehe daher nicht näher auf die DIN 31051 ein. Es ist m.E. nicht erfolgsversprechend, diese Unklarheiten durch weiterführende Theorien beseitigen zu wollen. Die Praxis eignet sich dazu besser.

Gehen wir auf's Thema! Was wollen wir eigentlich?

Wir wollen:

- **betriebssichere Leitungen,**
- **möglichst wenige und kleine, kalkulierbare Betriebsrisiken,**
- **möglichst kleine Unterhaltskosten,**
- **keinen Ärger mit dem Gesetzgeber (LeV Art 135 f)**
- **keine Imageprobleme**

Die Anforderungen sind klar! Die Instandhaltung soll diese Wünsche erfüllen.

Im weiteren wissen wir alle mehr oder weniger genau, dass wir

- mit Inspektionen,
- mit Wartungen und
- mit Instandsetzungen,

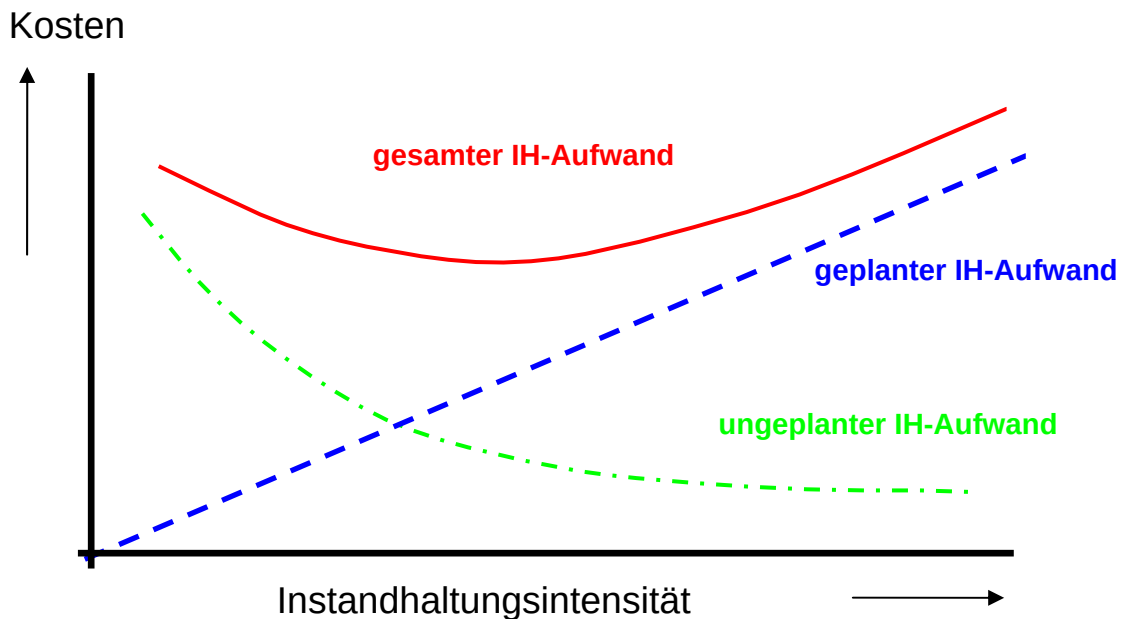
wie auch immer wir diese Begriffe gegenseitig abgrenzen, diese Wünsche erfüllen können.

Es bestehen aber verschiedene **Grenzen sinnvollen Tuns**:

Wenn Sie an einem Stahlgittermasten jährlich eine Korrosionskontrolle durchführen, werden Sie zwar sehr genau über seinen Verrostungsgrad Bescheid wissen. Beim Kontrollieren beschädigen Sie ihn aber vermutlich jedesmal, und im übrigen müssen Sie sich die nicht einfach zu beantwortende Frage nach dem Sinne dieser Kontrollen gefallen lassen. Ein rostiger Gittermast ist zwar nicht besonders attraktiv, stellt aber kaum ein erhöhtes Risiko dar.

Haben Sie hingegen einmal erlebt, dass aus irgendwelchen Gründen Isolatoren ihren Dienst versagt haben und Leiterseile auf den Boden gefallen sind, dann tun Sie gut daran, dem Thema "Isolatoren" die gebührende Referenz zu erweisen. Sie werden dabei ganz automatisch auf die Idee kommen, mittels Inspektionen, Materialprüfungen und -auswechslungen das Unfallrisiko zu senken und Ihr Gewissen zu beruhigen.

Man darf sich an dieser Stelle auch eine bekannte Grafik in Erinnerung rufen. Die Grafik, die zeigt, wie sich die Kosten gegenüber der Instandhaltungsintensität entwickeln.



Für jedes Element, das wir einer systematischen Instandhaltung aussetzen gilt:

Einerseits steigen die Kosten für Inspektionen, Wartungen und Instandsetzungen linear mit der Häufigkeit, mit welcher wir diese vornehmen. Andererseits verringern sich die Kosten, die durch "zufällige" Schäden mangels genügender Instandhaltung generiert werden, mit einer fallenden e-Funktion. Zum Glück ist das so! Wir können dadurch in jedem Falle nach einer Optimierung der Gesamtkosten Ausschau halten!

Wir haben die Grenzen jetzt ein bisschen ausgelotet. Mit einer Anzahl Inspektionen, Prüfungen und Instandsetzungen wollen wir erreichen, dass wir intakte und sichere Leitungen betreiben. Wenn wir bei diesen Arbeiten richtig vorgehen, können wir uns sogar noch rühmen imstande zu sein, das Ganze kostengünstig abzuwickeln.

Damit haben wir das Rüstzeug für das Abarbeiten der nächsten Frage.

Was muss in Stand gehalten werden?

Prinzipiell gilt Gleiches für Freileitungen wie für Kabelleitungen. Wenn wir momentan die Instandhaltung der Freileitungen in der Vordergrund setzen, hat das wohl vornehmlich damit zu tun, dass diese Arbeiten vielschichtiger sind und offenbar höhere Aktualität geniessen als die Instandhaltung von Kabelleitungen. Oder anders herum gesagt. Man denkt sich (vielleicht zu unrecht): "Inspektionen von Kabeln kosten nur und verringern die Risiken nicht wesentlich."

Ohne es speziell hervorzuheben, habe ich bei den folgenden Ausführungen auch an die Elemente der Kabelleitungen gedacht und sie im weiteren mit einbezogen.

Die Leitungs-Instandhaltung umfasst vorerst einmal einen reichhaltigen Katalog an Gebieten, welchen die notwendige Beachtung geschenkt werden muss. Ich möchte sie gruppieren:

- 1. Gruppe Material**
(Tiefbauten, Tragwerke, Isolatoren, Kabel/Beseilung, weitere Ausrüstungen)
- 2. Gruppe Trasse**
(Durchleitungsrechte, Raumfreiheit)
- 3. Gruppe Elektromagnetisches Umfeld**
(Isolation Kabel/Freileitung, Erdung, a-b-c-Standorte gemäss StV Art. 54, Gefährdungen)
- 4. Gruppe Dokumentation**
(Leiterbilder, Situationspläne, Rechtserwerbspläne,...)

Man hört oft und nicht zuletzt im Zusammenhang mit Instandhaltung das Schlagwort: "So viel wie nötig, so wenig wie möglich!" Dieser Vorschlag ist m. E. zwar richtig, bietet aber keine konkrete Hilfe. Wir möchten konkret wissen, wie eine Leitungsinstandhaltung gestaltet werden soll. Wie sollen wir inspizieren, warten, instandsetzen? Wir hätten gerne eine Instandhaltungsstrategie, die überzeugt und uns betriebsichere Leitungen zu optimalen Konditionen beschert!

3 Strategie-Vorschlag

Ich möchte Ihnen nichts aufzwingen und auch keinen Glaubenssatz verpassen. Es geht mir darum, Ihnen eine mich überzeugende Vorgehensweise zu zeigen. Sicher gibt es auch hier andere Möglichkeiten.

Die Instandhaltungsstrategie, die ich Ihnen skizziere, besteht im wesentlichen darin, für jede Leitung die wichtigen Instandhaltungsprobleme ausfindig zu machen, sie in einen Massnahmenplan einzubauen und diesen zeitgerecht ablaufen zu lassen. Mit der Festlegung von periodisch durchzuführenden Arbeiten, welche speziell auf jede einzelne Leitung abgestimmt werden, können Sie die Arbeiten optimieren. Regelmässige kritische Überprüfungen der Termin- und Arbeitspläne garantieren minimale Kosten und die gewünschte Betriebsicherheit.

Strategie:

1. Die Instandhaltung wird zustandsbezogen betrieben.
Das heisst, die der Instandhaltung unterzogenen Elemente jeder Leitung werden einer Risikoabwägung unterzogen und je nach Resultat unterschiedlich behandelt.
2. Für jedes Element innerhalb der oben erwähnten vier Gruppen werden ausführliche, ins Detail gehende Arbeitsbeschriebe erstellt.
Diese Beschriebe zeigen auf, auf welche Art am einzelnen Element Instandhaltung zu leisten ist. (z.B. Wie sollen Gittermasten Instand gehalten werden? Was soll dabei wie häufig inspiziert werden? Wie soll die Inspektion durchgeführt werden? Welche Arbeiten sind bei der Inspektion sofort zu erledigen? Welche Arbeiten sind in ein Instandsetzungsprogramm einzubringen?)

Mit dieser "Knochenarbeit" werden die sicherheitsrelevanten Überlegungen vorgenommen und die unter Umständen recht komplexen Risikobeurteilungen bewältigt.

3. Die erstellten Arbeitsbeschriebe mit Perioden belegen.
Jeder erstellte Arbeitsbeschrieb wird mit einer Periode (Monate) verbunden. So entstehen Arbeitsbeschriebe für Arbeiten, welche regelmässig alle 6, 12,120 Monate durchzuführen sind. (z.B. Gittermasten12, Gittermasten60, Gittermasten120)
4. Set-Bildung
Für jede einzelne Leitung wird aus den vielen vorhandenen Arbeitsbeschrieben das Set ausgewählt und zusammengestellt, welches für die Zukunft der Leitung aus gegenwärtiger Sicht eine optimale Instandhaltung verspricht.
5. Inspektions-Terminplan erstellen
Für jede Gebietsgruppe als Ganzes wird jetzt mit den vorhandenen Sets ein Inspektions-Terminplan ausgearbeitet. (z.B. Material12 enthält alle Arbeiten, die jährlich an der ausgewählten Leitung auszuführen und zu rapportieren sind und gibt auch gleich die nächsten Termine an.)
6. Aktualisierung Arbeitsbeschriebe und Inspektions-Terminpläne
Sowohl die Arbeitsbeschriebe wie die Inspektions-Terminpläne sind regelmässig auf Zweckmässigkeit zu überprüfen und an geänderte Situationen und gemachte Erfahrungen anzupassen.

Mit der aufgezeigten Strategie haben Sie ein modulares System vor sich, das jederzeit leicht an neue Situationen angepasst werden kann, jede einzelne Leitung berücksichtigt und somit eine Optimierung der Leitungsinstandhaltung ermöglicht.

Umsetzung:

Die Pièce de Résistance für die Umsetzung der Strategie ist in der Herstellung der vielen Arbeitsbeschriebe zu finden. Und es ist mir nicht möglich, innerhalb dieses Vortrages dazu allgemein gültige Rezepte vorzulegen. Die Problemstellungen können aus verschiedenen Gründen sehr unterschiedlich sein und deren optimale Lösungen von Fall zu Fall eigentümlich. Es stehen grössere Mengen von mehr oder weniger bedeutsamen Fragen im Raum. (z.B. "Wie und wie häufig sollen welche Fliegerwarnkugeln geprüft werden? "Müssen Erdungsverbindungen bei gewissen Masten häufiger als bei anderen überprüft werden und sind deshalb dafür unterschiedliche Arbeitsbeschriebe zu erstellen?"

Im Prinzip ist bei der Ausführung dieser Arbeit jeder Leitungseigentümer auf sich selbst gestellt. Sinnvoll wäre deshalb die Bildung von Erfahrungsgruppen. Innerhalb solcher Gruppen könnten gezielt einzelne Fragen der Instandhaltung ausdiskutiert und optimale Vorschläge formuliert werden.

Sollten Sie sich für die Teilnahme an einer solchen Erfahrungsgruppe interessieren, können Sie mit dem Referenten, Herrn H. Strub in Kontakt treten. (Tel. 056 200 33 98, Fax 056 200 38 91, email: stb@nok.ch)

4 Liste von bedeutsamen Instandhaltungselementen

Es ist zwar im Rahmen dieses Vortrages nicht möglich anzugeben, wie im Detail einzelne Leitungselemente optimal instandzuhalten sind. Das heisst nicht, dass es auch unmöglich ist, eine Anzahl nützliche Tipps aufzulisten. Die nachstehende, nicht vollständige, kurze Liste weist auf einige Arbeiten hin, die leicht "vergessen" gehen, deren Bedeutung für die Instandhaltung jedoch nicht unterschätzt werden sollte.

- Erdungen
Einwandfreie Erdungsübergänge. Erdungsmessungen.
- Fliegerwarnkugeln
Intakte Befestigung, Seilzustand innerhalb der Kugeln
- Leiterbilder

Aktuelle schematische Darstellung der Leitung mit schaltungstechnisch und netztechnisch relevanten Eintragungen. (Geometrische Angaben, Leitungskreuzungen, Belegungen ..)

- Situationspläne

Aktuelle Situationspläne mit korrekten Eintragung der Parzellengrenzen, Parzellennummern und Bauzonen



Abb. 1 Storchennester - ein eher seltenes Instandhaltungsproblem.



Abb. 2 Einschusslöcher in der Fliegerkugel deuten auf versteckte Seilchwächungen hin.



Abb. 3 Ausbrüche im Mastsockel möglicherweise als Folge von Bodenrissen/Erdrutsche im Umfeld des Mastfundaments.



Literaturhinweise

Verordnung über elektrische Leitungen (Leitungsverordnung LeV):

Eidg. Material- und Drucksachenzentrale, 3000 Bern

Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung):

Eidg. Material- und Drucksachenzentrale, 3000 Bern

Deutsche Norm DIN 31051 Instandhaltung, Begriffe und Massnahmen:

Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin

Nutzung von Freileitungsnetzen für Telekommunikationsanlagen

Dr. Giorgio Friedrich, diAx, Zürich

1 Einleitung

Die zunehmende Liberalisierung von einst geschlossenen Industriegruppen / Staatsbetrieben mit eindeutig zugewiesenem Leistungsauftrag, Rechten und Pflichten zum Wohle der Allgemeinheit birgt nun die Tatsache in sich, dass die hierbei notwendigen Infrastrukturbauten von Dritten neu hinzugebaut werden müssen. In der Folge überziehen wir den knappen Raum mit mehreren Netzen, im Falle von Telecomnetzen mit Fasern, Richtstrahlverbindungen und GSM-Antennen.

Teils können die Netze durch spezielle Topologie und aktive Beschaltung den selektiven Kundensegmenten (Traffic orientiert) besser angepasst werden.

Die techn. physikalischen Möglichkeiten bieten aber Hand zu einer synergetischen Lösung, so dass der knappe Raum effizienter wirtschaftlich genutzt werden kann.

2 Zur Integration von Lichtwellenleiter in bestehende Trassen

Um dem Grundsatz der Ressourcenschonung bezüglich Fläche und Raum optimal nachzukommen, da diese Elemente wesentliche Kostenfaktoren in Form von Investitionen und Betriebskosten darstellen, sind häufig ganz neue oder bisher wenig vertraute aber praktische, funktionale Lösungen gefragt. Hierbei ist zu beobachten, dass die sogenannten hybriden Lösungen häufig interdisziplinäres Wissen erfordern, was wiederum naheliegender Weise ein Arbeiten in Gruppen voraussetzt mit intensiver, verständlicher Kommunikation. Ein Umstand, welcher die Arbeitsinhalte zwar sehr interessant aber ebenso anspruchsvoll gestaltet. Das gegenwärtige Umfeld müsste dieser Notwendigkeit vermehrt Beachtung schenken. Der Mangel an Zeit und die vermeintliche Schnelligkeit verleitet einem aber zu bewussten Ausblendungen von komplexen Zusammenhängen; es können sich dadurch gehäuft im Nachhinein funktionale Unverträglichkeiten bemerkbar machen, die den täglichen Betrieb stark belasten und dadurch verteuern.

Es seien nachfolgend einige typische Technologien/Lösungen genannt, die ganz besonders im neuen Telecomumfeld einer gewissenhaften Prüfung unterzogen werden müssen. Diese Technologien erlauben eine stark erhöhte **Integration** mit Hilfe verschiedenster Lösungsansätze:

- hybrides Erdseil, Erdseil mit integrierten LWL (bis 144 Fasern).
- DWDM-Technologie, bedingt Fasern mit ultra hoher Bandbreite: geeignet für Protokoll unabhängige opt. Kanäle, bildet die Voraussetzung zum voll optisch geschaltetem Netzwerk.
- Ultra hohe Bitraten im Zeitmultiplexverfahren (TDM); SDH –Protokoll bei STM 64 (10Gbit/s) / STM 256 (40Gbit/s)

oder

- hohe Zahl von parallel geführten LW-Leitern, Kabeln oder Trassen bei zugleich hoher Kabeldichte: z.B.: Nutzung von Kabeltrassen in Abwasser-Kanalisationen bis 9 // Kabel -> Potential von ca. 1000 Fasern (aktueller Stand der CH Entwicklung)!

Es ist offensichtlich, dass hier meist gleichzeitig verschiedenste zum Teil stark gegenläufige Randbedingungen erfüllt sein müssen, will man, dass die Faser ihre zugeordnete Übertragungsfunktionalität mit höchster optischer Leistung (bis 500mW) in einem breiten Spektrum

(DWDM, 50 bis 100 λ 's), bei kleinsten Lichtimpulsen im ps-Bereich (25 – 100ps) über eine mehrjährige Lebensdauer von 10 bis 20 Jahren unbeschadet wahrnimmt. Es sind erhöhte Anstrengungen in Planung, Fertigung, Bau/Verlegung, Montage und bei den messtechnischen Abnahmen notwendig.

3 Besondere Anforderungen bedingt durch die EW-Infrastruktur

Gemäss dem Tagungsthema geht es naheliegenderweise vorwiegend um die Mitbenützung von EW- Infrastrukturen:

- bei **Knotenpunkte** um Kollokation in Unterwerken / Kraftwerken
- bei **Verbindungen** um den “high tech hybrid” LWL-Erdseil und um physisch robuste dielektrische Kabel und Bodenkabel
- bei **Masten** um Antennenstandorte (Richtfunk MW, Repeater und GSM-Keulen-Antennen)

Aus diesem Umfeld heraus lassen sich die Schnittstellen herleiten, die heute einerseits aufgrund der neuen wirtschaftl. – politischen Rahmenbedingungen und andererseits wegen der hohen physikalisch - technischen Anforderung mit erhöhter Sorgfalt bearbeitet und gelöst werden müssen:

3.1 Anforderungen an Knotenpunkte

Als SDH-Standorte: Energieversorgung und Erdungssysteme im Hinblick auf Überspannungsschutz (Objektschutz), Berührungsschutz im Falle von hohen Erdkurzschlussströmen (Personenschutz). Raumklima (Staub und Betriebstemperatur) mit Vorteil im Überdruck betrieben, Einführung der Faserkabel mit 10m bis 20m kontrolliert abgelegter Kabelreserve und Fiberterminal (KEV gemäss diAx Vorschriften). Im Bereiche von Bahnanlagen / Unterwerken ist im Falle von Container – Anlagen auf die Bezugserde / Potentialausgleich 50Hz/16 2/3Hz (siehe Abb. 1) oder DC zu achten. Im Falle von DC ist auf eine konsequente Isolation zu achten und dies auch im Hinblick auf die Korrosionsbeständigkeit von elektrischen Kontaktverbindungen. Ein zweckmässige Lösung findet man in Abb. 1, [3].

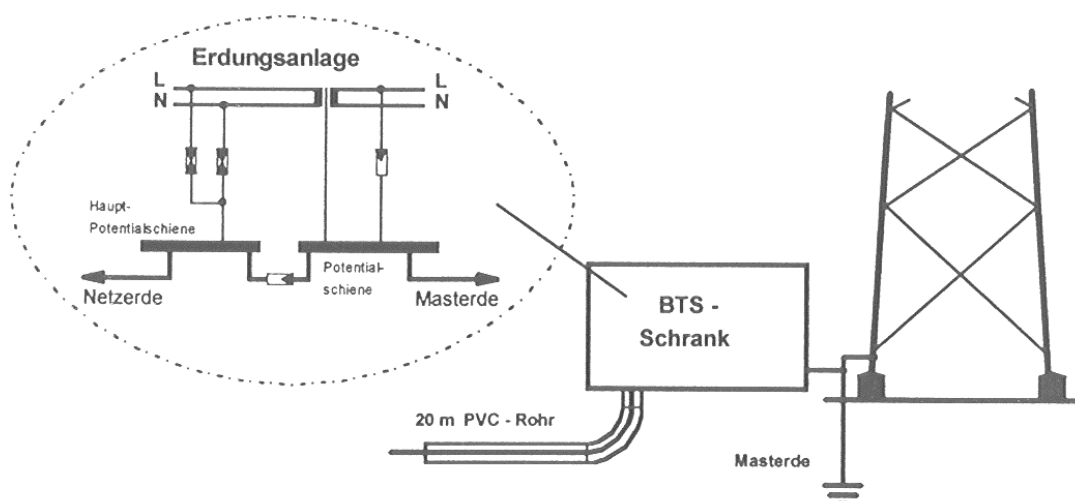


Abb. 1 Bild des Erdungsschemas: typisches Erdungsschema eines abgesetzten Containers in der Nähe von Hochspannungsanlagen. Im Falle von Antennenerdungen ist es vorteilhaft, dass die Bezugserde der elektronischen Geräte ebenfalls die gleiche Bezugserde aufweisen, also hier die Masterdung (Bahnerdung bei Bahnanlagen). Im Allgemeinen wird die Energieanspeisung bevorzugt über einen Trenntrafo eingeführt, man achte auf eine strikte Trennung der Erdungspotentiale.

3.2 Anforderungen an Verbindungsstrecken

Design-Wahl des high tech Hybrides “ERDSEIL” bezüglich

- a) der mechanischen Belastungen:
Bruchlast, dynamischer Last (Dehnungen, elastischer Arbeitsbereich bei Wind – und Eislast), Geometrie, Schwingungen
- b) der elektrischen Belastungen
Widerstand, Stromstärke und kurzzeitige Belastung (Grenztemperatur)
Unempfindlichkeit gegen Blitzschläge
- c) Montagefreundlichkeit
Seilzug (Dralleigenschaft, Abspanntechnik mit Spirale oder Konusklemmen)
- e) LWL-Design inklusive Konfektionierung
 - Faserüberlänge: Sie ist ein wesentliches Designkriterium typische Werte liegen bei 0.7 Promille. Die gewählte Faserüberlänge hängt ab von der elastischen Dehnung bzw. dem Fliessverhalten des Materials und bestimmt die Druck- und Zugbelastungen und letztlich das Alterungsverhalten im Betrieb.
 - Gel-Auswahl bezüglich Coatingverträglichkeit, Reibung und Temperatureinsatz.
 - Faserqualität (Intrinsic Eigenschaften): mechanische und optische Parameter, d.h. Geometrie und optische Dämpfung, Spleissbarkeit, Bandbreite und Nichtlinearitäten.

Diese Summe von Randbedingungen bestimmt massgeblich die funktionale Lebensdauer der LWL-Verbindung im Hochleistungsnetz.

Bedenkt man, dass die MTBF (mean time between failure) der Glasfaser in der Grössenordnung von > 100 Jahren liegt, die betriebswirtschaftl. Amortisationszeiten des passiven Netzes typ. zwischen 15 bis 25 Jahren liegen dürfte, erahnt man die Bedeutung und die Anforderungen der “Verpackung” und Montage dieser LWL bezüglich des harten Umfeldes, wie es bei den Elektrizitätswerken täglich vorkommt. Bedenkt man auch, dass die reale physische Lebensdauer inkl. der Funktionalität sehr stark von radialen und longitudinalen mechanischen Belastungen der Glasfaser abhängt, versteht man die grossen Anstrengungen von Herstellern, Montagepersonal und Besitzer der Infrastruktur, diese für die Glasfaser gefährlichen Betriebszustände mit allen Mitteln zu minimieren bzw. zu unterbinden.

Die bis heute unmittelbar Erdseil bezogenen Konstruktionen, welche bereits in der Schweiz eingesetzt werden, können wie folgt in Gruppen zusammengefasst werden:

Integrierte Lösungen (Abb. 2):

- a) Segmentleiter mit verseilten Edelstahlröhrchen (z.B. San Bernhardino), sogenanntes Design des Gotthardkabels (Cossonay-Cortailod), hohe Querdruckfestigkeit, bedingt saubere Montage, hohe Bruchlast > 20000kp.
- b) Klassische Rundverseilung mit verseilten Edelstahlröhrchen mit bis zu 24 (30) Fasern pro Röhrchen in Gel, typ. total 4 Röhrchen
- c) Zentralrohrkonstruktion mit verseiltem LWL-Bündel in Gel eingelegt mit bis zu 144 LWL (wird nicht mehr eingesetzt).
- d) Slotted- Core Design, in massivem Zentralsteg gezogene Nuten tragen in Kunststoffröhrchen verpackte Fasern, kann auch einlagig verseilt zum Einsatz kommen.

Nicht integrierte Lösung:

- a) Sky-wrap: Kunststoffkabel wird um das Erdseil/Phasenseil gewrappt
- b) Dielektrisches Kabel (freihängend, metallfrei): wird meist unter den Phasenseilen montiert [4], [5].

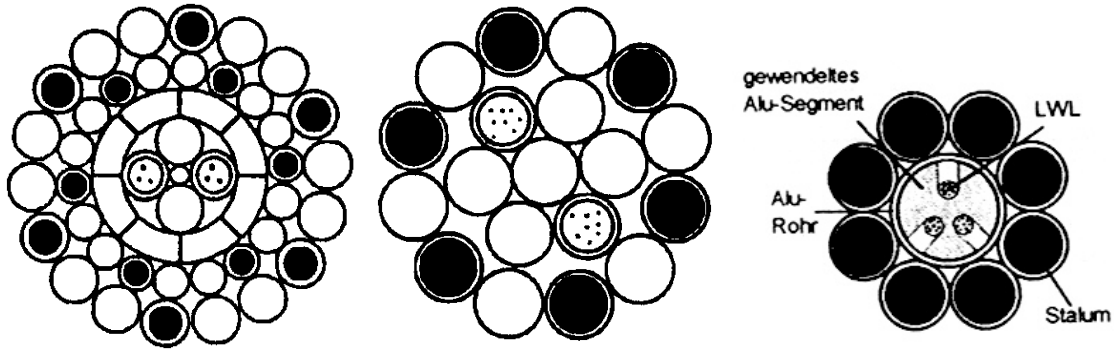


Abb. 2

Segmentleiter:

Hohe Querdruckfestigkeit, bedingt sorgfältigen Seilzug (hohe Zugkräfte).

Rundverseilung:

Zu hohe Querkräfte können zu Druckstellen führen.

Gewendeltetes Nutenprofil:

Überlänge der Faser muss besonders beachtet werden.

Aufgrund der mechanischen Belastungen im elastischen Bereich der obigen Seilkonstruktionen werden die Fasern mit geometrischer Überlänge in Gel gelegt (abgestimmt auf das Coating der Faser), um die gegenseitige Reibung und die Scherkräfte zu reduzieren und um einen besseren Schutz gegen Feuchtigkeitseintritt zu bieten. Diese Funktionalitäten müssen in einem weiten Temperaturbereich wahrgenommen werden: typ. über ein ΔT von 100°C.

Im Gegensatz dazu sind die Bodenkabel zu nennen, die in verschiedenste Infrastrukturen gelegt werden und damit auch verschiedensten Anforderungen zu genügen haben:

Verlegung der Bodenkabel, typ. 12 Primärröhrchen à 12 Fasern => max. 144 LWL:

- Einblastetechnik in kalibrierte Rohranlagen 250kp bis 900kp (von diAx empfohlen)
- Eingeogene Kabel (Kabelzug): mindestens 900kp - Zugkraft
- Eingelegte Kabel (z.B. auf Pritschen: Gotthardtunnel): 900 kp
- Spezialkabel-Einzug mit geringem Durchmesser hoher Längs- und Querwasserdichtigkeit für Kanalisationen (Trassee in Edelstahlröhrchen).
- Seekabel; wasserdichter, armierter Aufbau mit bis zu 164 LWL

Bei erhöhten Sicherheitsbestimmungen in Gebäuden und Tunnels muss zwingend mit noflame Kabelmanteln gearbeitet werden (Halogenfrei, korrosionsarme Rauchgase und hohe Brandlast). Bei neuen diAx Projekten wird deshalb der erhöhte Brandschutz für alle inhouse Verkabelungen und Tunnelkabel vorgesehen.

Alle Kabel müssen mindestens mit hoher Längswasserdichtigkeit ausgerüstet werden, um dem Kapillareffekt längs des Kabels entgegen zu wirken. Abhängig vom Verlegeort wird zusätzlich die **Nagetierfestigkeit** und die Querwasserfestigkeit vorgeschrieben.

Eine erweiterte Nutzung ist auch durch die Benutzung von Freilauf- und evtl. Hochdruckstollen denkbar. Entsprechende Bedürfnisse sind ausgemacht. Aufgrund der dort herrschenden Randbedingungen sind ganz extreme Belastungen gleichzeitig einzuhalten: die Feuchtigkeitsempfindlichkeit der Fasern bedingt einen wohlüberlegten Schutz vor Wassereintrich; deshalb denkt man an eine gepanzerte Edelstahlkonstruktion, welche das speziell ausgelegte Kabel besser zu schützen vermag. Um dem Kondensationswasser vorzubeugen, könnte dieses Leerrohr zwangsbelüftet werden. Zusätzlich im Falle des Hochdruckstollens wären Vorkehrungen gegen energiereiche Vibrationen und Schockbelastungen (Notschliessung der Hochdruckleitung) notwendig. Im Hinblick auf die neuartigen Durchführungen sind extreme Lösungen gefragt, die heute erst angedacht sind und für alle Partner Neuland darstellen.

Die bis heute verwendeten Technologien von LWL-Verbindungskabeln (Erdseile, Bodenkabel, Seekabel), die als ausgereift gelten, beinhalten ein aktuelles Potential an Bandbreite, die weit über 1 Tbit/s liegen mit der heutigen kommerziell erhältlichen Technologie mit bescheidenem Wellenlängen- Multiplex von Faktor 4.

3.3 Anforderungen an Mastinstallationen

Hier gilt es der optischen Auskopplung, also der Abzweigmuffe und dem KEV ein ganz besonderes Augenmerk zu geben. Gemeint sind insbesondere die Anordnung der Kupplungen in einem klimatisierten Schrank (Staub und Kondensationswasser), Kabeleinführung und -führung in Schutzrohr bis Muffe (Schutz vor Eisabwurf). Die Spleissanordnung in der Kassette soll mit Vorteil gemäss den diAx-Grundsätzen – Weisungen 1 und 2 – erfolgen; hier ist besonders darauf hinzuweisen, dass die Spleissanordnung und Faserführung unbedingt der getrennten, Kunden orientierten Führung/Spleisskastenorganisation Rechnung trägt. Dadurch können Übertragungsstörungen (erhöhte Bit Error Raten = BER) bei mechanischen Belastungen der Fasern (Biegung, Zugbelastungen, Vibrationen -> allgemein von Bewegungen) weitest gehend vermieden werden. Die Zuführung der Erdseile zum Spleisskasten muss so gestaltet

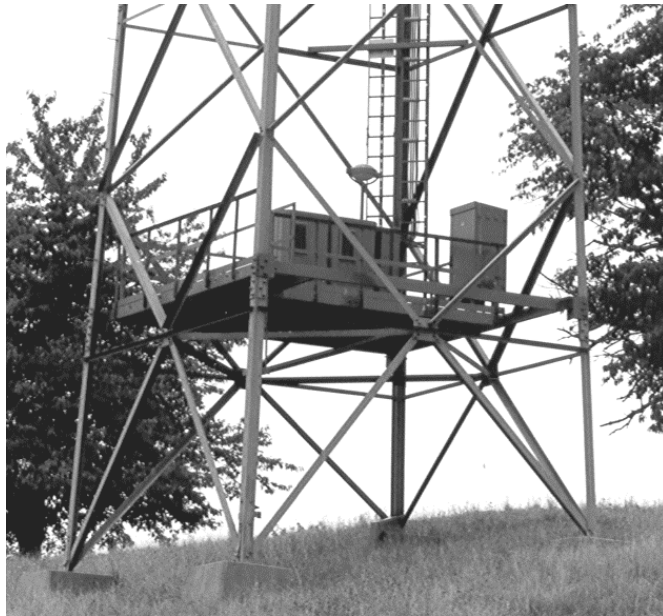


sein, dass die Biegeradien jederzeit eingehalten und die losen Vibrationen (Windlast) möglichst vermieden werden. Hier drängt sich eine gute Befestigung am Mast oder noch besser eine kritisch gedämpfte Aufhängung über Silentblöcke auf (Abb. 3). Damit können Ermüdungsbrüche der Fasern in der Zuführung und im Kassettenbereich vermieden werden. Dies bedingt aber ebenso eine gedämpfte Befestigung des gesamten Spleisskastens mit Silentblöcken, was im Moment ernsthaft geprüft wird. In diesem Falle sind diese Silentblöcke zur Erdung mit Litzen zu überbrücken.

Abb. 3

Spleissbox am Mast: Diese Spleisse sind extremsten Witterungsbedingungen ausgesetzt. Zur besseren Wartung sollen hier die Spleisskassetten kundenorientiert in 12-er Struktur abgelegt werden ("mechanisch-optische Querempfindlichkeit"-> Ursache von BER). Spleisse sollen keinen Temperaturgang aufweisen! Sorgfältige Montage, Einhaltung der Biegeradien zwingend mindestens 32 mm (nach Möglichkeit aber 35-40 mm) und sicherer Spleisschutz vermindern Ermüdungsbrüche.

Trägt der Masten zudem noch aktive Komponenten, SDH/PDH-Multiplexer und Antennen (Abb. 4), so sind zahlreiche ausgewogene Blitzschutzvorkehrungen (EMV) zu treffen: Im Falle der Fremdspeisung muss die Zuführung so ausgestaltet werden, dass der Potentialtrichter und die daraus resultierenden Schrittspannungen bzw. die Erdströme das Energiekabel nicht verletzen können. Um die Potentialanhebung des Mastens (im Falle von innerer und äusserer Überspannung bzw. Stromableitung und Impedanz des Mast-Bodenüberganges) von der Speisung möglichst fernzuhalten, ist ein entsprechend ausgelegter Trenntrafo (mit Vorteil inkl. der Überspannungsableiter) zwingend. Alle anderen Abgänge von Signalleitungen die den Mast verlassen, dürfen nur optisch realisiert werden. Eine mögliche alternative der Einspeisung



ist aber auch die 3-phasige Einspeisung über ein – am Masten isolierte Abspannung! - Luftkabel.

Abb. 4

*Bild Podest: typische Anordnung der Tele-
cominfrastruktur auf einer Plattform mit
Trenntrafo, BSC, PDH/SDH Multiplexern,
Antennentreiber-Geräten evtl. mit LWL-
Abzweigmuffe bei rein optischer
Signalanbindung (was zu bevorzugen ist).*

Bezüglich des Sicherheitsaspektes
müssen jederzeit auch die
Sicherheitsabstände zu den

hochspannungsführenden Mastteilen (Phasenseile, Armaturen, Erdseil) eingehalten werden. Dies gilt insbesondere auch für das Betriebspersonal beim Durchschreiten der Auslegerzone (50Hz-Felder, bis kW/cm²) und für den Sicherheitsabstand zu den Antennen selbst (seitlich und in Abstrahlrichtung).

Zur Besteigung des Mastwerkes sind die einschlägigen Betriebsvorschriften der einzelnen Elektrizitätswerke zu befolgen (siehe auch Faltblatt diAx "Sicherheit").

4 Umwelteinflüsse und Schutz vor menschlichen Einwirkungen

Neu gilt für alle Anlagenteile ein **erhöhter Schutz** der Infrastruktur (Objektschutz) vor unbefugtem Zutritt. Obwohl dieser Aspekt auch schon bei den bisherigen Anlagen der Elektrizitätswerke gegolten hat - in zweierlei Hinsicht Objektschutz und Personenschutz wegen der Hochspannungen – ist bei der Doppelnutzung der Anlagen dies nun wegen des hohen mittelbaren Schadenspotentials im Hinblick auf die Kommunikationsversorgung sehr dringend. Erste Schadensfälle in der CH im Jahre 2000 bezüglich Verlust des Telefons und Internets führten zu hohen Kompensationszahlungen in Mio. Höhe. Mit zunehmender Leistung der Übertragungsstrecken mit Mehrfachem von 10 Gbit/s und der hohen funktionalen Konzentration in den aktiven SDH-Knoten und der gleichzeitigen Komplexität und Interdependenz des bereits gut ausgelasteten Hochleistungsnetzes (Domino Effekt), wird gerade ein solches Netz mit höherem Schadensausmass bewertet werden müssen. Das hieraus resultierende Sicherheitsdispositiv ist mehrschichtig und ergreift die betrieblichen, logistischen sowie die personellen Aspekte. Hierzu sind umfassende Prozessbeschreibungen gemeinsam mit den Überlandwerken erarbeitet worden (-> Resumption planning). Ebenso wird diAx intern an einer umfassenden recovery Strategie gearbeitet, um dem völligen, ungeordneten Netz-Zusammenbruch frühzeitig effizient entgegen wirken zu können.

Der Schutz vor äusseren Einwirkungen gilt insbesondere auch für die Mastanlagen, die immer unbemannt und im Falle von aktiven Komponenten ferngesteuert werden. Sie gelten im obigen Sinne deshalb als besonders exponiert, da im Falle von Zerstörungen (Spleisskästen, an kombinierten Anlagen Abzweigmuffen und Anlagenteile) aufgrund der Netzstruktur und des Transitcharakters von grossen Datenströmen das Potential des Schadensausmasses als besonders hoch einzustufen ist. Dies vor allem dann, wenn die Fehler kumuliert auftreten und damit die n-1 Sicherheit in einer Netzregion verletzt wird. Im Mastumfeld müssen deshalb in erster Linie konstruktive Massnahmen den integralen, mechanischen Schutz der LWL-Anlagen konsequent gewährleisten.

5 Schlussfolgerungen

Die Zusammenlegung der Infrastruktur ist unter Einhaltung von spezifischen technischen Grundsätzen möglich und auch wirtschaftlich sinnvoll. Die Doppelnutzung wird stark durch die Nutzung / Einsatz der neuen Technologien unterstützt. Man erhält im Falle der Elektrizitätswirtschaft einen ausserordentlich hohen Ausnutzungsgrad der energietechnischen Trasseen und Unterwerke und damit eine Entlastung des noch freien Raumes. Oft findet sich gerade durch die Mitbenutzung der Masten für Antennen, BSC's eine bessere Akzeptanz, liegen doch diese energietechnischen Bauten in der Regel oft auch etwas ausserhalb der Agglomerationen, zudem lassen sich im Gitterwerk die Komponenten diskret unterbringen. Diese enge Verzahnung der 2 grundverschiedenen Technologien (Energietechnik-Telekommunikation) bedingen aber von beiden Seiten ein vertieftes, grundlegendes Verständnis und im Hinblick auf die vielschichtigen Sicherheitsaspekte eine wohlüberlegte formale, gut geregelte Kompetenzabgrenzung. In gegenseitigem Interesse können hierdurch nun diese vorhandenen neuen hybriden Betriebsmittel sehr effizient – mit hoher Verfügbarkeit – zur Wertschöpfung im Interesse der Kunden eingesetzt werden.

Literaturhinweise

- [1] IEC Publ. 61663-1: Lighting protection - Telecommunication lines - Part 1: Fibre optics installations.
- [2] G. Friedrich: "EMV-Probleme bei der Integration von Kommunikationsanlagen in Energieversorgungsnetze" (Figuren 4-6) FKH - / VSE – Fachtagung: „EMV in elektrischen Energieversorgungsanlagen“, 20. Oktober 1999, ETH, Zürich.
- [3] Erdungsschema: Detlev Hussels, "Nutzung von Freileitungen für die Informationsübertragung"; ETG/VDE-Fachbericht 61, Stand und Trends in der Freileitungstechnik, Fachtagung in Berlin vom 11./12.Juni 1996.
- [4] Olsen, G. Robert. An Improved Model for the Electromagnetic Compatibility of All-Dielectric Self-Supporting Fiber-Optic Cable and High-Voltage Power Lines. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 41, No. 3, August 1999.
- [5] Karady, G. George, G. Besztercey, M. W. Tuominen. Corona Caused Deterioration of ADSS Fiber-Optic Cables on High Voltage Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, October 1999.

Nouvelles évolutions dans la technique des conducteurs

J. Ch. Delomel, Alcatel Cable Lens S.A.
Dr. Th. Heizmann, Alcatel Cable Suisse S.A.

Les conducteurs pour lignes aériennes constituent un domaine où les évolutions se font lentement mais sûrement. Les solutions éprouvées ont toujours été privilégiées

et les conducteurs produits et installés aujourd'hui en Europe sont très proches de ceux installés il y a 30 ans, excepté que leur fabrication a suivi les évolutions des

procédés, à savoir :

- la coulée continue pour l'aluminium et ses alliages
- les traitements thermiques en continu
- les techniques de tréfilage élaborées faisant appel à des machines, filières et lubrifiants de plus en plus performants
- et enfin des câbleuses en partie automatisées, capables de proposer des unités d'une seule longueur de plus en plus conséquentes.

L'informatisation des procédés, leur supervision et la généralisation de l'assurance qualité permettent aujourd'hui de livrer des produits aux dispersions plus réduites.

De même, le recyclage du conducteur déposé a été pris en compte.

Cependant, la demande croissante d'énergie et la pression constante des écologistes envers les lignes aériennes amènent les acteurs à proposer des solutions techniques pour augmenter la capacité de transit des conducteurs, ne serait-ce que temporairement pendant les périodes de pointe, en limitant l'impact visuel des lignes.

Le but de cet exposé est donc de passer en revue des solutions existantes pour augmenter la capacité des conducteurs, les limites inhérentes à certaines de ces solutions. (fig. 1 et 2)

Enfin, un rappel des travaux en cours, au niveau de la normalisation européenne et internationale, sera abordé.

Neue Entwicklungen in der Leiterseiltechnik

Die Leiterseile von Freileitungen unterliegen einer langsamen aber kontinuierlichen Entwicklung. Bewährte Lösungen fanden immer den Vorzug und so kommt es, dass die heute in Europa produzierten und eingesetzten Leiterseile denjenigen, die vor 30 Jahren installiert wurden, sehr ähnlich sind.

Wichtige Entwicklungen wurden jedoch in der Herstellung von Leiterseilen gemacht:

- kontinuierliches Giessen von Aluminium und Aluminiumlegierungen
- kontinuierliche thermische Behandlungsverfahren
- hochentwickelte Zugverfahren unter Verwendung von neuen Schmierstoffen
- Erhöhung der Produktionslängen

Numerisch gesteuerte Produktionsanlagen sowie die generelle und rigorose Anwendung der Qualitätssicherung erlauben heute die Produktion von Leiterseilen mit einer sehr geringen Streuung ihrer wichtigsten Eigenschaften.

Die Zunahme des Energieverbrauchs und die Erhöhung der Versorgungssicherheit, führt zu einem ständigen Druck, die Transportkapazität von Freileitungen, weiter zu erhöhen. Gleichzeitig fordern Teile der Gesellschaft, den optischen Eindruck von Freileitungen zu minimieren.

Ausgehend von den bestehenden Lösungen sollen verschiedene Ansätze aufgezeigt werden, wie die Stromtragfähigkeit von Freileitungen auf einem gegebenen Trasse erhöht werden kann. Folgende Möglichkeiten, die im Ausland z. T. bereits im Einsatz sind, werden diskutiert:

- Kompaktleiter (Abb. 1 und 2)
- Seile mit erhöhter Leitfähigkeit
- Seile mit erhöhter Betriebstemperatur
- Hybrid-Konstruktionen unter Verwendung von nichtmetallischen Werkstoffen

Die Entwicklung von neuen Leiterseilkonstruktionen wird auch wesentlich von der Normierung beeinflusst. Es wird kurz erläutert, wie eine vernünftige Normenarbeit solche Entwicklungen fördern kann.

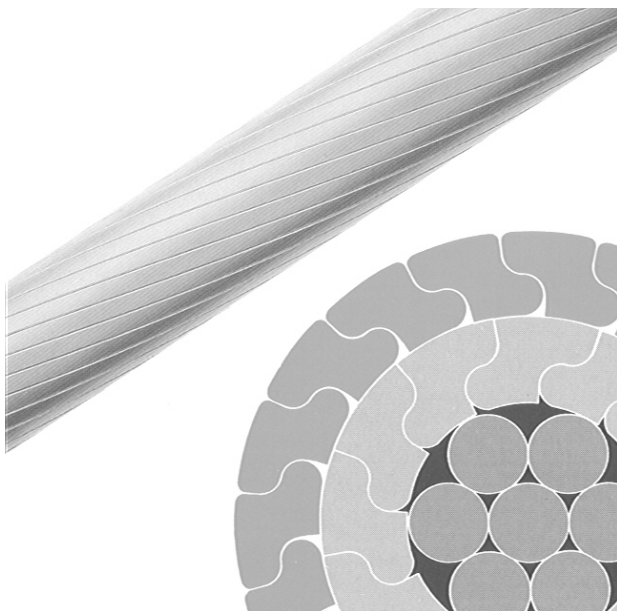


Fig. 1 Querschnittsbild eines Kompaktleiterseils mit Z-Drähten.

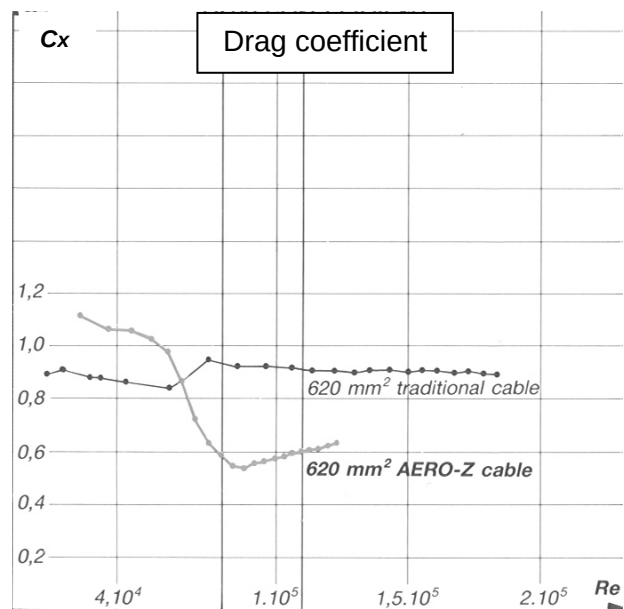


Fig. 2 Luftwiderstandsbeiwert für Leiterseile mit Z-Drähten im Vergleich mit herkömmlichen Leiterseilen.

Koronaschallemissionen, Physikalische Grundlagen und Einflussgrößen

Dr. Reinhold Bräunlich FKH, Zürich, Dr. Kurt Heutschi EMPA, Dübendorf

Teil I Einführung in die Grundlagen der Koronaentladungen (R. Bräunlich)

1 Einleitung

Die Frage der Schallemissionen infolge Freileitungskorona besitzt in der Schweiz zur Zeit besondere Aktualität, da mehrere Leitungen, die bis anhin noch mit 220 kV betrieben wurden, auf eine Betriebsspannung von 380 kV umgestellt werden. Durch die höhere Betriebsspannung verstärken sich die Koronaentladungen. Bei Niederschlag, kann die Zunahme der Entladungen auch akustisch wahrgenommen werden. Mehrere Beschwerden und entsprechende Presseartikel haben auch die Öffentlichkeit auf diese Problematik aufmerksam gemacht.

Auf den Hochspannungsfreileitungen der Spannungsebenen 220 kV und 380 kV sind in der Schweiz mit wenigen Ausnahmen Zweierbündel im Einsatz. Durch das Vorhandensein von nur zwei Leitern ist die feldabschirmende Wirkung im Nahbereich von einigen Zentimetern um die Leiterseile verhältnismässig gering, so dass bei Regen, Reif und nassen Leiterseilen kräftige hörbare Entladungen entstehen, welche die Grenzwerte der Lärmschutzverordnung an gewissen Orten in der unmittelbaren Umgebung der Leitungen überschreiten.

Bezüglich dem Verhalten von Koronaschallemissionen und möglichen Massnahmen an Freileitungen besteht bei den schweizerischen Elektrizitätswerken ein Nachholbedarf für zielgerichtete Forschungsarbeit. Für gewisse Probleme der EVUs mit Höchstspannungsnetzen fehlen Lösungsvorschläge.

Systematische schweizerische Untersuchungen über Freileitungskorona wurden zwar in den fünfziger und frühen sechziger Jahren durch die FKH an verschiedenen Leiterseilbündeln durchgeführt. Sie bezogen sich in erster Linie auf die Dimensionierung von Bündelleitern in Hinblick auf Koronaverluste und Radiostörspannungen. Bei der Auslegung wurden Freileitungen nur bezüglich dieser elektrischen Parameter optimiert. Auflagen bezüglich Umweltbeeinträchtigung durch Koronaschall und auch E/M-Felder (niederfrequente elektrische und magnetische Felder) mussten damals nur in seltenen Fällen in Betracht gezogen werden.

Abgesehen von einigen neueren Lärmesskampagnen und Berechnungsstudien der letzten zehn Jahre liegen praktisch keine schweizerischen Untersuchungen zur Reduktion von Koronaschallemissionen vor.

Angesichts der gewachsenen Ansprüche bezüglich Koronalärm und E/M-Felder liegt vor allem für bestehende Leitungen ein hohes Interesse an ökonomisch tragbaren Verbesserungen vor.

1.1 PSEL-Projekt Koronaschallemissionen

Der Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft PSEL hat im Jahr 1999 ein Unterstützungsgesuch der Fachkommission für Hochspannungsfragen für ein Forschungsprojekt zur Untersuchung der Koronaschallproblematik bewilligt. Diese Arbeit wurde bereits letztes Jahr zusammen mit den Partnern: ETH Fachgruppe Hochspannungstechnik der EMPA, Abteilung Akustik, und der BKW FMB Energie AG gestartet.

Das Ziel des Projekts ist ein Massnahmenkatalog für die Reduktion von Koronaschall in störenden Situationen, sowie die Erstellung einer Datengrundlage für die theoretische Prognose der Koronaschallemissionen. Entsprechende Daten sollen durch gezielte, auf schweizerische Verhältnisse zugeschnittene Modellmessungen ermittelt werden.

Das Projekt gliedert sich in folgende Teile:

- Theorie, Literaturrecherche, Auswertung der in der Schweiz bereits durchgeführten Messkampagnen
- Erstellen eines verbesserten Computerprogramms zur theoretischen Prognose an praktischen Freileitungsanordnungen.
- Modellversuche, im Hochspannungslabor der Fachgruppe Hochspannungstechnologie an der ETH Zürich und in der FKH-Versuchsstation in Däniken.
- Prüfung von Massnahmen an Leiterseilen und Leiterseilbündeln zur Reduktion von Koronälärm. Bewertung der Massnahmen.

2 Der Mechanismus der Koronaentladung

Im Bereich der Leiterseile von Hochspannungsfreileitungen erreicht die elektrische Feldstärke lokal so hohe Werte, dass die Luft in ihrer unmittelbaren Umgebung ionisiert werden kann.

Dieser Prozess läuft vorwiegend impulsförmig in sehr kleinen statistisch verteilten Bereichen auf der Leiterseiloberfläche ab (Impulskorona). Ausgangspunkt für die Entladungsimpulse sind einzelne freie Elektronen, die aus vorausgegangenen Entladungen vorhanden sind oder an vorstehenden Partikeln am Leiterseil entstehen. Diese werden im elektrischen Feld beschleunigt und schlagen bei Stössen mit neutralen Molekülen weitere Elektronen frei. Die Elektronen vermehren sich dabei sehr rasch. Zurück bleiben positive Ionen. Auch negative Ionen entstehen, weil sich ein Teil der freien Elektronen an den Luftmolekülen anlagern. Auf diese Weise entstehen lawinenartig millimeterkleine ionisierte Zonen.

Die Ionisationsprozesse laufen in der positiven und negativen Spannungshalbperiode unterschiedlich ab. Nähere Einzelheiten hierzu können den Abbildungen 1 und 2 entnommen werden.

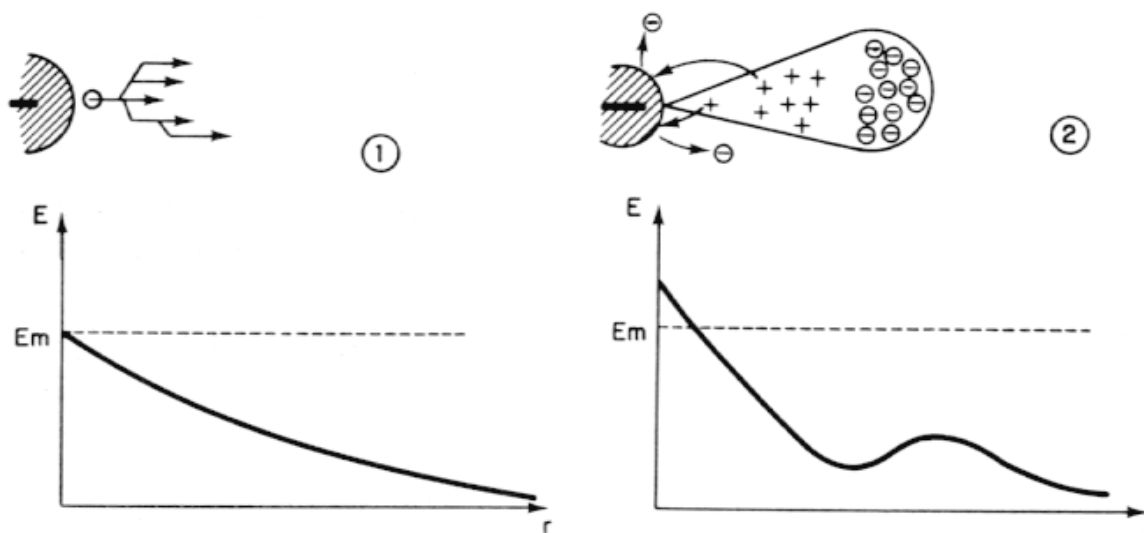
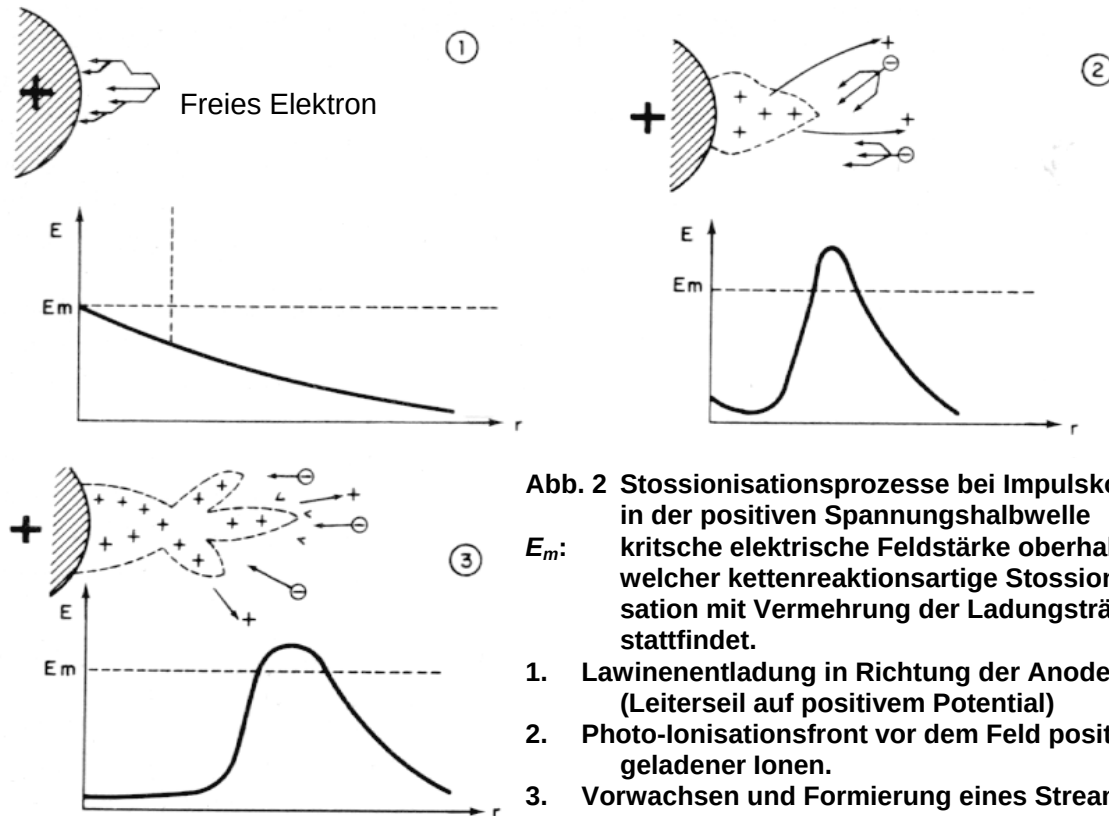


Abb. 1 Stossionisationsprozesse bei Impulskorona in der negativen Spannungshalbperiode [2].
 E_m : kritische elektrische Feldstärke, oberhalb welcher kettenreaktionsartige Stossionisation mit Vermehrung der Ladungsträger stattfindet.

1. Lawinenentladung in Richtung weg von der Kathode (Leiterseil auf negativem Potential)
2. Ausbildung eines negativen Streamers mit negativer Raumladung in der Front.



Aus energetischen Gründen neigen Ionenwolken dazu, fadenförmige Kanäle zu bilden (Streamer-Entladungen), die sich fort von der Leiterseiloberfläche bis in Bereiche niedriger Feldstärke bewegen. Infolge abnehmender beschleunigender Kräfte kommen sie dann nach einigen Millimetern oder Zentimetern Abstand von den Leiterseilen zum Stillstand.

Eine Streamer-Entladung entsteht in sehr kurzer Zeit (in einer Zeitspanne unter etwa hundert Nanosekunden), so dass während einer Halbperiode an einer Stelle unter Umständen mehrere Koronaimpulse nacheinander auftreten können (Abb. 3 und 4).

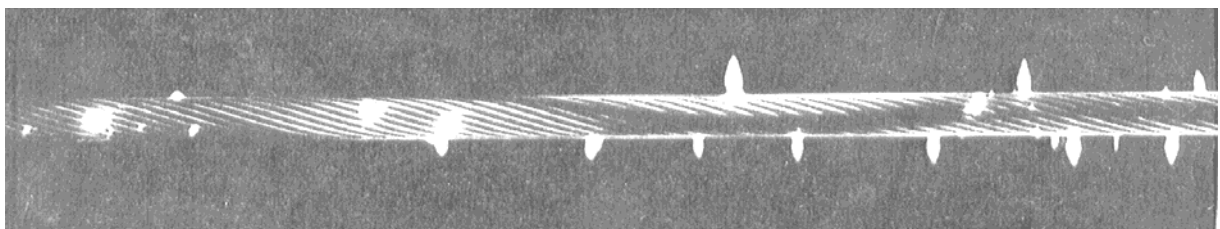


Abb. 3 Erscheinungsbild von positiven Streamerkoronaentladungen an einem Leiterseil, aufgenommen mit einer lichtenempfindlichen Kamera (Standbild), aus [7].

Koronaimpulse haben sehr vielfältige Erscheinungsformen. Die Schnelligkeit, die räumliche Ausdehnung und geometrische Form, ihr visuelles Aussehen, sowie die zeitliche Impulsdauer und Form variieren in einem sehr grossen Bereich. Aufgrund der natürlichen rauen Oberfläche der Leiterseile entstehen bei Hochspannungsfreileitungen im Betrieb lokal immer genügend hohe Oberflächenfeldstärken, so dass auch bei trockenem Wetter kleinste Entladungen entstehen. Die Schwächsten sind nicht hörbar und können nur mit empfindlichen Störspannungsmessgeräten nachgewiesen werden.

Bei Niederschlag werden die Wassertropfen an den Leiterseilen durch die elektrostatischen Kräfte in die Länge gezogen. An den dadurch herausragenden langgezogenen Tropfen wird das elektrische Feld zusätzlich erhöht, so dass dort kräftige Entladungen stattfinden.

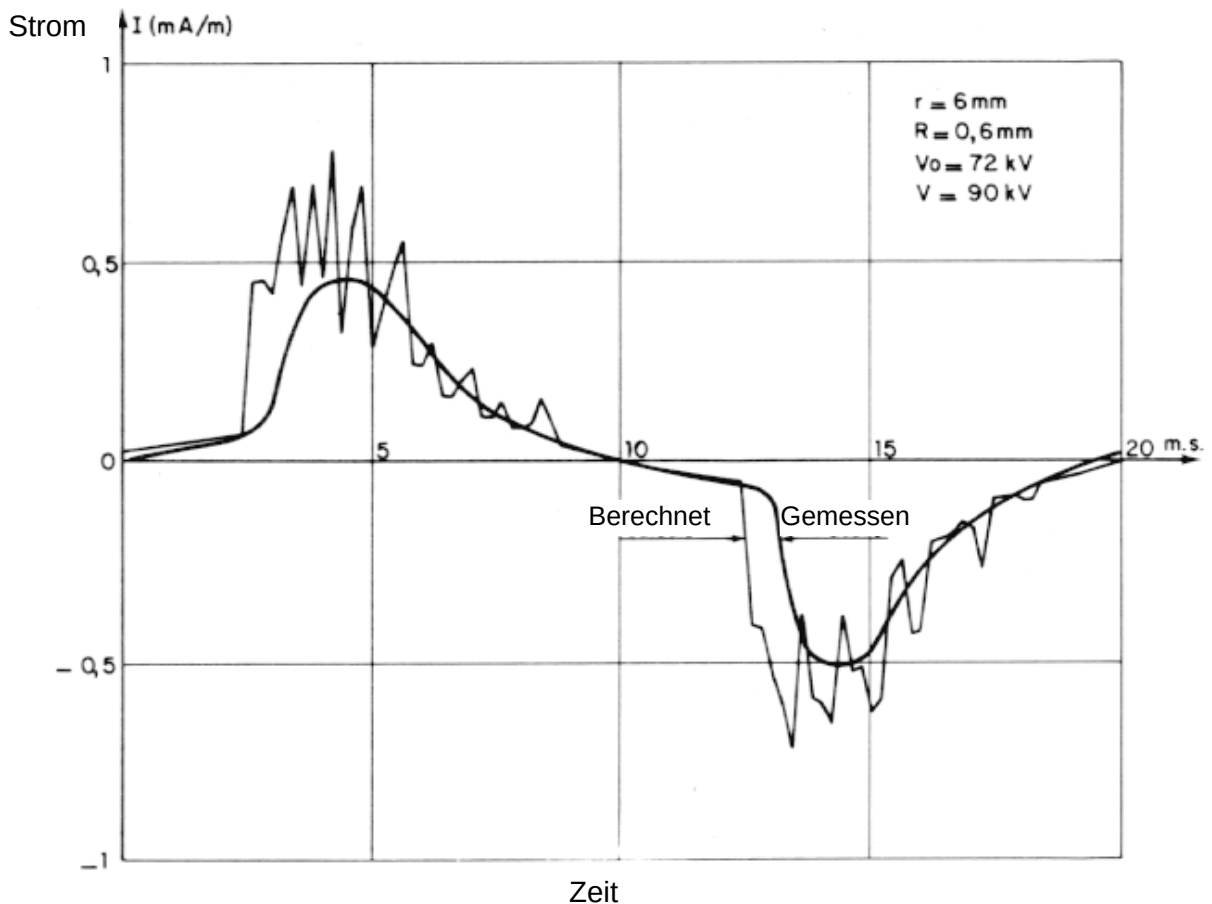


Abb. 4 Verlauf eines kräftigem des Koronaentladungsstroms während einer Wechselspannungsperiode.

Der hörbare Koronaschall wird durch eine Vielzahl von Faden- und Stielbüschel-Entladungen (kräftige Streamer-Entladungen) von einigen Zentimetern Länge erzeugt. Die Gaserhitzung und Expansion in den feinen Entladungskanälen führt dabei zu vielen impulsförmigen Druckwellen, welche als Knistergeräusch wahrnehmbar sind. In gewissen Fällen ist durch eine teilweise zeitliche Kohärenz der Impulse auch ein Summgeräusch mit der Netzfrequenz (50 Hz) bzw. mit seiner ersten Harmonischen (100 Hz) wahrnehmbar. Auch die globale Bewegung der Ionen im elektrischen Wechselfeld und rhythmische Bewegung der Wassertropfen durch die periodischen elektrostatischen Kräfte können als Brummgeräusch wahrgenommen werden.

Die Entladungsaktivität ist von vielen Parametern auf komplexe Art abhängig, wobei auch statistische Vorgänge und stark nichtlineare und unetstige Zusammenhänge für die physikalischen Vorgänge massgebend sind. Nebst der **Betriebsspannung und der Leiterseilgeometrie** üben folgende veränderliche Parameter einen entscheidenden Einfluss auf die Korona-schallemissionen aus:

- Die klimatischen Bedingungen und das momentane Wetter
 - Niederschlag
 - Luftfeuchtigkeit
 - Temperatur
 - Höhe über Meer

- Wind
- Der Zustand der Leiterseiloberfläche
 - Zustand der Verseilung
 - Zustand der Oxidschicht
 - Verschmutzungsgrad

Entscheidend für die Koronaaktivität an Freileitungen ist ihr statistisches Verhalten. Die grosse Schwierigkeit bei der Behandlung der Koronaschallfrage ist, dass der Koronaschallpegel nie direkt, sondern immer nur die Auftretenswahrscheinlichkeit beeinflusst werden kann, und dass Verbesserungsmassnahmen deshalb nur durch Beobachtungen über längere Zeiten beurteilt werden können. Aufgrund der Tatsache, dass Niederschlag den entscheidenden Einfluss auf die Koronaaktivität ausübt, ergeben sich für alle Auswirkungen der Koronaentladungen (auch Koronaverluste und Radiostörspannungen) zwei statistische Lärmverteilungen für trockenes Wetter und für Niederschlagsituationen. Die beiden statistischen Verteilungen überlagern sich und sind fest mit den lokalen statistischen Wetterdaten verknüpft sind (siehe Abb. 5).

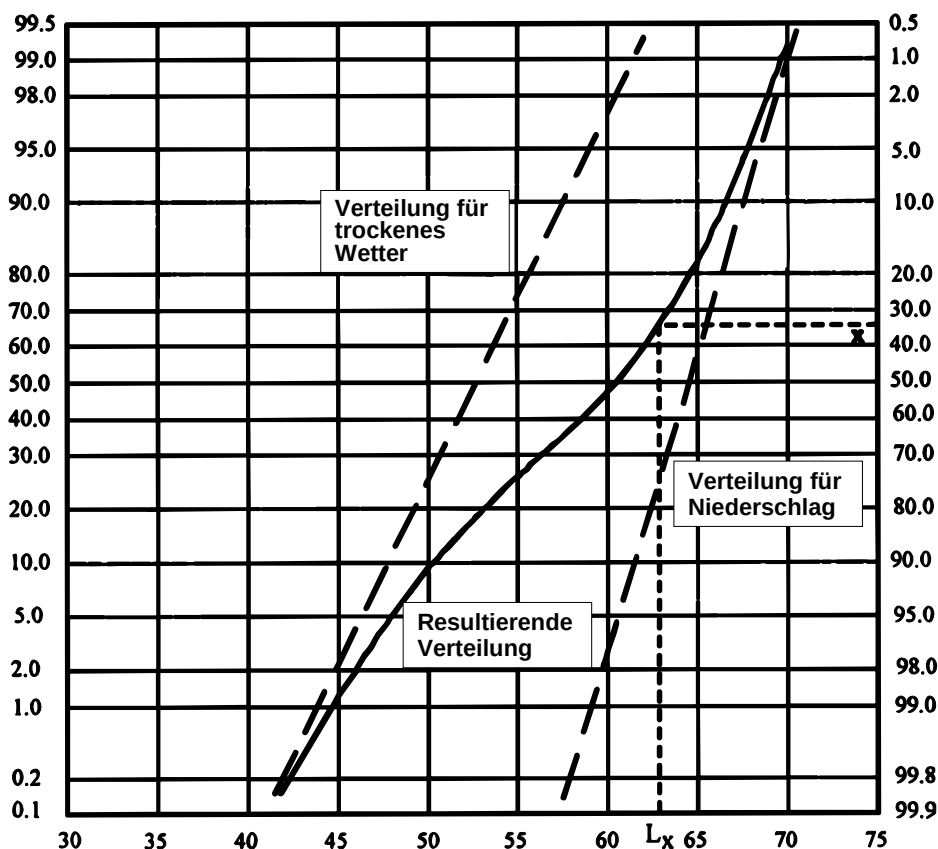


Abb. 5 Prinzipielle statistische Beschreibung von Koronaeffekten an Hochspannungsfreileitungen, resultierende Summenwahrscheinlichkeiten für Koronaeffekte (Energieverluste, Radiostörfelder und Koronaschallemission) aus den Verteilungen für trockenes Wetter und Niederschlag.

2.1 Heutiger Kenntnisstand über die Frage der Koronaschallemission

Die in den vergangenen Jahrzehnten zusammengetragenen Informationen über die Leiterseilkorona im allgemeinen und im speziellen über die Schallemissionen sind in den Literaturstellen [1], [2], [7] und [8] zusammengestellt worden und werden dort auch ausführlich diskutiert. Das Buch von P. Sarma Maruvada [7] ist dieses Jahr erschienen und weist den neuesten Stand auf.

Trotzdem die wesentlichen physikalischen Vorgänge, die zur Koronaschallemission führen, bekannt sind, werden Untersuchungen spezifischer Leitergeometrien und Umweltsituationen ihre Berechtigung beibehalten. Die Anzahl der Einflussparameter, die Empfindlichkeit dieser Einflussparameter (nichtlineares Schwellwertverhalten) und der statistische Charakter der Lärmemissionen und der dafür verantwortlichen Einflussgrößen lassen eine abschliessende, allumfassende Abklärung der Vorgänge nicht zu.

Folgende allgemeine Kenntnisse über die Koronaschallemissionen stehen heute zur Verfügung:

- Theoretische Modelle aller Formen von Koronaentladungen bei beiden Polaritäten, bei Wechselstrom- und Gleichstromübertragungsleitungen. Ausreichend präzise theoretische Methoden zur Berechnung von Entladungseinsetzspannungen bzw. –Feldstärken, aber nur sehr grobe Modelle für die Berechnung von Entladungsintensitäten.
- Kenntnisse über die Entstehung der Schallemissionen und Anhaltspunkte für die spektrale Schallzusammensetzung (dB(A)-Pegel und Reintongehalt). Eine spezifische Aussage über die erwartete Schallcharakteristik ist in der Praxis nicht möglich. Es sind aber Faktoren bekannt, die für den „Brumm“-Anteil (100 Hz und Harmonische) verantwortlich sind.
- Empirische und semi-empirische Modelle für die Schallentstehung und die Schallintensität. Weltweit liegen zehn verschiedene mathematische Formulierungen für die Vorhersage von Koronaschallpegeln in dB(A) vor, welche aus den Daten von Modellexperimenten und Versuchsfreileitungen erarbeitet wurden (siehe Abschnitt 2.2 und [2])
- Publikationen von etwa zwanzig weltweit durchgeführten messtechnischen Studien über Koronaschallemissionen, z.T. mit Langzeitstatistiken, welche die Reproduzierbarkeit der Messungen sowie die Unsicherheit bei der theoretischen Voraussage abschätzbar machen.

2.2 Theoretische Vorhersage von Koronaschallemissionen

Der Zusammenhang zwischen der für die Koronaentladungen ausschlaggebenden Betriebsspannung an den Leiterseilen und dem messbaren akustischen Schalldruckpegel ist von einer Vielzahl physikalischer Prozesse bestimmt, welche vom lokalen Leiterseilzustand und von der Umwelt stark abhängig sind. Eine exakte Berechnung der Schalldruckpegel mittels den physikalischen Grundgesetzen ist daher schwer möglich. Die mathematischen Abschätzungen beruhen auf **empirischen Formeln**, welche sich auf Messungen an Modell-Leitungen im Massstab 1:1 abstützen.

Theoretische Berechnungen beziehen sich auf den Fall von leichtem Regen, da hier die beste Reproduzierbarkeit resultiert (vgl. hierzu auch die grössere Steigung der Geraden für Niederschlag in Abb. 5). Einige Autoren empfehlen eine Niederschlagsintensität von 6 mm/h [8]. Bei anderen Witterungsverhältnissen ergeben sich gemäss Vergleichsmessungen relative Reduktionen des Schalldruckpegels gemäss Tabelle 1:

Trockenes Wetter:	-15 dB(A) ... -20 dB(A)
Nebel oder nasse Leiterseile:	-5 dB(A) ... -10 dB(A)
Regenwetter, Niederschlagsintensität 6 mm/h:	0 dB(A) (Referenzwert).

Tabelle 1 Reduktionen des Korona-Schalldruckpegels in dB(A) auf die Referenz-Umgebungsbedingung: Regenwetter mit Niederschlagsintensität 6 mm/h.

Zunächst müssen die elektrischen Oberflächenfeldstärken an den Leiterseilen berechnet werden. Dabei wird von einer makroskopischen Feldstärke ausgegangen, welche einen idealen Zylinder als Form der Leiterseile voraussetzt. Unregelmässigkeiten Verschmutzung und Wassertropfen werden in nachfolgenden Schritten durch empirische Korrekturen berücksichtigt.

Das mittlere Feld $\bar{E}$ auf der Oberfläche eines Leiterseils berechnet sich wie folgt:

$$\bar{E} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \quad (1)$$

Dabei entspricht die elektrische Ladungsdichte q dem Effektivwert der Ersatzlinienladung im Leiterzentrum, welche auch für die Berechnung der E-Feldprofile benötigt wird.

Die maximale Feldstärke an der Oberfläche entlang dem Umfang eines ideal glatten Leiterseils berechnet sich gemäss einschlägiger Literatur, z.B. [8], Kapitel I.3, S. 15:

$$E_{\max} = \bar{E} \cdot \left\{ 1 + \frac{(n-1) \cdot r}{R} \right\} \quad (2)$$

- r : Leiterseilradius [cm]
 n : Anzahl Leiterseile des Bündelleiters
 R : Radius des Leiterbündels.

Aus diesen Angaben wird zunächst eine Basispegel-Funktion $L_{p0}(E_{\max})$ berechnet.

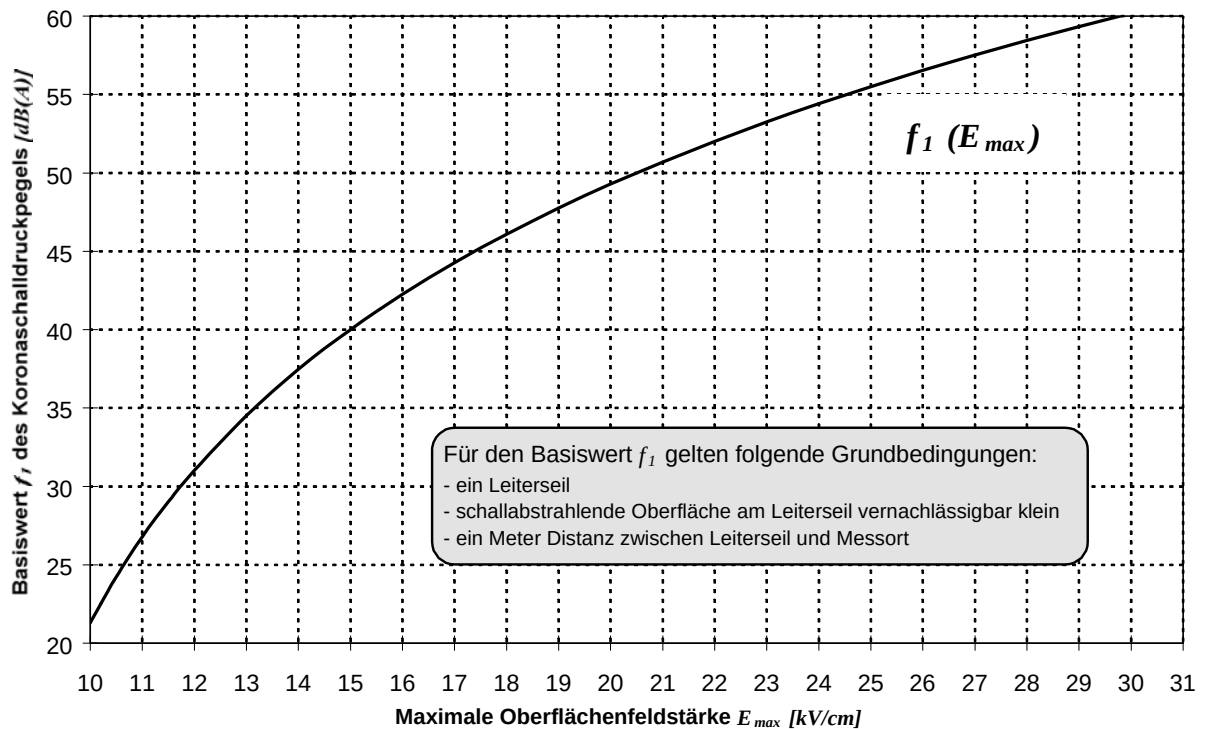


Abb. 6 Beispiel einer gemessenen Abhängigkeit des Basiswerts $f_1(E_{\max})$ von der maximalen Oberflächenfeldstärke aus [8].

Der Schalldruckpegel eines Leiterseilbündels in dB(A) wird bei praktisch allen in der Literatur bekannten Arbeiten mit einer Summenformel berechnet, welche die wichtigsten Einflussgrößen zusammenfasst:

$$L_p = k_1 \cdot f_1(E_{\max}) + k_2 \cdot f_2(r) + k_3 \cdot f_3(n) + k_4 \cdot f_4(D) + k_5 \cdot f_5(h) + L_{p0} \quad (4)$$

- L_p : Schalldruckpegel am Messort in dB(A)
 $k_1 - k_5$: Empirische Konstanten
 $f_1 - f_5$: Empirische Funktionen (Beispiel für f_1 : siehe Abb. 6)
 r : Leiterradius
 n : Anzahl Leiterseile des Bündelleiters
 D : Abstand zwischen Bündelleiter und Messort.
 h : Höhe über Meer.
 L_{p0} : Referenzwert in dB(A)

Für die Berechnung des gesamten Schalldruckpegels einer Freileitung an einer bestimmten Position in der Umgebung der Leitung müssen die Schalldruckpegel der einzelnen Leiterseilbündel k in Schalldruckeffektivwerte $\tilde{p}_k$ umgerechnet werden. Der totale Schalldruckeffektivwert $\tilde{p}_{tot}$ ist dann die Wurzel der Quadratsumme der Schalldruck-Anteile aller Bündelleiter. Der totale Schalldruckpegel $L_{p,tot}$ berechnet sich demnach in folgenden drei Schritten:

$$\tilde{p}_k = 10^{(L_{p,k}/20)}, \quad \tilde{p}_{tot} = \sqrt{\sum_k \tilde{p}_k^2}, \quad L_{p,tot} = 20 \cdot \log_{10} \tilde{p}_{tot}$$

oder zusammengefasst:

$$L_{p,tot} = 10 \cdot \log_{10} \left\{ \sum_k 10^{(L_{p,k}/10)} \right\} \quad (5)$$

- $\tilde{p}$: Effektivwert des Schalldrucks
 k : Fortlaufende Nummer der Bündelleiter

Als praktisches Beispiel zu einer 400/240-kV-Hochspannungsleitung ist in Abb. 7 ein Ergebnis einer Berechnung gemäss den beschriebenen Schritten in Form eines Querprofils dargestellt.

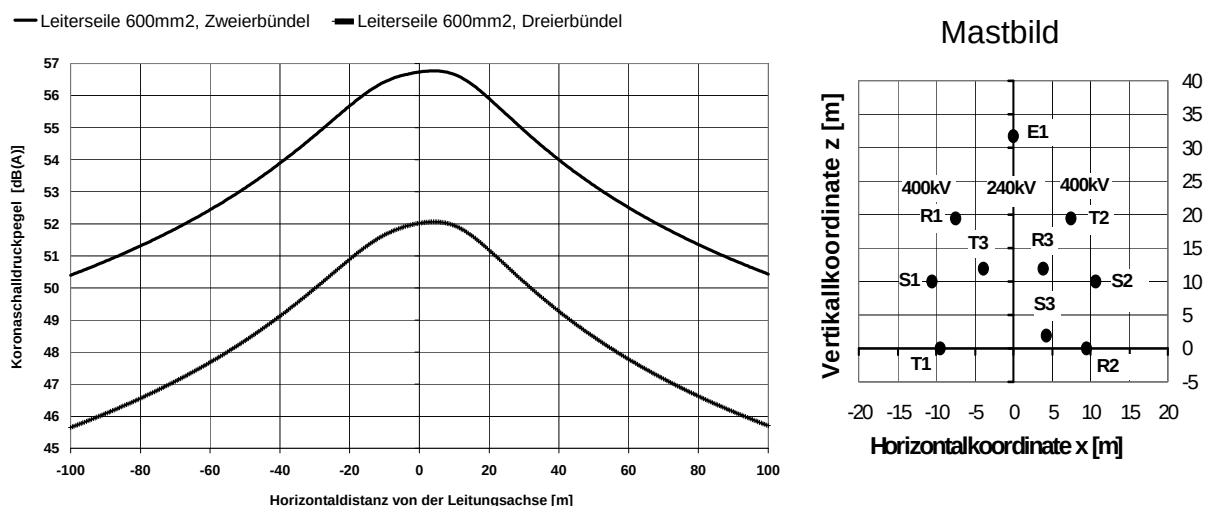


Abb 7 Beispiel für ein berechnetes Querprofil des Koronaschalldruckpegels in dB(A) für eine 400/240-KV-Freileitung, Vergleich zwischen Zweier- und Dreierbündeln rechts: das dazugehörige Mastbild. Das Berechnungsprofil verläuft 14 m unterhalb der untersten Leiterseile horizontal und rechtwinklig zur Leitungssachse.

Literaturnachweis

- [1] Cigré Working Group 36.01, „Interferences Produced by Corona Effect of Electric Systems (Description of Phenomena and Practical Guide for Calculation)“, Cigré Document No 20, Paris, 1974.
- [2] Cigré Working Group 36.01, „Addendum to Cigré Document No 20 (1974): Interferences Produced by Corona Effect of Electric Systems (Description of Phenomena and Practical Guide for Calculation)“, Cigré Document No 61, Paris, December 1996.
- [3] IEEE Standard for the Measurement of Audible Noise from Overhead Transmission Lines, IEEE Std 659-1992.
- [4] IEEE Committee Report, „Measurement of Audible Noise from Transmission Lines“, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No 3, March 1981, pp 1440-1451.
- [5] IEEE Committee Report, Corona and Field Effect Subcommittee, „A Comparison of Methods for Calculating Audible Noise of High Voltage Transmission Lines“, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No 10, Oct. 1982, pp. 4090-4099.
- [6] EPRI, Transmission Line Reference Book – 345 kV and above, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, second edition revised, 1987
- [7] P. Sarma Maruvada, „Corona performance of high-voltage transmission lines“, Research Studies Press LTD, Baldock 2000.
- [8] C.H. Gary, M.R. Moreau, „L'Effet de Couronne en Tension Alternative“, Eyrolles, Paris, 1976.
- [9] J. Lundquist, „Methods for Predicting AC Transmission Line Audible Noise and Radio Interference by Short-Term Single-Phase Tests“, Technical Report No 153, Chalmers Tekniska Högskola, Sektion för Elektro- och Datorteknik, Göteborg, Sweden, 1985.
- [10] V.L. Chartier, R.D. Stearns, „Formulas for Predicting Audible Noise from Overhead High Voltage AC and DC Lines“, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 1, January 1981, pp. 121-129.
- [11] V.L. Chartier, D.E. Blair, M.D. Easley, R.T. Raczkowski, „Corona Performance of a Compact 230-kV Line“, IEEE Transactions on PWRD, Vol. 10, No. 1, January 1995, pp. 410-420.
- [12] Perry D.E., „An analysis of transmission line audible noise levels based upon field and three phase test line measurements“, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, May/Juni 1972, pp. 857-864.
- [13] Trinh G. N., „Analysis of the second harmonic (120 Hz) audible noise generated by line coronas“, IEEE/PES Summer meeting San Francisco, CA, 20-25 July 1975.
- [14] Trinh G. N., Maruvada, P. S., „A method of predicting the corona performance of conductor bundles based on cage test results“, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, Jan/Feb 1977, pp. 312-325.

Teil II Akustische Charakterisierung von Koronaschall, Ergebnisse aus Schallmessungen (K. Heutschi)

1 Bedeutung von Koronalärm für die Bevölkerung

Mit der Spannungserhöhung von 220 auf 380 kV an Hochspannungsfreileitungen häufen sich Lärmklagen von Personen, die sich durch Koronageräusche gestört fühlen. Das Koronageräusch setzt sich im Allgemeinen aus zwei charakteristischen Anteilen zusammen: Einem breitbandigen Knistern und einem tiefen Brummen, entsprechend seiner Reintonkomponenten der Frequenz 100 Hz (Abb. 1). Höhere Harmonische der Netzfrequenz sind in der Regel nicht von Bedeutung. Die beiden Anteile kommen nicht immer gleichzeitig vor. Die objektive Beurteilung, ob eine übermässige Störung vorliegt, kann anhand der LSV (Lärmschutzverordnung)¹ erfolgen. Die LSV definiert für eine bestimmte Palette von Lärmarten Grenzwerte, die die Störwirkung der Bevölkerung beschreiben und entsprechend einzuhalten sind. Koronalärm wird als Industrie- und Gewerbelärm klassiert und kann mit dem Anhang 6 der LSV beurteilt werden. Eine solche Beurteilung basiert auf dem sogenannten A-bewerteten Leq, dem Jahresmittelwert des am Empfänger registrierten und dem Frequenzgang des Gehörs angepassten Schalldruckquadrats. Dieser Jahresmittelwert ist sehr schwierig und aufwändig zu messen, da lange Beobachtungszeiten zur Abdeckung von repräsentativen Meteorbedingungen notwendig sind und gleichzeitig das Koronageräusch im Vergleich zu anderen Umgebungsgeräuschen relativ schwach ist. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Störwirkung verschiedener Geräuscharten werden gemäss LSV Korrekturen für eine allfällige Tonhaltigkeit (Hörbarkeit von Tönen) und Impulshaltigkeit (Hörbarkeit von Impulsen) vergeben. Im Falle des Koronalärms wird auf Grund des Auftretens der Frequenzkomponenten bei 100 Hz in der Regel ein Tonzuschlag von 4..6 dB dazugezählt. Die Präsenz der 100 Hz Komponente schlägt nicht primär pegelmässig zu Buche, da das menschliche Gehör für diesen Frequenzbereich nur noch wenig empfindlich ist, sondern hat Bedeutung hinsichtlich der Störwirkung von Reintönen und des damit verbundenen Zuschlags.

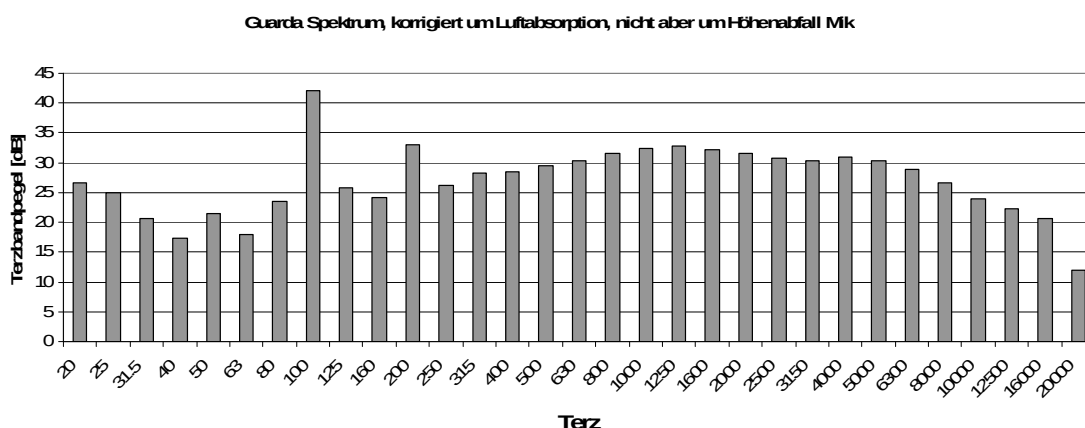


Abb. 1 Gemessenes Terzbandspektrum von Koronageräusch einer einseitigen 380 kV Leitung im Abstand von 130 m. Die für die hohen Frequenzen bedeutende Luftabsorption wurde rechnerisch wegkompensiert. Deutlich zu erkennen ist nebst dem breitbandigen hochfrequenten Anteil die starke Komponente bei 100 Hz und eine schwächere bei 200 Hz.

¹ www.admin.ch/ch/d/sr/c814_41.html

1.1 Erfahrungswerte an Zweierbündel-Leitungen 380 kV

Die Leiterseile der Hochspannungsleitung stellen die akustischen Quellen dar. Es ist zweckmässig, jedes Leiterseil als Aneinanderreihung von Punktquellen zu interpretieren. Für den hochfrequenten Knisteranteil des Koronageräusches können die einzelnen Punktquellen als inkohärent betrachtet werden, das heisst, sie arbeiten völlig unabhängig und haben keine feste Phasenbeziehung untereinander. Hinsichtlich des 100 Hz Brummanteils sind die Punktquellen als kohärent zu betrachten mit fester durch die Netzfrequenz aufgezwungener Phasenbeziehung. Sowohl für den kohärenten als auch für den inkohärenten Anteil reduziert sich der Schalldruckpegel um 3 dB pro Abstandsverdoppelung.

Auf Grund von bisherigen Untersuchungen ist für eine 380 kV Hochspannungsfreileitung (Zweierbündelanordnung) bei Auftreten von Korona ein Pegel zwischen 35 und 40 dB(A) in einem Abstand von 100 m zu erwarten. Die Auftretenswahrscheinlichkeit liegt für durchschnittliche Meteobedingungen zwischen 5 und 35%. Unter Berücksichtigung des Tonzuschlags von 6 dB muss mit Grenzwertüberschreitungen (Planungswert nachts = 45 dB) bei Abständen kleiner als rund 50 m vom nächsten Leiterseil gerechnet werden.

1.2 Erste Ergebnisse der ETH-Laborexperimente

Die bisher durchgeführten Laborexperimente umfassten Messungen an definierten Einzelstörungen und an einem rund 12 m langen Zweierbündel in einer Höhe von rund 2.5 m über Boden bei unterschiedlichen Bedingungen.

1.2.1 Messungen an der trockenen Leitung

Die Messungen an der Zweierbündelleitung umfassten in einer ersten Phase Versuche bei verschiedenen Oberflächenzuständen der Leitung (Abb. 2, Abb. 3) sowie unterschiedlichen Spannungen (Abb. 4).

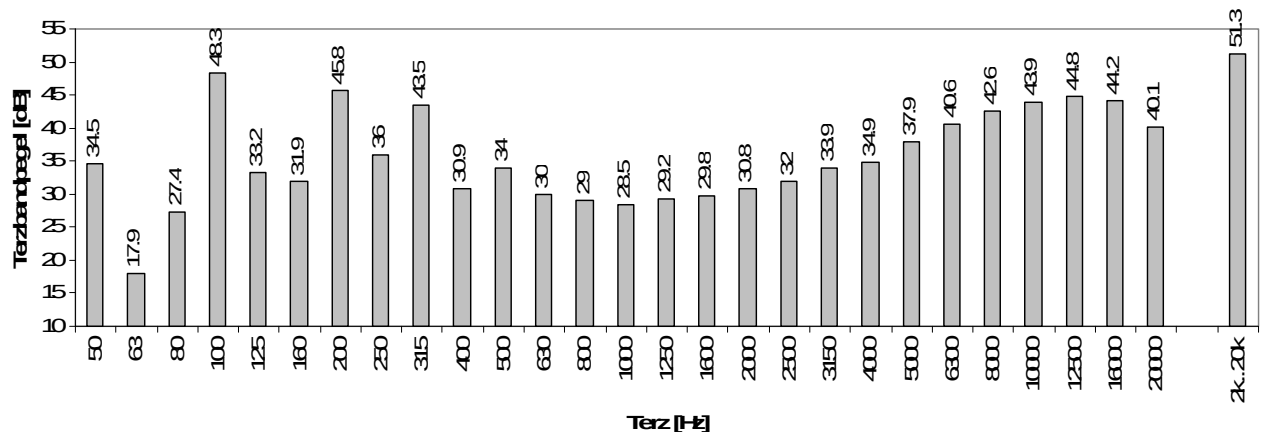


Abb. 2 Gemessener Schalldruckpegel im Abstand 2.3 m (Freifeld) als Terzbandspektrum für die trockene, unbehandelte Leitung bei einer Spannung von 280 kV (GL5).

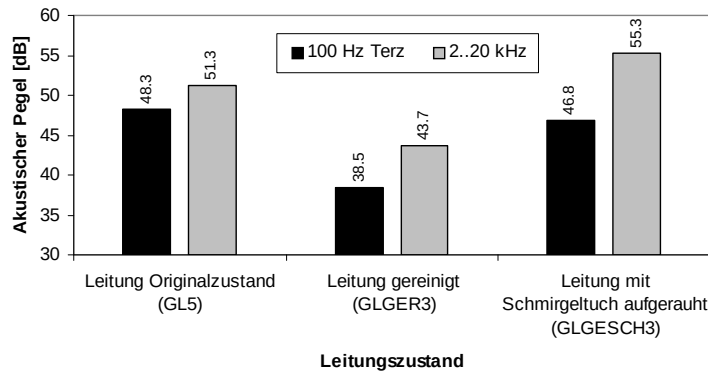


Abb. 3 Gemessener Schalldruckpegel in 2.3 m Abstand (Freifeld) für unterschiedliche Zustände der Leiterseile bei einer Spannung von 280 kV. Der Schalldruck ist für die 100 Hz Terz und für den hochfrequenten Anteil von 2 bis 20 kHz ausgewertet.

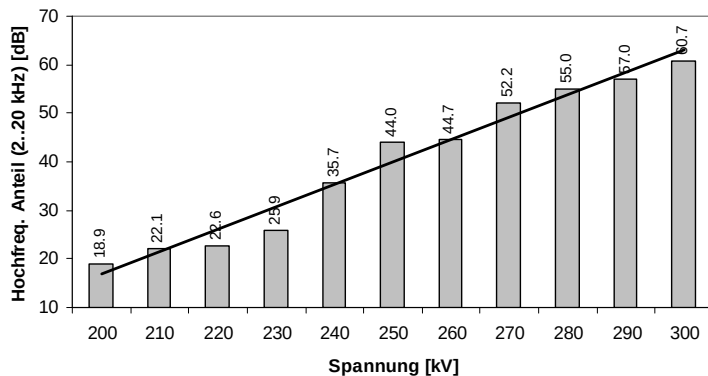


Abb. 4 Gemessener Schalldruckpegel in 2.3 m Abstand (Freifeld) im hochfrequenten Bereich (2..20 kHz) für unterschiedliche Spannungen.

1.2.2 Messungen an der künstlich benetzten Leitung

Bei der trockenen Leitung muss die Spannung im Vergleich zu echten Freileitungen unrealistisch hoch gemacht werden. Tatsächlich ist Koronalärm bei trockenen Verhältnissen auch kein Problem. Aus diesem Grund wurde in einem zweiten Schritt im ETH-Labor eine provisorische Berechnungsanlage installiert. Damit konnte ein Leitungsabschnitt von rund einem Meter gezielt benetzt werden. Die Abb. 5 zeigt das Spektrum des Koronageräusches bei nasser Leitung. Im Gegensatz zur trockenen Leitung ist hier die 100 Hz Komponente im Vergleich zum hochfrequenten Anteil deutlich stärker. Aus dem Pegel-Zeitverlauf in Abb. 6 wird ersichtlich, dass die 100 Hz Komponente eine andere Zeitabhängigkeit zeigt als der hochfrequente Anteil. Überdies zeigt sich eine nur relativ schwache Korrelation zwischen dem elektrischen TE Strom und dem akustischen Signal.

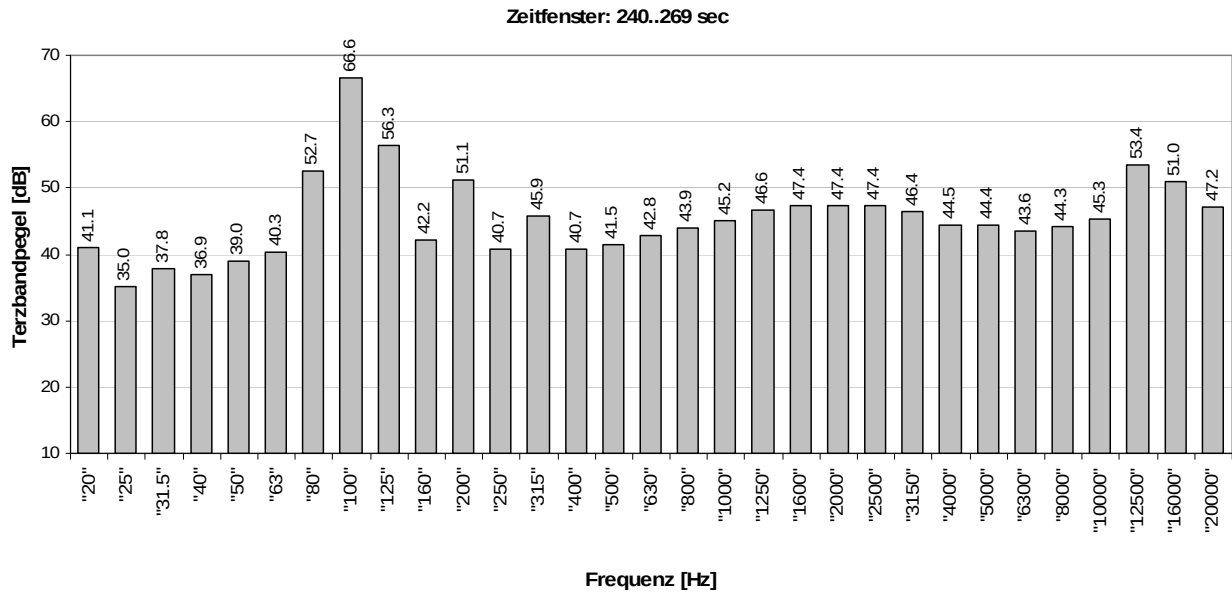


Abb. 5 Terzband-Spektrum des akustischen Koronasignals in 0.5 m Abstand (Freifeld) bei nasser Leitung und einer Spannung von 200 kV.

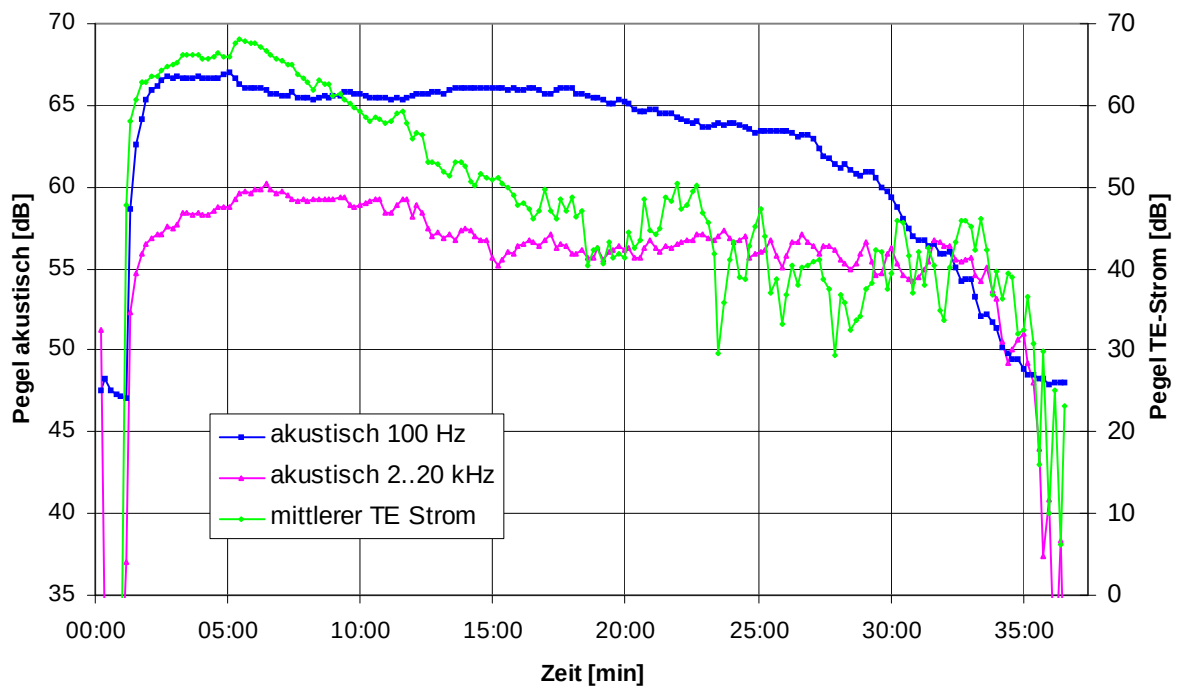


Abb. 6 Pegel-Zeitverlauf bei einer während vier Minuten (von Minute 01:00 bis 05:00) benetzten Leitung mit anschließendem Abtrocknungsvorgang für die 100 Hz Komponente, den hochfrequenten Anteil 2..20 kHz und den je über 10 Sekunden gemittelten TE Strom. Die Spannung betrug 200 kV, die akustischen Pegel gelten für einen Abstand von 0.5 m (Freifeld).

Teilnehmerverzeichnis

Abgottspon	Ivo	Walliser Elektrizitätsgesellschaft AG	Chippis
Ackermann	Martin	Elektrizitäts-Gesellschaft Laufenburg AG	Laufenburg
Amiet	Manfred	Arnold AG	Selzach
Ammann	Michel	S.A. l'Energie de l'Ouest-Suisse EOS	Lausanne
Aschwanden	Thomas	BKW FMB Energie AG	Bern 25
Bachmann	Walter	Sefag AG	Malters
Bär	Beat	EA Elektroarmaturen AG	Schaffhausen
Bettens	Philippe	ENSA	Corcelles
Binz	Hugo		Niederrohrdorf
Blanc	Jean-Paul	Verband Schweiz. Electriziätsunternehmen	Zürich
Bonny	Alain	GRAM SA	Villeneuve
Bräunlich	Reinhold	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich
Brenner	Beat	Walliser Elektrizitätsgesellschaft AG	Chippis
Burgert	Andreas	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich
Chatelain	Michel	Eidg. Starkstrominspektorat	Fehraltorf
Dallèves	Pierre	S.A. l'Energie de l' Ouest-Suisse (eos)	Lausanne
Degen	Andreas	Industrielle Werke Basel	Basel
Ettlin	Franz	Centralschweizerische Kraftwerke	Luzern
Fiers	Peter	Ing. Josef Lumpi Drahtwerke GmbH	Linz
Freudiger	Thomas	BKW FMB Energie AG	Bern 25
Friedrich	Giorgio	diAx	Zürich
Galliker	Patrick	Industrielle Werke Basel	Basel
Gerber	Markus	BKW FMB Energie AG	Bern 25
Gerber	Werner	Onyx Energie Netze	Langenthal
Gloor	Daniel	Aare-Tessin AG	Olten
Grogger	Franz		Schrüns
Hässig	Martin	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich
Haidvogel	Herbert	EVN AG	Maria Enzersdorf
Haller	Ernst	Nordostschweizerische Kraftwerke AG	Baden
Heiniger	Rudolf	AEK Energie AG	Solothurn
Heizmann	Thomas	Alcatel Cable Suisse SA	Cortailod
Herren	Jürg	Elektrizitätswerk der Stadt Zürich	Zürich 11



Heutschi	Kurt	EMPA	Dübendorf
Kayser	Hartmut	Wichser Akustik + Bauphysik AG	Dübendorf
Kinzel	Andreas	Schweizerische Bundesbahnen, Bern	Zollikofen
Kiser	Erwin	Centralschweizerische Kraftwerke	Luzern
Klopfenstein	Erich	Schweizerische Bundesbahnen, Bern	Zollikofen
Köppl	Georg	Köppl Power Experts	Wettingen
Kreis	Johann	Eidg. Starkstrominspektorat	Fehraltorf
Lüthy	Othmar	AEW Energie AG	Aarau
Marbot	Urs	Elektrizitätswerk Bündner Oberland AG	Ilanz
Marcolli	Ivan	Officine Idroelettriche della Maggia SA	Locarno
Marti	Roland	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich
Mathis	Peter	Schweizerische Bundesbahnen, Bern	Zollikofen
Mele	Adamo	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich
Meyer	Carel	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich
Minelli	Laurent	Officine Idroelettriche della Maggia SA	Locarno
Müller	Georg	Aare-Tessin AG	Olten
Müller	Joachim	LEMKE DIAGNOSTICS	Wangen b. O.
Neher	Georges		Oberwichttrach
Netzer	Werner	Vorarlberger Illwerke AG	Schruns
Neuhold	Stefan	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich
Obrist	Franz	Kraftwerk Frisal AG	Ilanz
Petitot	Michel	Arnold AG	Selzach
Rütschi	Heidi	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich
Sauer	Adrian	Elektrizitätsversorgung Safien	Safien-Platz
Schär	Mark	Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung	Davos Dorf
Schnurr	Peter	Herzog + Sonderegger AG	Zürich
Seiler	Kurt	Forces Motrices de Mauvoisin SA	Sion
Sener	Olaf	Energie Baden-Württemberg Regioal AG	Stuttgart
Socchi	Diego	EA Elektroarmaturen AG	Schaffhausen
Stäheli	Willi	Aare-Tessin AG	Olten
Stauch	Erwin	St. Gallisch-Appenzellische Kraftwerke AG	St. Gallen
Storf	Günther	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich



FKH - / VSE - Fachtagung 2000 „Hochspannungsfreileitungen“

Strub	Helmut	Nordostschweizerische Kraftwerke AG	Baden
Suter	Rolf	Schweizerische Bundesbahnen, Bern	Zollikofen
Vilchez	José	VIL Consulting	Zürich
Vogt	Thomas	Rätia Energie	Poschiavo
von Deschwanden	Toni	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich
Weber	Hans-Jürg	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich	Zürich
Weber	Martin	Elektrizitäts-Gesellschaft Laufenburg AG	Laufenburg
Weibel	Martin	Aare-Tessin AG	Olten
Wintermantel	Kurt	AEW Energie AG	Aarau
Würsten	Martin	Alcatel Cable Suisse SA	Cortailod
Zaengl	W.S.	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich	Dübendorf
Zimmermann	Hanspeter	Elektrizitätswerk der Stadt Zürich	Zürich
Zimmermann	Heinrich	Aare-Tessin AG für Elektrizität	Olten
Zuber	Armin	Centralschweizerische Kraftwerke	Luzern
Zutter	Jean-Pierre	Romande Energie SA	Morges 1

**Referentenadressen**

Ammann	Michel	S.A. l'Energie de l'Ouest-Suisse EOS Pl. de la Gare 12 1001 Lausanne	michel.ammann@eos-gd.ch Tel 021 341 23 53 Fax 021 341 20 49
Ammann Dr.	Walter	Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung Flüelastrasse 11 7260 Davos Dorf	ammann@slf.ch Tel 081 417 02 31 Fax 081 417 01 10
Blanc	Jean-Paul	Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen Gerbergasse 5 8023 Zürich	vse@strom.ch Tel 01 226 51 40 Fax 01 226 51 91
Bräunlich Dr.	Reinhold	Fachkommission für Hochspannungsfragen Voltastrasse 9 8044 Zürich	braeunlich@fkh.ch Tel 01 253 62 63 Fax 01 253 62 60
Delomel	J. Ch.	Kontakt über Herrn Th. Heizmann	
Friedrich Dr.	Giorgio	diAx Thurgauerstrasse 60 8050 Zürich	friedrich@diAx.ch Tel 01 300 43 10 Fax 01 300 42 12
Gerber	Markus	BKW FMB Energie AG Tragwerkengineering BNT Viktoriaplatz 2 3000 Bern 25	markus.gerber@bkw-fmb.ch Tel 031 330 53 85 Fax 031 330 56 35
Heizmann Dr.	Thomas	Alcatel Cable Suisse SA 2, Rue de la Fabrique 2016 Cortaillod	heizmann@alcatel-cable.ch Tel 032 843 53 75 Fax 032 843 51 07
Heutschi Dr.	Kurt	EMPA Akustik u. Lärmbekämpfung Überlandstrasse 129 8600 Dübendorf	kurt.heutschi@empa.ch Tel 01 823 47 43 Fax 01 821 62 44
Neher	Georges	Bergweg 12 3114 Oberwichtach	georges.neher@bkw-fmb.ch Tel 031 781 16 96 Fax
Schär	Mark	Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung Flüelastrasse 11 7260 Davos Dorf	schaerm@mail.slf.ch Tel 081 417 02 31 Fax 081 417 01 10
Strub	Helmut	Nordostschweizerische Kraftwerke AG Parkstrasse 23 5401 Baden	stb@nok.ch Tel 056 200 33 98 Fax 056 200 38 91
Weber	Hans-Jürg	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich FG Hochspannungstechnologie Physikstrasse 3 8092 Zürich	weber@eeh.ee.ethz.ch Tel 01 632 27 10 Fax 01 632 12 02
Zimmermann Dr.	Heinrich	Aare-Tessin AG für Elektrizität, ATEL Bahnhofquai 12 4601 Olten	heinrich.zimmermann@atel.ch Tel 062 286 72 58 Fax 062 286 76 65

