

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 11 (1920)

Heft: 8

Artikel: Aneisungsformeln : ein Beitrag zur Festigkeitsberechnung der Freileitungen

Autor: Edler, Robert

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061804>

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: 17.02.2026

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

spéciales pour éviter le contact avec les conducteurs et où les isolants pourraient être relativement faibles, puisque la tension, par rapport à la terre n'excéderait pas 220 volts. Dès qu'on aurait affaire à des moteurs importants on les enroulerait pour la haute tension et l'on ferait usage d'un appareillage approprié et soigneusement mis à l'abri de tout contact. L'emploi d'une moyenne tension ne s'impose en aucun cas et les tensions moyennes sont au surplus les plus dangereuses de toutes, parce qu'elles n'inspirent pas la crainte salutaire qui est en somme la meilleure protection.

Nous sommes naturellement loin de penser que les installations existantes à 500 volts vont disparaître ou cesser complètement de se développer, mais nous croyons que ce serait une faute de déclarer *normale* cette tension de 500 volts ou une tension seulement légèrement supérieure; là où elle n'existe encore pas on peut très bien s'en passer.

Et enfin est-il utile d'introduire pour ces tensions des termes tels que „sous-normal“ ou „demi-normal“ avec lesquels on voudrait contenter tout le monde? Ne serait-ce pas rendre illusoires les effets de la normalisation?

Aneisungsformeln.

Ein Beitrag zur Festigkeitsberechnung der Freileitungen.

Von Prof. Ing. Robert Edler, Wien.

I. Einleitung.

Die Berechnung des Durchhanges und der Spannung (Drahtzug, Seilzug) der Freileitungen mit Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur und der hierdurch verursachten thermischen und elastischen Längenänderungen wurde bereits von vielen Autoren behandelt, wobei nebst eingehenden theoretischen Untersuchungen auch einige sehr schätzenswerte, praktische Rechenbehelfe und graphische Lösungen der Aufgabe veröffentlicht wurden¹⁾. Zumeist stützen sich diese Abhandlungen auf die gewöhnlich ohne weiteres zulässige Annahme, dass die theoretisch richtige Form der Seilkurve (Kettenlinie) durch die für die Rechnung wesentlich bequemere Parabel ersetzt werden darf; einige Abhandlungen behandeln jedoch auch die Aufgabe mit Berücksichtigung der Kettenlinie, wobei besonders auf den Einfluss sehr grosser Spannweiten, sowie auf die Sonderverhältnisse bei ungleich hohen Stützpunkten („schiefe“ Spannfelder) hingewiesen wird. In dieser Hinsicht wird besonders auf die sehr gründliche und schätzenswerte Abhandlung von Dipl.-Ing. Abel Jobin „Die Berechnung der Freileitungen mit Rücksicht auf die mechanischen Verhältnisse der Leiter“ aufmerksam gemacht (Bulletin des S. E. V. 1919, No. 6 und 7).

Die theoretischen Grundlagen und die daraus abgeleiteten Berechnungsmethoden für Freileitungen ermöglichen deingemäss eine in jeder Hinsicht befriedigende Lösung der in der Praxis des Leitungsbau und der Instandhaltung vorkommenden Fragen, falls die Art und die Grösse der Belastungen gegeben ist; auch der Sicherheitsgrad der betreffenden Bauweise lässt sich bestimmen, sobald die Höchstbelastung bekannt ist; an dieser Stelle des Rechnungsganges stösst aber der Ingenieur auf die grössten Schwierigkeiten, denn es ist trotz vielfacher Bemühungen noch nicht gelungen, den Einfluss der Zusatzlasten, welche infolge der meteorologischen und klimatischen Verhältnisse (Schnee, Eis, Rauhreif, sowie Wind) auftreten, einwandfrei und allgemein gültig durch die Rechnung zu erfassen²⁾. Zweifellos sind die meteorologischen Einflüsse in den verschiedenen Ländern ihrer Grösse nach durchaus nicht gleichwertig, und dies erklärt es auch, dass die Vorschriften, welche von den Aufsichtsbehörden und von den massgebenden technischen Vereinigungen herausgegeben wurden, in den verschiedenen Ländern sehr erheblich voneinander abweichen. Am meisten geklärt sind in dieser Hinsicht die Einflüsse des Winddruckes, der doch

¹⁾ Literaturangaben folgen am Schlusse dieses Aufsatzes.

²⁾ Vergleiche Prof. Dr. Wyssling, Bulletin des S. E. V., 1916, Seite 157 und f. Pillonel, Bulletin des S. E. V., 1917, Seite 73 und f., ferner Literaturnachweis am Schlusse des vorliegenden Aufsatzes.

wenigstens der *Art* nach vollständig berücksichtigt werden kann, so dass zwar noch Unterschiede in der *Grösse* des Winddruckes je nach den herrschenden klimatischen Verhältnissen zu berücksichtigen sind, während der Rechnungsgang selbst ungeändert bleibt.

Wesentliche Unterschiede weist dagegen die Auffassung über den Einfluss der *Zusatlast* durch *Schnee*, *Eis* und *Rauhreif* auf, da sich dafür in den verschiedenen Ländern (hier soll nur die Schweiz, Deutschland und Oesterreich berücksichtigt werden), verschiedene Annahmen Geltung verschafften, die nicht nur bezüglich der *Grösse* dieses Einflusses, sondern auch hinsichtlich der *Art* der *Aneisung* recht weit voneinander abweichen; dabei kommen nicht nur Unterschiede im Zusammenhange zwischen dem *Grade der Aneisung* und dem *Durchmesser* der Leitung (Draht, Seil) in Frage, sondern auch verschiedene Ansichten über die *Temperatur*, bei welcher die Zusatlast zu berücksichtigen ist (so in der Schweiz eine Schneelast bei 0° Celsius, in Deutschland und Oesterreich eine Eislast bei -5° Celsius).

Bemerkenswert ist es, dass zwar sowohl in der Schweiz einerseits, als auch in Deutschland und Oesterreich anderseits die Bemühungen, die Frage der Zusatlast (Schnee und Eis) zu klären, ununterbrochen auf der Tagesordnung stehen, dass aber doch in der Schweiz vorläufig noch die Bundes-Vorschriften vom Jahre 1908 in Kraft geblieben sind (fünffache Sicherheit bei -20° Celsius, bzw. bei -25° Celsius ohne Zusatlast)¹⁾ und dass nur noch festzustellen ist, ob die Leitung mit Zusatlast bei 0° Celsius noch eine $2\frac{1}{2}$ fache Sicherheit aufweist, während in Deutschland und Oesterreich seit dem Jahre 1908 (bzw. 1907) die mehrfach erneuten Vorschriften schon drei verschiedene Berechnungsgrundlagen für die Aneisung enthalten, ohne dass damit schon eine endgültige und einwandfreie Lösung gesichert worden wäre.

Ueber die verschiedenen Grundlagen für die Berechnung der Schnee- und Eis-Zusatlast folgen weiter unten genauere Angaben, sowie die zahlenmässigen Ergebnisse der Berechnungen, wie sie für praktische Zwecke bequem verwertet werden können²⁾; hier sei nur vorerst noch erwähnt, dass der Wiener Elektrotechnische Verein kürzlich einen *Aufruf* ergehen liess³⁾ zur Anstellung von *Beobachtungen* über die Eis- und Schneearlagerungen auf Freileitungen; ein zweckmässig abgefasster *Fragebogen*, der von Direktor Ing. L. Kallir, (Wien, A. E. G.) verfasst wurde, bildet die Grundlage für eine zweckmässige und erfolgversprechende Durchführung dieser gewünschten Beobachtungen⁴⁾. Es sei übrigens darauf hingewiesen, dass schon früher von Ing. Dr. E. Nather (Wien)⁵⁾ und vom Verfasser des vorliegenden Aufsatzes⁶⁾ derartige *planmässige Beobachtungen* über die Zusatlast durch Eis, Schnee und Rauhreif angeregt wurden, denn *nur* auf diesem Wege können die vorläufig als Richtschnur geltenden Zahlwerte in den verschiedenen Berechnungsvorschriften entweder endgültig gefestigt oder aber durch verbesserte Rechnungswege und Zahlwerte ersetzt werden.

Es wäre sehr zu begrüssen, wenn diese Anregungen, welche in dem obenerwähnten Aufrufe des Wiener Elektrotechnischen Vereins in greifbare und zweckentsprechende Form gebracht wurden⁷⁾, auch in der *Schweiz* und in *Deutschland* günstig aufgenommen würden, weil dadurch eine gleichgerichtete Förderung der für alle drei Länder wichtigen Berechnungsgrundlagen für die Freileitungen erreicht werden könnte.

Wenn man bedenkt, dass Freileitungen in den Grenzgebieten gemäss verschiedenen Vorschriften zu entwerfen sind, obgleich die Natur keine solchen Unterschiede kennt, so

¹⁾ Vergleiche Jobin, Sonderabdruck aus dem Bulletin des S. E. V. 1919, Heft 6 und 7.

²⁾ Vergleiche auch: Edler, Hilfswerte zur Berechnung der Freileitungen E. und M., Wien 1919, Heft 47 und 48, Seite 533 und 547.

³⁾ E. und M. 1919, Heft 51, Seite 596.

⁴⁾ Auch das Starkstrominspektorat des S. E. V. hat einen ähnlichen Aufruf an schweizerische Elektrizitätswerke erlassen. Siehe Bulletin 1917, Seite 44; 1919, Seite 366.

⁵⁾ E. und M. 1918, Heft 44, Seite 486, Spalte 2.

⁶⁾ Vergleiche E. und M. 1919, Heft 48, Seite 551, Spalte 2.

⁷⁾ Fragebogen gibt der Wiener Elektrotechnische Verein (Wien VI, Theobaldgasse 12) in beliebiger Anzahl ab.

wird man jede Bestrebung, die Verhältnisse durch *planmässige Beobachtungen zu klären*, dann aber für die Berechnung womöglich *einheitliche Grundlagen* aufzustellen, soweit dies eben die Gleichartigkeit der klimatischen und meteorologischen Vorbedingungen zulässt und rechtfertigt, warm begrüssen und nach Kräften fördern müssen.

Eine ausreichende Klärung aller Fragen, die mit der Aneisung zusammenhängen, ist aus den Ergebnissen der angeregten Beobachtungen erst in einiger Zeit, etwa nach zwei Winterperioden, zu erwarten, weil eben derzeit einigermassen umfassende, ja sogar nur gerade ausreichende Beobachtungen und Erfahrungen noch nicht vorliegen. In der Zwischenzeit bis zur Sichtung, Klärung und Verwertung der hoffentlich recht zahlreich zu erwartenden Beobachtungsergebnisse müssen aber die spärlichen und noch verhältnismässig stark schwankenden Erfahrungen ausreichen, um im Zusammenhang mit theoretischen Ueberlegungen und allgemeinen meteorologischen Betrachtungen die Grundlagen für die Berechnungswege im praktischen Freileitungsbau zu schaffen, bezw. nach Möglichkeit zu stützen und zu fördern.

Es ist der Zweck des vorliegenden Aufsatzes, diese Anhaltspunkte darzustellen und kritisch zu vergleichen; dabei wird sich hinreichend Gelegenheit ergeben, erprobte Gesichtspunkte hervorzuheben, sowie auch Unbrauchbares oder Unzweckmässiges in begründeter Weise als solches zu kennzeichnen und endlich an Hand der praktischen Erfahrungen und der theoretischen Erwägungen neue Anhaltspunkte oder Rechnungswege zu gewinnen oder doch wenigstens vorzubereiten.

II. Theoretische Grundlagen.

In Fig. 1 ist der Querschnitt einer Leitung samt dem Eis- oder Schneebelag dargestellt; es sei dabei:

d in cm: Der Durchmesser des blanken Drahtes; (d_0 derselbe in mm);

d_s in cm: Der Durchmesser des Kreises, der dem Seilquerschnitt umschrieben werden kann (Seil-Aussendurchmesser);

d_t in cm: Der Aussendurchmesser des vereisten Seiles, bezw. der Schneewalze; s in cm: Die einseitig gemessene Dicke des Eis- oder Schneebelages;

q in cm^2 : Die Querschnittsfläche des Drahtes oder Seiles („Nennquerschnitt“) q_0 derselbe in mm^2 ;

q_s in $\text{cm}^2 = \frac{\pi}{4} \cdot d_s^2$: Die scheinbare Seil-Querschnittsfläche;

q_1 in cm^2 : Die Querschnittsfläche eines Einzeldrahtes im Seil;

n : Die Zahl der Einzeldrähte;

$n \cdot q_1$ in cm^2 : Die wirkliche Querschnittsfläche des Seiles;

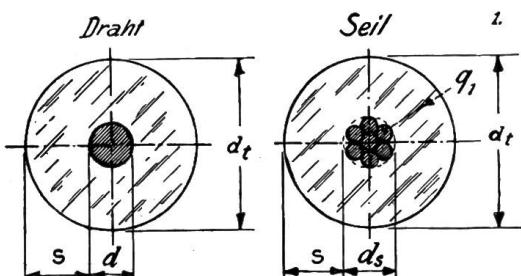


Fig. 1.

$\varepsilon = \frac{n \cdot q_1}{q_s}$: Der Füllungsfaktor des Seilquerschnittes;

q_t in cm^2 : Die Querschnittsfläche des Drahtes oder Seiles samt dem Schneebelag;

q_e in cm^2 : Die Querschnittsfläche des Eisbelages allein (ohne Draht, bezw. Seil);

q_f in cm^2 : Die Querschnittsfläche des Schneebelages allein.

Man erhält somit aus Fig. 1 für Drähte (für Seile wäre d_s anstatt d einzusetzen):

$$q_e = \frac{\pi}{4} \cdot (d_t^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (d_t + d) \cdot (d_t - d) = \pi \cdot s \cdot (d + s) \quad (1)$$

In der *Tabelle I*, welche nach den durch die Nachträge vom Jahre 1919¹⁾ ergänzten *Normen für Freileitungen* des V. D. E. (1. Januar 1914)²⁾ entworfen ist³⁾, sind die wichtigsten Draht- und Seilquerschnitte eingetragen. Die Seilquerschnitte sind dabei aus Einzeldrähten von 1,7 ... 2,1 ... 2,5 und 2,8 mm zusammengesetzt; allerdings ist diese vom V. D. E. empfohlene *Normung der Seilquerschnitte* noch nicht allgemein durchgeführt und es kommen noch zahlreiche, von diesen Normen abweichende Seile in der Praxis vor; dadurch würde natürlich der genaue Seilquerschnitt und damit auch das genaue Seilgewicht pro 1 m andere Werte annehmen, als in der Tabelle I enthalten sind. Es ist deshalb für die weiteren Berechnungen das Seilgewicht G_1 (Gramm für 1 m) und später auch die grösste zulässige Zugkraft P (kg) auf den *Nennquerschnitt* q (cm^2) bezogen, weil derselbe von der jeweiligen Seilkonstruktion ganz unabhängig ist.

Zusammenstellung über Gewichte von Drähten und Seilen für Freileitungen und Füllfaktoren für Seile.

Tabelle I

Nennquerschnitt q cm^2	Draht	Seil Zahl d. Drähte n	Durchmesser		Gewicht G_1 für 1 m			wirklicher	scheinbarer	Seilfüllungs-faktor $\epsilon = \frac{n \cdot q_1}{q_s}$
			Draht	Seil aussern	$\gamma = 8,9 \text{ g/cm}^3$	$\gamma = 2,84 \text{ g/cm}^3$	$\gamma = 7,85 \text{ g/cm}^3$	Seilquerschnitt		
			d_0 in mm	d_{s_0} in mm				$n \cdot q_1$ cm^2	$q_s = \frac{\pi}{4} \cdot d_s^2$ cm^2	
0,06	1	—	2,8	—	53,4	—	47,1	—	—	—
0,10	1	—	3,5	—	89,0	28,4	78,5	—	—	—
0,16	1	—	4,5	—	142,4	45,4	125,6	—	—	—
0,25	1	—	5,5	—	222,5	71,0	196,25	—	—	—
0,35	1	—	6,5	—	311,7	99,4	274,75	—	—	—
0,50	1	—	8,0	—	445	142	392,5	—	—	—
0,16	—	7	1,7	5,2	142,4	45,4	125,6	0,1589	0,2124	0,7475
0,25	—	7	2,1	6,5	222,5	71,0	196,25	0,2425	0,3318	0,732
0,35	—	7	2,5	7,7	311,7	99,4	274,75	0,3436	0,4657	0,738
0,50	—	14	2,1	9,2	445	142	392,5	0,4849	0,6648	0,730
0,70	—	19	2,1	10,9	623	199	549,5	0,6581	0,9331	0,705
0,95	—	19	2,5	12,7	845	270	745,75	0,9327	1,2668	0,736
1,20	—	19	2,8	14,2	1068	341	942,0	1,1699	1,5837	0,738
1,50	—	30	2,5	15,9	1335	426	1177,5	1,4726	1,9856	0,741
1,85	—	37	2,5	17,7	1647	525	1452,25	1,8162	2,4606	0,738
2,40	—	37	2,8	20,1	2136	682	1884,0	2,2783	3,1731	0,7175
3,10	—	61	2,5	22,9	2759	880	2433,5	2,9943	4,1187	0,7275

Ueber die *Dicke s des Eis- oder Schneebelages* wurden nun in den verschiedenen Berechnungsvorschriften mehrere wesentlich voneinander abweichende Annahmen gemacht⁴⁾:

- A. Die Dicke s des Eis- oder Schneebelages *wächst* mit dem Leiterdurchmesser d und zwar:
 1. in geradem Verhältnis;
 2. in abnehmendem Verhältnis.
- B. Die Dicke s des Eis- oder Schneebelages *bleibt ungeändert*, einerlei, ob der Leiterdurchmesser d klein oder gross ist.

¹⁾ E. T. Z. 1919, Seite 41 und 42.

²⁾ E. T. Z. 1913, Seite 1096 und Dr. C. L. Weber, Erläuterungen zu den Vorschriften für Starkstromanlagen, 12. Auflage, 1916 (Berlin, Verlag Springer), Seite 247 und folg.

³⁾ Elektr. und Masch. 1919, Seite 547.

⁴⁾ Vergleiche Ing. Dr. E. Nather, Elektr. und Masch. 1920, Seite 159; 1918, Seite 485; 1919, Seite 575.

C. Die Dicke s des Eis- oder Schneebelages nimmt ab mit zunehmendem Leiterdurchmesser.

Diese verschiedenen Möglichkeiten sollen nun näher untersucht werden.

Fall A.—1. Wenn s mit d proportional wächst, dann gilt die Gleichung:

$$s = k \cdot d \quad (k = \text{konstant}) \quad (2)$$

daher wird wie leicht aus Gleichung (1) ersichtlich;

$$q_e = C_1 \cdot q \quad \text{wobei } C_1 = 4k(1+k) \text{ ist} \quad (3)$$

d. h. die Querschnittsfläche q_e und daher auch das Gewicht der Zusatzlast wächst proportional mit dem Leiterquerschnitt q . Dieser Zusammenhang bildet die Grundlage für die bereits ausser Kraft getretenen Normen des V.D.E.¹⁾ Nach diesen Normen war die Zusatzlast (Eislast) G_{e1} in g pro 1 m nach folgender Formel zu berechnen:

$$\left. \begin{array}{l} G_{e1} = 15 \cdot q_0 \\ \text{oder auch; } G_{e1} = 1500 \cdot q \end{array} \right\} \quad (4)$$

wobei q_0 in mm² bzw. q in cm² die Leiterquerschnittsfläche bedeutet.

Die Querschnittsfläche q_e des Eises wird für $\gamma_e = 1$ g pro cm³:

$$q_e = \frac{G_{e1}}{100 \cdot \gamma_e} = 15 \cdot q \quad (5)$$

Nach Fig. 1 wird daher:

$$q_t = q_e + q = 16 \cdot q$$

Wir erhalten also für den Aussendurchmesser des vereisten Drahtes

$$\left. \begin{array}{l} d + 2 \cdot s = d_t = 4 \cdot d \\ s = 1,5 \cdot d \end{array} \right\} \quad (\text{für } \gamma_e = 1 \text{ g/cm}^3) \quad (6)$$

für Eis ist jedoch das spezifische Gewicht γ_e im Mittel gleich 0,9 g/cm³, während für Schnee nach den schweizerischen Vorschriften der Wert $\gamma_f = 0,16$ g/cm³ einzusetzen ist; für lockeren Schnee kann γ_f zu 0,12 g/cm³ angenommen werden.

Daher wird zur Bestimmung des Aussendurchmessers d_t :

$$\left. \begin{array}{l} \text{für Eis: } q_t = \frac{15}{0,9} \cdot q + q = 17,67 \cdot q \\ d_t = d \cdot \sqrt{17,67} = 4,2 \cdot d \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} \text{für Schnee: } q_t = \frac{15}{0,16} \cdot q + q = 94,8 \cdot q \\ d_t = d \cdot \sqrt{94,8} = 9,74 \cdot d \end{array} \right. \quad (7)$$

Der Zusammenhang der Größen d d_t q q_t ist in Fig. 2 dargestellt und bedarf keiner weiteren Erklärung.

Wichtig ist nur der Umstand, dass die Erfahrungen sehr bald zeigten, dass das in Gleichung (4) ausgesprochene Gesetz der Aneisung, das mit der Grundgleichung (3) übereinstimmt, der Wirklichkeit ganz und gar nicht entsprach, weil vor allem dünne Drähte eine weitaus stärkere Aneisung zeigen als dicke Drähte. Beobachtungen, die man im Winter an entlaubten Bäumen machen kann²⁾, zeigen, dass die Aneisung stets an den feinsten Ausläufern der Zweige beginnt und erst dann zu den Zweigen, weiter zu den Hauptästen und schliesslich zum Stamme fortschreitet; dabei tragen die dünnen Ver-

¹⁾ Gültig vom 1. I. 1908 bis Ende 1913 und des E.T.V. Wien, gültig von 1914 bis 1917 laut I. Anhang zu den Sicherheitsvorschriften für elektrische Starkstromanlagen.

²⁾ Vergleiche Ing. Dr. E. Nather, Gestängbelastungen der Schwachstromleitungen, Elektr. und Maschinenbau (E. und M.) Wien 1918, Seite 485, 486.

ästelungen und die schwachen Zweige nicht nur im Verhältnis zu ihrem Querschnitte, sondern auch absolut genommen, häufig grössere Eismengen (besonders Rauhreif bei Frost nach vorausgegangenem Nebel) als stärkere Aeste. Die Ursache dieser zunächst auffälligen Erscheinung liegt darin, dass der Baum, der in der frostfreien Tiefe wurzelt, von dort die Wärme durch den Stamm, die Aeste und Zweige bis zu den letzten Ausläufern leitet; der Querschnitt des Wärmestromes ist nun im Stamm und in den stärkeren Aesten im Verhältnis zur Abkühlungsfläche viel grösser, als in den schwächeren Zweigen und in den feinen Verästelungen, wo daher die verhältnismässig grösste Wärmeausstrahlung wirken und deshalb die Temperatur des Holzes und der Rinde am tiefsten sinken lassen muss, so dass sich diese letzten Ausläufer des Baumes am raschesten abkühlen und an ihnen zuerst Eis oder Reif angesetzt wird.

Aehnlich verhält sich auch ein Leitungsmast aus Holz, dessen Querarm (Isolatorstützen) den Zweigen des Baumes entsprechen; auch der Leitungsmast überträgt, obwohl er leblos ist und keinen organischen Säftestrom aufweist, den Wärmestrom aus der frostfreien Tiefe bis zu den Leitungsdrähten und es ist nun einzusehen, dass ein dünner Draht, dessen Oberfläche im Verhältnis zum Querschnitt grösser ist, als beim dickeren Draht, sich zuerst soweit abkühlen wird, dass die Aneisung dort beginnen kann¹⁾.

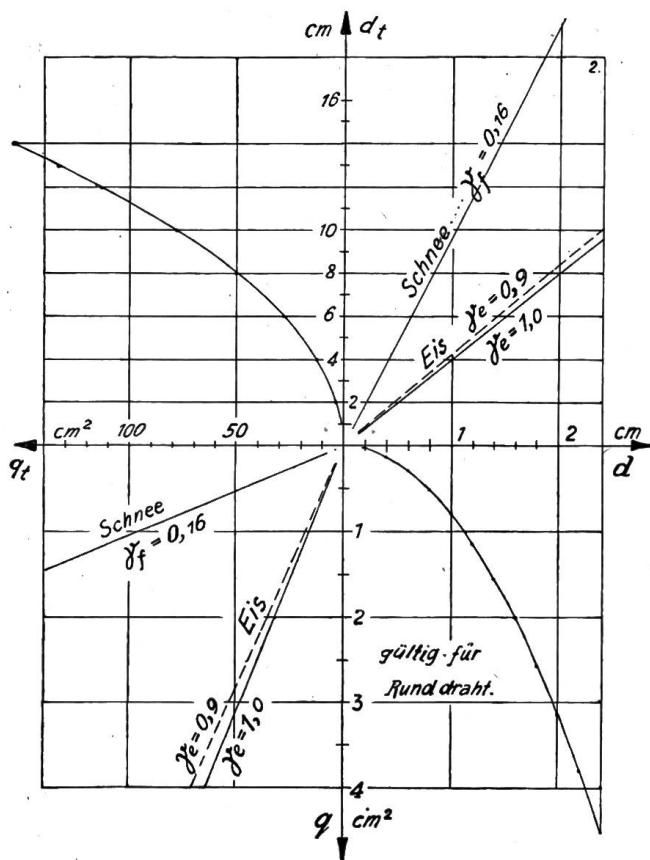


Fig. 2.

Stromstärken für Drähte verschiedenen Querschnitts bei welchen eine Erwärmung der Drähte um 20° C eintritt. (Nach Kennely's Formel).

Tabelle II.

Drahtquerschnitt q_0 in mm ²	Stromstärke in A Gleichstrom für		
	Kupferdraht	Aluminiumdraht	Eisendraht
16	118	90	40
25	162	125	55
35	206	155	72
50	266	205	95
70	340	260	120
95	420	320	150
120	500	380	175

¹⁾ Wir glauben kaum, dass man das Beispiel des homogenen Gefüges eines Baumes, wie es hier getan wird, auf Freileitungen, die aus verschiedenen Materialien, zwischen denen grosse Wärme widerstände auftreten, übertragen kann und damit allein die verschieden starken Schnee und Eislasten an Drähten verschiedenen Durchmessers erklären kann u. a. auch deshalb, weil ja alle Metalle eine sehr viel höhere Wärmeleitfähigkeit als Holz und Porzellan aufweisen und daher die kleinen durch die Porzellanisolatoren durchtretenden Wärmemengen von der verhältnismässig grossen Drahtoberfläche rasch abgegeben werden.

Die Redaktion.

Bei Fernmeldeleitungen (Telegraphen, Fernsprecher, Signalwesen) ist diese Analogie ohne weiteres erkennbar, bei Starkstromleitungen macht sich allerdings der Einfluss der Stromwärme geltend, der bei grosser Strombelastung die Aneisung wesentlich verringern wird. Hierauf machen z. B. die neuesten Freileitungsnormen des Wiener Elektrotechnischen Vereins ausdrücklich aufmerksam¹⁾. Anhaltspunkte in dieser Hinsicht gibt eine von *Kennelly* ermittelte Formel²⁾, welche für blanke Leitungen in ruhiger Luft bei 20° Aussentemperatur und 20° Erwärmung folgende Werte liefert:

Es ist ausserdem zu berücksichtigen, dass die Erwärmung mit dem *Quadrat* der Stromstärke steigt und dass der höheren Erwärmung eine beträchtliche Vergrösserung des Durchhangs entspricht.

Diese Erwägungen lassen erkennen, dass man bei voller Stromstärke in der Leitung mit einer Erwärmung um etwa 20° rechnen kann, was ja genügt, um die Aneisung merkbar zu erschweren, ja sogar ganz zu verhindern. Allerdings darf man nicht vergessen, dass eine Verringerung der Betriebsstromstärke auf die Hälfte eine Verringerung der Erwärmung auf ein Viertel, d. i. also auf nur etwa 5° nach sich zieht; dieser Wert kann aber leicht schon zu gering sein, um die Aneisung sicher zu verhindern. In dieser Hinsicht sind gerade die frühesten Morgenstunden (etwa 4 bis 6 Uhr früh) infolge der merkbaren Temperaturabnahme und der gleichzeitig zumeist geringen Strombelastung besonders kritisch und erfordern die besondere Beachtung des Betriebsleiters.

Fall A. — 2. Wenn die Dicke s der Eishülle mit dem Leiterdurchmesser d wächst, aber in abnehmendem Verhältnis, dann kann man setzen:

$$s = m \cdot d \quad (8)$$

wobei m abnimmt, wenn d steigt. Nimmt man zunächst die Abnahme von m nach der *Gleichung einer Geraden* an (Fig. 3), so erhalten wir für den beliebigen Punkt P :

$$m = a \cdot d + b \quad (9)$$

also mit den Wertepaaren

$$\begin{aligned} d = 0 &\quad \left. \begin{aligned} m = 0 \\ m = m_0 \end{aligned} \right\} A \\ m = m_0 &\quad \left. \begin{aligned} d = 0 \\ d = d_0 \end{aligned} \right\} B \end{aligned}$$

aus einer einfachen Zwischenrechnung:

$$\frac{m}{m_0} = -\frac{d}{d_0} + 1 \quad (10)$$

für $s = m \cdot d$ wird daher die Querschnittsfläche des Eisbelages:

$$q_e = \pi \cdot s (d + s) = \pi \cdot d^2 \cdot m \cdot (1 + m) \quad (11)$$

Einfache Entwicklungen führen zu der Gleichung:

$$q_e = \pi \cdot d^2 \cdot m_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{d_0}\right) \cdot \left(m_0 - \frac{d}{d_0} \cdot m_0 + 1\right) \quad (12)$$

welche für den Grenzwert $d_0 = \infty$ folgende Formel liefert (wobei $m_0 = \text{konstant}$):

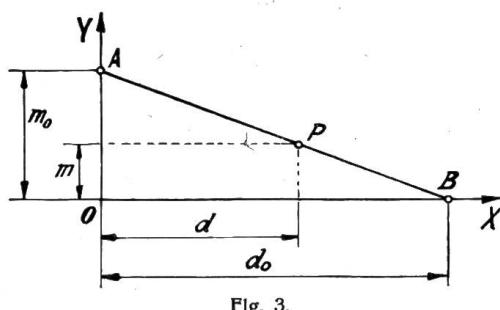
$$q_e = \pi \cdot d^2 \cdot (m_0^2 + m_0) = C_2 q \quad (13)$$

für den Grenzwert ist also q_e dem Leiterquerschnitt q proportional, wie in der Gleichung (3).

Die Gleichung (12), welche dem Aneisungsvorgang A — 2 nach den Formeln (8) und (11) entspricht (d. i. also einer allmählich geringer werdenden Zunahme der Dicke s

¹⁾ 11. Anhang zu den Sicherheitsvorschriften für elektrische Starkstromanlagen, § 5, 4. Absatz.

²⁾ Vergleiche Electrician, London 1889, Seite 142.



der Eishülle mit steigendem Durchmesser d), nähert sich dem Grenzwerte Gleichung (3), deren Widerspruch mit den Beobachtungen und mit den erklärbaren Naturvorgängen bereits ausführlich dargelegt wurde. Man wird daher auch die Gleichung (12), die zu einem unbrauchbaren Grenzwerte führt, nur mit Misstrauen ansehen dürfen; wie berechtigt daselbe ist, kann man aus folgender Tabelle III ersehen, in welcher für verschiedene Werte von $\frac{d_0}{d}$ und m_0 die geringe Abweichung vom unbrauchbaren Grenzwerte deutlich erkennbar ist:

Vergleich des Eis- oder Schneequerschnittes zum Draht- oder Seilquerschnitt bei Benutzung der Gleichungen (12) bzw. (13).

Tabelle III

d_0	$m_0 = 2$		$m_0 = 5$	
	$\frac{q_0}{q}$ (Gl. 12)	= % des Wertes für $d_0 = \infty$	$\frac{q_0}{q}$ (Gl. 12)	= % des Wertes für $d_0 = \infty$
$3 \cdot d$	4,89	81,5	25,55	85,0
$5 \cdot d$	5,44	90,6	28,00	93,4
$10 \cdot d$	5,76	96,0	29,25	97,5
$20 \cdot d$	5,89	98,2	29,70	99,0
∞ .	6,00	100	30,00	100

Der nach der Fig. 3 angenommene Zusammenhang zwischen m und d entspricht also der Wirklichkeit nicht, und es liegt daher nahe, für diesen Zusammenhang anstatt der geraden Linie in Fig. 3 eine Kurve, etwa wie in Fig. 4 (siehe nächste Nummer des „Bulletin“) dargestellt, zugrunde zu legen.

Schluss folgt.

Miscellanea.

Inbetriebsetzung von schweizerischen Starkstromanlagen. (Mitgeteilt vom Starkstrominspektorat des S. E. V.) Im Juni 1920 sind dem Starkstrominspektorat folgende wichtigere Anlagen als betriebsbereit gemeldet worden:

Hochspannungsfreileitungen.
Aargauisches Elektrizitätswerk, Aarau. Leitung zur Stangen-Transformatorenstation der Höfe (Gemeinde Magden), Drehstrom, 6800 Volt, 50 Perioden.

Nordostschweizerische Kraftwerke A.-G., Baden. Verlegung der Leitung Töss-Neuhausen, 45 000 Volt zwischen Durstgraben und Unterzentrale Neuhausen. Leitung Eglisau-Neuhausen, Drehstrom, 45 000 Volt, 50 Perioden.

Elektra Benzenberg-Fuhrli, Benzenberg (Bern). Leitung zur Transformatorenstation in Benzenberg, Drehstrom, 16 000 Volt, 40 Perioden. Leitung zur Transformatorenstation in Fuhrli-Benzenberg, Drehstrom, 16 000 Volt, 40 Per.

Bernische Kraftwerke A.-G., Betriebsleitung Bern, Bern. Leitung zur Transformatorenstation „Hofgut“ in Gümligen (Gemeinde Muri), Drehstrom, 16 000 Volt, 40 Perioden.

Elektrizitätswerk Burg, Burg (Aargau). Leitung nach Maihusen (Luzern), Drehstrom, 5000 Volt, 50 Perioden. Leitung nach Wynon, Drehstrom, 5000 Volt, 50 Perioden.

Elektrizitätswerk Hauerive, Freiburg. Leitung zur Transformatorenstation der Sägerei Tobler A.-G., Schokoladenfabrik Bern in Schwarzenburg (Kanton Bern), Drehstrom, 8000 Volt, 50 Perioden.

Elektrizitätswerk Bündner Oberland, Ilanz. Leitung zur Stangen-Transformatorenstation beim Hof „Elvedi“ in Kästris, Drehstrom, 8000 Volt, 50 Perioden.

Licht- und Wasserwerke Interlaken, Interlaken. Leitung zur Transformatorenstation Widimatte bei Interlaken, Einphasenstrom, 2000 Volt, 50 Perioden.

Cie. Vaudoise des Forces Motrices des Lacs de Joux et de l'Orbe, Lausanne. Ligne à haute tension pour la station transformatrice au hameau des Monts-de-Buttes, courant monophasé, 12 500 volts, 50 périodes. Ligne à haute tension pour la station transformatrice le Grand-Boutavent, courant monophasé, 13 500 volts, 50 périodes. Ligne à haute tension Orges-Môtier, courant triphasé, 32 000 volts, 50 périodes.

Elektra Baselland, Liestal. Leitung zu den Höfen Farnsburg-Homberg, Drehstrom, 6400 Volt, 50 Perioden. Leitung zur „Säge“ bei Rothenfluh, Drehstrom, 6400 Volt, 50 Perioden.