Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 74 (1983)

Heft: 22

Artikel: Der Einfluss der Bündelanordnung auf die maximal auftretende Feldstärke bei Höchstspannung-Freileitungen

Autor: Schwab, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904888

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 09.12.2025

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

Anteile einzelner Abteilungen am gesamten Stromverbrauch der ETHZ im Jahre 1981, zusammen mit dem Hönggerberg, aber ohne Aussenstationen und Annexanstalten

Tabelle II

Abteilung	Studenten		Stromverbrauch		Verbrauch je Student und Jahr
	Anzahl	%	Anteil kWh	%	kWh
Maschinenbau	837	13,9	1 450 000	2,7	1 732
Elektrotechnik	1020	17	2 316 000	4,3	2 270
Chemie	427	7,1	10 335 000	19,6	24 203
Pharmazeutik, Naturwissenschaft	630	10,6	2 032 000	3,7	3 184
ETHZ, total	6003	100	53 946 000	100	8 986

über die Entwicklung des Stromverbrauches der ETH je immatrikulierten Studenten. Dabei fällt auf, dass die chemischen Institute gesamthaft gegenüber anderen Abteilungen bei 24 203 kWh je Student und Jahr mit grossem Abstand die Spitze einnehmen.

In Figur 21 ist als Ergänzung noch die Belastungskennlinie des ETH-Zentrums für das Betriebsjahr 1981 aufgezeichnet. Zwischen etwa 2500 und 8500 Stunden weicht zwar die Kurve deutlich von der theoretischen Ideallinie ab, doch darf die auf Grund des Gesamtverbrauches der beiden Sektoren 1 und 2 errechnete Benutzungsdauer von 4650 Stunden im Vergleich zu Industriebetrieben (im Durchschnitt 2000 bis 3000 Stunden) als sehr gut bezeichnet werden.

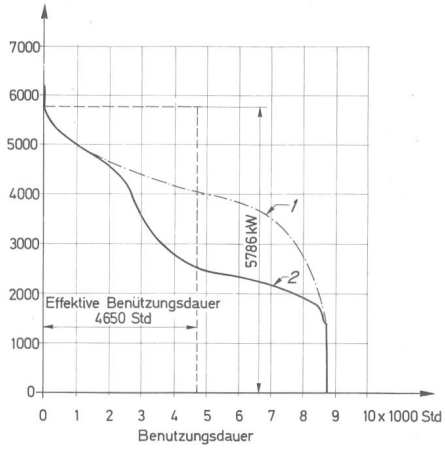

Fig. 21 Belastungskennlinie ETH-Zentrum für das Jahr 1981

1 theoretische Ideallinie
2 effektiv gemessene Werte

Der Einfluss der Bündelanordnung auf die maximal auftretende Feldstärke bei Höchstspannungs-Freileitungen

F. Schwab

Die verschiedenen möglichen Bündelanordnungen von 400-kV-Freileitungen werden untersucht und der Grenzwertfeldstärke gegenübergestellt. Der Zweierbündel liegt wegen der heute höheren Betriebsspannung bei extremen meteorologischen Verhältnissen an der oberen Grenze und sollte künftig eher mit höherem Teilleiterquerschnitt ausgerüstet oder durch den Dreierbündel ersetzt werden.

L'article analyse les différentes dispositions possibles des faisceaux pour les lignes aériennes à 400 kV et les oppose à la valeur limite de l'intensité de champ. En raison de la tension d'exploitation actuellement plus élevée, les faisceaux à deux conducteurs se situent à la limite supérieure en cas de conditions météorologiques extrêmes, et il vaudrait mieux installer un conducteur élémentaire de section plus élevée ou les remplacer par un faisceau à trois conducteurs.

Adresse des Autors

Dr. *F. Schwab*, dipl. Ing. ETH, Vizedirektor, Aare-Tessin AG für Elektrizität, 4600 Olten.

1. Einleitung

Die Übertragungsleitungen, eine der drei Säulen der Elektrizitätsversorgung, sind etlichen Gefahren und Beanspruchungen ausgesetzt [1, 2, 3] und sollten gegenüber der Umwelt keine Emissionen erzeugen. Eine mögliche Beeinträchtigung der Umgebung liegt im Koronaeffekt. Früher wurden die Höchstspannungsleitungen wegen des damals üblichen Mittelwellen-Radiohörens in erster Linie auf niedrige Radiostörspannungen ausgelegt [4, 5]. Im heutigen UKW-Zeitalter stehen die akustischen Störungen im Vordergrund. Es kann in seltenen Fällen vorkommen, dass 400-kV-Leitungen Lärmemissionen erzeugen. Bei trockenem und schönem Wetter sind alle Leitungen geräuschfrei, aber bei extrem hoher Luftfeuchtigkeit, d.h. im Nebel oder bei Regen, können die Leiter brummen. Bei trockener Luft wird auch an den Zweierbündeln von Höchstspannungsleitungen die Einsatzfeldstärke zur Bildung von Stielbüscheln nicht erreicht, aber schon kleine Unebenheiten am Leiter, wie sie bei der Tropfenbildung entstehen, genügen, den Stielbüscheleinsatz und damit das Brummen zu erzeugen. Es stellt sich somit die Frage, wie gross die auftretenden Felder sind und wie die Einsatzfeldstärke herabgesetzt werden kann.

2. Optimierung der Bündelanordnung

Die Einsatzfeldstärke wird von sehr vielen Faktoren beeinflusst. Die meteorologischen Faktoren wie Druck, Temperatur und Luftfeuchtigkeit werden von der Wetterlage diktiert. Die Höhe der Spannung wird vom europäischen Verbund bestimmt und kann daher kaum beeinflusst werden. Es bleiben die geometrische Anordnung, d.h. Anzahl der Teilleiter pro Bündel, Querschnitt der Teilleiter und Abstand

derselben sowie die Höhe des Bündels über Boden und der Abstand zwischen den einzelnen Bündeln. Geht man davon aus, dass man an einer Leitung weder die Trasseeführung noch die Masthöhe ändern will, bleiben als Parameter nur die Anzahl Teilleiter pro Bündel, der Teilleiterradius und deren Abstand im Bündel, um eventuelle Verbesserungen zu erreichen.

3. Zweierbündel

In der Schweiz wurde bis vor einigen Jahren ausschliesslich der Zweierbündel für Höchstspannungsleitungen verwendet. Daher soll zuerst an dieser Anordnung das Optimum des Seilquerschnittes und des Teilleiterabstandes gesucht werden.

Die maximale Feldstärke an einem Zweierbündel gegen den Erdboden berechnet sich zu

$$E_{max} = \left(1+\frac{2r}{s}\right)\frac{U}{2r\ln(2h/\sqrt{s\,r})}$$

Dabei bedeuten

r = Teilleiterradius
s = Bündelabstand
h = mittlere Höhe über Boden

Diese Formel gilt für polierte, zylindrische Seile gegen Erde ohne Berücksichtigung der übrigen Bündel, des Erdseiles und der Feldstörung durch die Masten.

In Figur 1 wurde die maximale Feldstärke in Funktion der Bündeldistanz von 20 bis 60 cm für sieben Seilquerschnitte von 550 bis 850 mm² ausgerechnet. Für alle Seilquerschnitte wurde ein Seilfüllfaktor von 0,75 zugrunde gelegt, was die Teilleiterradien von 1,528, 1,596, 1,661, 1,724, 1,784, 1,843 und 1,899 cm für die entsprechenden Querschnitte von 550, 600, 650, 700, 750, 800 und 850 mm² ergab. Wie aus Figur 1 ersichtlich ist, liegt die minimale Feldstärke zwischen einem Teilleiterabstand von 35 bis 41 cm. Ein höherer Teilleiterabstand bringt eine unwesentliche Änderung der Feldstärke; hingegen sieht man, dass bei kleinerem Teilleiterabstand, wie er zum Beispiel nach einem extremen Kurzschluss durch das Zusammenklappen der Abstandhalter auftreten kann, die Feldstärke merkbar ansteigt. Klar ersichtlich ist die Verringerung der Feldstärke durch einen grösseren Seilquerschnitt; hier macht die Verbesserung etwa 6% pro 100 mm² Querschnitt aus.

Man sieht aus Figur 1, dass man mit dem Teilleiterabstand keine Verbesserung der Einsatzspannung erreichen kann. Der Teilleiterabstand von 40 cm entspricht ungefähr dem Optimalen, wobei sich dieser bei zunehmendem Querschnitt leicht nach etwas höheren Werten verschiebt.

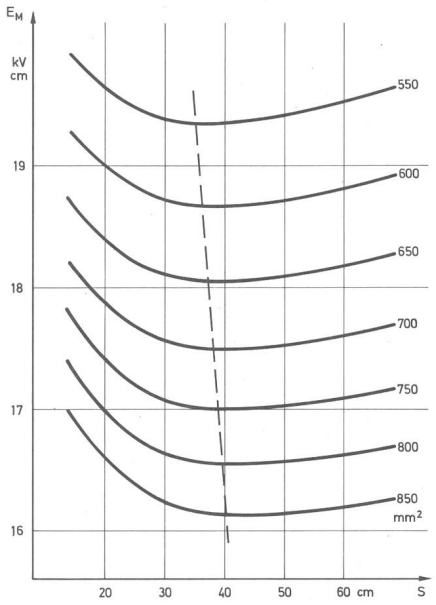

Fig. 1 Maximale Feldstärke in Funktion des Zweierbündelabstandes Parameter: Seilquerschnitt

4. Grenzwerte der Feldstärke

Überschreitet der Scheitelwert der Wechselspannung einer Übertragungsleitung die sogenannte Anfangsspannung, so tritt in jeder Halbwelle der Betriebsfrequenz eine Ionisierung und damit eine nicht reversible Energieumsetzung auf. Die Ionisierungsenergie wird beim Rückgang der Spannung nicht mehr wesentlich in elektrische Energie zurückgewonnen, da praktisch keine Rückwanderung von Ladungen zu den Leitern stattfindet; sie wird vielmehr zum grossen Teil durch Rekombination in der Nähe des Spannungsnulldurchganges in Licht umgesetzt und zum Teil bereits bei der Ionisierung durch Ionenstoss auf Luftmoleküle sowie Elektronen- und Ionenaufprall auf den Leiter, in Wärme umgesetzt. Zuerst erscheinen auf dem Leiter überall dort, wo geringe Unregelmässigkeiten auf der Leiteroberfläche oder Staubteilchen eine örtliche Erhöhung des elektrischen Feldes bewirken, vereinzelte Leuchtbüschel. Diese Spitzenkorona bildet sich nur in der Nähe des Maximalwertes der negativen Halbwelle, und die Radiostörimpulse entstehen ebenfalls in diesem Moment. Wie eingangs erwähnt, waren früher für die Dimensionierung der Leiteranordnung diese Radiostörspannungen im Mittelwellenbereich massgebend. Bei höherer Spannung beginnen die Entladebüschel auch während der positiven Halbwelle, wodurch ein Knattern hörbar wird und die Radiostörspannungen und Verluste stark ansteigen. Mit steigender Spannung, steigender Inhomogenität am Leiter oder sinkender Luftdichte entsteht die Hüllkorona, wobei die Leiter vollständig von einer leuchtenden Koronahülle umgeben sind; das Geräusch geht in ein Brummen über, hingegen steigen die Radiostörspannungen nicht weiter an.

Für den UKW-Radioempfang sowie den VHF- und UHF-Fernsehempfang sind wegen der hohen Dämpfung in Luft dieses Frequenzband und damit die Radiostörspannungen nicht mehr von grosser Bedeutung. Da heute vielfach Wohnquartiere in die Leitungstrassen hineinwachsen, spielt die akustische Beeinträchtigung die wesentlichere Rolle.

Die höchstzulässige Randfeldstärke an der ungünstigsten Stelle der Seiloberfläche ist vom Leiterradius und von der Teilleiterzahl abhängig. Sie bestimmt sich aus der Anfangsspannung zu [6].

$$E_R = 18{,}8 - \frac{2}{0{,}3}\log r - \frac{10}{3}\log n\ [\mathrm{kV/cm}]$$

Darin bedeutet

r = Teilleiterradius
n = Bündelanzahl

Um alle meteorologischen und normalen Verschmutzungseinflüsse abzudecken, sollte die höchstzulässige Randfeldstärke eines Zweierbündels je nach Teilleiterradius 16 bis 17 kV/cm, im Mittel also 16,5 kV/cm, nicht übersteigen.

Aus Figur 1 ist ersichtlich, dass dies mit einem Bündel 2×800 mm² noch knapp erzielt wird. Wie Figur 2 zeigt, ist der optische Unterschied zwischen einem Leiter mit 600 mm² und einem

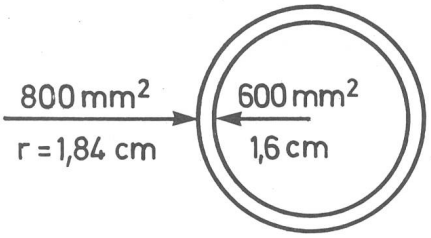

Fig. 2 Vergleich der Seilquerschnitte 600 mm² und 800 mm²

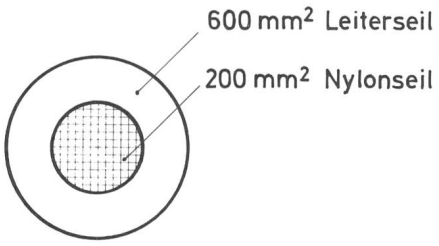

Fig. 3 Pseudohohlleiter

solchen mit 800 mm² erstaunlich gering. Dabei kann, damit das Leitergewicht gegenüber dem Leiter mit 600 mm² nicht höher wird, ein Pseudohohlleiter eingesetzt werden, bei dem die inneren 200 mm² Querschnitt aus einem Nylonseil bestehen, wie dies in Figur 3 dargestellt ist. Bei der Verwendung eines Stahlseiles an Stelle des Nylonseiles können der Durchhang der Leitung verringert und so niedrigere Masten eingesetzt werden

5. Mehrfachbündel

Eine wesentliche Verbesserung des Feldstärkenproblems kann durch den Einsatz von Mehrfachbündeln erreicht werden. Vergleicht man die in Figur 4 aufgeführten Zweier-, Dreier- und Viererbündel mit gleichem Anordnungskreisradius von 20 cm und gleichen Teilleitern von 600 mm² Querschnitt, so ergibt die Berechnung, dass der Dreierbündel 3×600 mm² gegenüber dem Zweierbündel 2×600 mm² eine um 27% tiefere maximale Feldstärke aufweist, der Viererbündel 4×600 mm² sogar 42% weniger, d.h. dass die 18,7 kV/cm des Zweierbündels auf 13,6 bei einem Dreierbündel sinken oder sogar auf 10,8 kV/cm bei einem Viererbündel.

Geht man im Gegensatz zu den oben aufgeführten 600 mm²-Bündeln von einem gleichbleibenden Totalleiterquerschnitt von 1200 mm² aus, so ständen die Bündel 3×400 mm², 4×300 mm², 6×200 mm² oder 12×100 mm² zur Auswahl. Die entsprechenden maximalen Feldstärken sind in Tabelle I aufgeführt.

Daraus ist ersichtlich, dass der Dreierbündel die Anforderungen bezüglich der Randfeldstärke erfüllt und daher der optimalen Leiteranordnung für 420 kV entsprechen dürfte. Klar ersichtlich ist der Unterschied in der maximalen Feldstärke zwischen dem 3×600 mm² Bündel mit 13,6 kV/cm und dem 3×400 mm² Bündel mit 16,6 kV/cm, indem die Randfeldstärke bei Bündel mit einer kleinen Anzahl Teilleitern wesentlich vom Teilleiterradius bestimmt wird. Der Dreierbündel wurde mit 3×600 mm² in der Schweiz erstmals bei der Atel-NOK-Leitung Beznau–Leibstadt–Laufenburg eingesetzt und hat sich bezüglich der Unterdrückung jeglicher Lärmemission bewährt. Allerdings wurde diese Leitung aus Belastungsgründen so ausgerüstet.

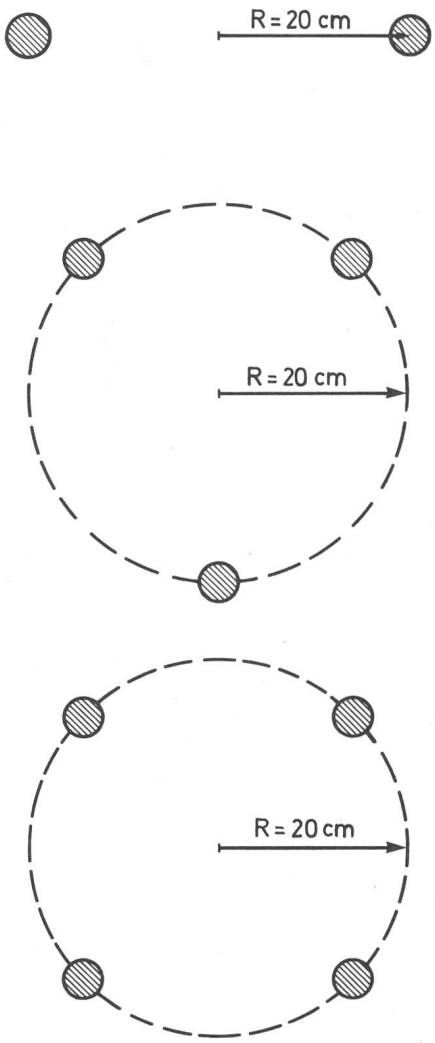

Fig. 4 Verschiedene Bündelanordnungen

Maximale Feldstärke in Funktion der Anzahl Teilleiter Tabelle I

Bündeltyp	max. Feldstärke
2×600 mm²	18,7 kV/cm
3×400 mm²	16,6 kV/cm
4×300 mm²	14,9 kV/cm
6×200 mm²	12,5 kV/cm
12×100 mm²	9,1 kV/cm

6. Schlussfolgerungen

Der mit 2×550 oder 2×600 mm² ausgerüstete Zweierbündel wurde für eine maximale Betriebsspannung von 380 kV ausgelegt. Heute steigt die Verbundspannung bis auf 415 kV, so dass der Zweierbündel an der obersten Grenze bezüglich Einsatzspannung liegt. In sehr kritischen Situationen, zum Beispiel in extrem nebelhäufigen Gegenden, wird man nur eine für immer befriedigende Lösung finden, indem entweder über einige hundert Meter ein dritter Leiter mitgezogen wird oder der Einzug eines 2×800 mm² Pseudohohlleiters vorgesehen wird. Bei bestehenden Leitungen dürfte letzteres die einfachere Variante darstellen. Bei neuen Leitungen wird die benötigte Übertragungskapazität ausschlaggebend sein, welche Art gewählt wird, da dann die gesamte Leitung stielbüscheleinsatzsicher konzipiert werden sollte, da eine spätere Ausdehnung der Wohnungsgebiete nicht voraussehbar ist.

Literatur

[1] *F. Schwab:* Blitzsichere Freileitungen. Bull. SEV 55(1964)3, S. 87...90.
[2] *W. Schmidt, F. Schwab:* Fremdschichtprobleme auf Freileitungsisolatoren in unmittelbarer Nähe von Autobahnen. Bull. SEV 63(1972)5, S. 227...230.
[3] *F. Schwab:* Einfache Bestimmung der Schichtleitfähigkeit auf Isolatoren in der Praxis. Bull. SEV/VSE 66(1975)14, S. 757...759.
[4] *E. Seylaz, K. Berger:* Versuchsanlagen für die Messung der Koronaverluste von Höchstspannungsleitern unter willkürlich erzeugbaren oder natürlichen klimatischen Verhältnissen. Bull. SEV 43(1952)14, S. 593...601.
[5] *J. Meyer de Stadelhofen, W. Walter:* Beitrag zur Voraussage des Störverhaltens von Höchstspannungsleitungen. Techn. Mitt. PTT (1957)11, S. 456...479.
[6] *H. Langrehr:* Rechnungsgrössen für Hochspannungsanlagen, AEG-Telefunken, Berlin 1968.