

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 23 (1932)
Heft: 26

Artikel: Kann die natürliche Eislastbildung mathematisch dargestellt werden?
Autor: Wald, Emil
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059357>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

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

1. Möglichst einfache und übersichtliche Bauart.
2. Durchgehen von Sicherungen und dadurch bedingtes Ausbleiben einer Spannung darf zu keinen Fehlschaltungen führen.
3. Bei Ueberschreiten eines gewissen, höchstzulässigen Frequenzunterschiedes muss eine Parallelschaltung auf alle Fälle vermieden werden. Der maximale Frequenzunterschied, bei dem der Apparat die Parallelschaltung noch einleitet, soll am Relais leicht einstellbar sein, da er für das Aussertrittfallen massgebend ist.
4. Die Empfindlichkeit des die Phasen- und Frequenzübereinstimmung messenden Organs soll möglichst gross sein. Messgenauigkeit ca. 2°. Spannungsrelais in Hellschaltung sind aus diesem Grunde nicht verwendbar.
5. Die die Phasen- und Frequenzübereinstimmung messenden Organe sollen nach Möglichkeit nur vom Phasenunterschied der beiden Spannungsvektoren abhängen, aber nicht von der absoluten Grösse der beiden Spannungen.
6. Die für das Parallelschalten massgebende Frequenzmessung soll unmittelbar vor Phasenübereinstimmung erfolgen.

7. Die Vorverstellungseinrichtung muss so beschaffen sein, dass sich der «Voreilungswinkel» nicht in der falschen Richtung auswirken kann, d. h. der Schaltbefehl darf nur bei ständig abnehmendem Phasenwinkel erteilt werden.
8. Die Grösse der Vorverstellung des Schaltbefehls zur Kompensierung von Schaltereigenzeiten soll so gewählt werden, dass die Schliessung des Kuppelschalters möglichst bei Phasenübereinstimmung erfolgt. Automatische Vorverstellung entsprechend der Frequenzdifferenz ist von Vorteil, wenn die Einrichtung dadurch nicht wesentlich komplizierter wird.
9. Wechselt der Frequenzunterschied das Vorzeichen, so muss eine Parallelschaltung verunmöglicht werden und das Eintreten der für ein Parallelschalten notwendigen Bedingungen von neuem abgewartet werden.
10. Es soll die Möglichkeit vorhanden sein, dass bei speziellen Anlagen das Zuschalten einer Maschine nur dann erfolgt, wenn ihre Frequenz innert den zulässigen Grenzen grösser ist als die des Netzes, damit sofort Last übernommen wird.

Kann die natürliche Eislastbildung mathematisch dargestellt werden?

Von Emil Wald, Ingenieur, Brünn.

621.315.056.5

Unter gewissen Annahmen (u. a. gleichmässige Eislastbildung) stellt der Autor Formeln auf, welche den Durchmesser und das Gewicht der Eislast in Funktion der Zeit angeben, und zeigt, wie die Grösse «spezifische Eislast» einer Gegend, d. h. das Eislastgewicht in kg pro laufenden Meter Leiter, das in 24 h gleichmässiger Eislastbildung theoretisch entstehen würde, aus einfachen Messungen bestimmt werden kann. Anhand von Messresultaten wird die praktische Anwendung gezeigt. Zum Schluss äussert der Autor einige Gedanken über Bau und Wartung von Leitungen in Gegenden, die regelmässig durch Eislast leiden.

Partant de différentes suppositions (par exemple que la formation de glace sur les fils est régulière), l'auteur établit des formules qui donnent le diamètre et le poids de la couche de glace en fonction du temps, et montre que la grandeur «charge spécifique due à la glace» d'une contrée, c'est-à-dire le poids de la glace qui, théoriquement, est susceptible de se former régulièrement en 24 heures, en kg par mètre courant de conducteur, peut être déterminée par des mesures simples. Quelques résultats de mesures effectuées montrent l'application pratique de la méthode. Pour terminer, l'auteur touche à la construction et à l'entretien des lignes dans les contrées où la formation de glace se produit régulièrement.

Bei Berechnung von Leitungen auf mechanische Festigkeit ist es notwendig, eine zusätzliche Eislast anzunehmen. Es wäre interessant, für die natürliche Eislastbildung mathematische Beziehungen aufzustellen, welche ermöglichen würden, die zusätzliche Eislast auf Grund von Beobachtungen und Messungen vorzubestimmen.

Die in verschiedenen Sicherheitsvorschriften für die Annahme der Eislast heute angewendeten Formeln begnügen sich mit einer Annahme der klimatischen Verhältnisse und berücksichtigen meistens nur die Abhängigkeit der Zusatzlast von den Leiterdimensionen. Die Zeitdauer der Eislastbildung ist jedoch ausser acht gelassen.

Wir wollen nunmehr den geläufigen Begriff der zusätzlichen Eislast vom Gesichtspunkte der Zeitdauer näher betrachten. Die zusätzliche Eislast, wie sie heute in die Festigkeitsberechnungen eingesetzt wird, stellt eigentlich einen Endwert eines von der Zeit abhängigen Vorganges dar.

Diese resultierende Eislast ist nicht nur von der Ausgiebigkeit der Niederschläge, sondern auch von der Dauer deren ununterbrochenen Einwirkung auf den Leiter abhängig. Diese Zeitdauer können wir — wenigstens teilweise — durch Heizen der bedrohten Leitungen oder auch durch mechanische Mittel (Abreiben, Abklopfen) künstlich

abkürzen, falls die Eislast einen die Leitung bedrohenden Wert erreicht. Die zusätzliche Eislast ist somit nicht nur ein Resultat der natürlichen Eislastbildung, sondern sie kann unter Umständen durch künstliches Eingreifen in den gewünschten Grenzen gehalten werden.

Wir bezeichnen:

- D_0, S_0 Durchmesser und Querschnitt des Leiters,
 D, S Durchmesser und Querschnitt der Eislast,
 Z_0 Gewicht der Eislast, welche den Leiter ersetzt, in kg/m,
 Z Gewicht der vollen Eislastwalze, in kg/m,
 t_0, t theoretische Dauer der Eislastbildung in h,
 γ spezifisches Gewicht der Eislast, in kg/dm³.

Voraussetzung: gleichmässige Eislastbildung um den Leiter ringsum (ungünstigster Fall).

Die Höhe der Niederschläge ist proportional der Zeit, also (Fig. 1):

$$dD = k_1 dt$$

wobei k_1 eine klimatische Konstante der Gegend bedeutet.

Die Einführung der theoretischen Werte t, t_0 und Z_0 setzt voraus, dass die Eislastbildung in der Zeit $t = 0$ auf einem Durchmesser von $D = 0$ angefangen hat.

Unter diesen Voraussetzungen gilt (Fig. 1):

$$dZ = \gamma \cdot 2\pi D \cdot dD \cdot l, \text{ wobei } D = k_1 t \quad (1)$$

und für $l = 1$

$$\int_0^Z dZ = 2\pi \gamma \cdot k_1^2 \int_0^t t dt, \text{ oder } Z = k t^2 \quad (2)$$

Für $t = t_0$ ist $Z = Z_0$, somit auch

$$Z_0 = k t_0^2 \text{ und } Z - Z_0 = k (t^2 - t_0^2) \quad (3)$$

Während einer gleichmässigen Eislastbildung wächst der äussere Durchmesser direkt proportional mit der Zeit, das Zusatzgewicht Z mit dem Quadrat der Zeit.

Gl. (1) ermöglicht eine Kontrolle des meist sehr unregelmässigen Anfangsstadiums, Gl. (2) erklärt die Einwirkung der Witterung und Gl. (3) kann als Ausgangspunkt für eine experimentelle Bestimmung der Abhängigkeit zwischen Zusatzlast und Leiterdurchmesser angewendet werden.

Für die Beurteilung der klimatischen Verhältnisse in bezug auf die Eislastbildung können wir aus Gl. (2) einen einfachen, vom Leiterdurchmesser und vom spezifischen Gewichte der festen Niederschläge unabhängigen Vergleichswert wie folgt definieren:

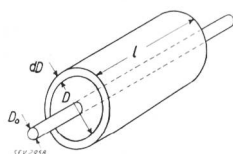


Fig. 1.

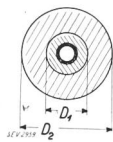


Fig. 2.

Die *spezifische Eislast* einer Gegend ist das grösste, auf Grund von Messungen festgesetzte theoretische Eislastgewicht in kg pro laufenden m Leiter, welches in der Zeit von 24 Stunden gleichmässiger natürlicher Eislastbildung entstehen würde (Bezeichnung Z_{24}). Dieser Begriff ist analog der in der Meteorologie üblichen Angabe der Niederschlagshöhe.

Die spezifische Eislast kann durch eine relativ einfache Messung bestimmt werden: Ein Meßstab von 1 m Länge (Nachbildung des Leiters) wird künstlich mit Eis und Schnee auf einen der Praxis entsprechenden Durchmesser (etwa 50 bis 100 mm) gebracht und der Witterung ausgesetzt. Nach einigen Stunden gleichmässiger Eislastbildung (Zeit τ) werden der Zuwachs an Gewicht z und der neue Durchmesser D_2 gemessen.

Wir setzen

$$z = Z_2 - Z_1 \text{ und } \tau = t_2 - t_1$$

wobei die Werte Z_2 , Z_1 , t_2 und t_1 vorläufig noch unbekannt sind.

Wenn wir die Querschnittsflächen S in dm^2 ausdrücken, dann gilt für die Zusatzlast allgemein:

$$Z \text{ kg} = \gamma \text{ kg/dm}^3 \cdot S \text{ dm}^2 \cdot 10 \text{ dm.}$$

Der gemessene Gewichtszuwachs des Meßstabes ist daher

$z = \gamma (S_2 - S_1) \cdot 10$, woraus γ , das spezifische Gewicht der natürlichen Eislast, berechnet werden kann.

Wir wollen nun voraussetzen, dass das Ersatzgewicht Z_1 auch durch den gleichen natürlichen Vorgang entstanden ist (Fig. 2), d. h.:

$$Z_1 = \gamma \cdot S_1 \cdot 10 \text{ und } Z_2 = z + Z_1.$$

Es stehen uns jetzt folgende Beziehungen zur Verfügung:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= k t_1^2 \\ Z_2 &= k t_2^2 \\ t_2 - t_1 &= \tau \end{aligned} \right\} \text{ Unbekannt sind } t_1, t_2 \text{ und } k.$$

Es ist daher:

$$t_2 = t_1 \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^{1/2} \text{ und } t_1 = \frac{\tau}{\sqrt{\frac{Z_2}{Z_1} - 1}} \quad (4)$$

Trägt man diese Werte in ein Diagramm (Fig. 3) ein, so kann die spezifische Eislast des Versuches (Z_{24}) bestimmt werden.

Der Hauptvorteil der Einführung dieser Beziehung $Z = f(t)$ besteht darin, dass sie ermöglicht, jede Eislastperiode in einzelne Zeitabschnitte zu zerlegen. Für die Bestimmung der spezifischen Eislast wird dann derjenige Zeitabschnitt ausgewertet, welcher die maximalen Werte ergeben hat¹⁾. Für diese Auswertung haben wir $Z = k \cdot t^2$ angenommen; es könnte hierfür aber auch ein anderer als quadratischer Exponent eingesetzt werden.

Schliesslich können auch Anhaltspunkte für den Begriff *regelmässig auftretende Eislast* erhalten werden, indem neben der Heftigkeit der Niederschläge (ausgedrückt unabhängig vom Leiterdurchmesser und vom spezifischen Gewichte durch die

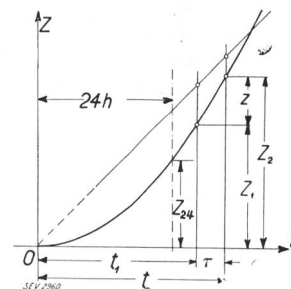


Fig. 3.

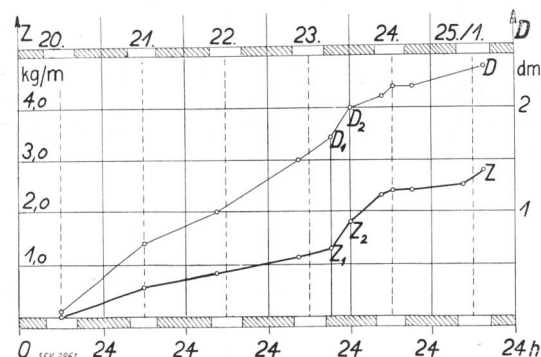


Fig. 4.

¹⁾ Die Bildung einer maximalen Eislast sollte während der Messung durch Einstellen des Meßstabes je nach Windrichtung unterstützt werden.

Konstante k) auch die zu erwartende Dauer derselben gemessen wird.

Fig. 4 enthält Messresultate, welche im Versorgungsgebiete der Westmährischen Elektrizitäts-



Fig. 5.

werke A.-G. in Brünn (Tschechoslowakei) an einer 22-kV-Freileitung im böhmisch-mährischen Hügelland auf 720 m ü. M. im vergangenen Winter gefunden wurden²⁾. Die Zusatzlast wurde während der Rauhreifbildung direkt an der Leitung gemessen und abgewogen, zu welchem Zwecke eine einfache Vorrichtung nach Fig. 5 benützt wurde. Neben der Leitung wurde ein Messleiter (Fig. 6)

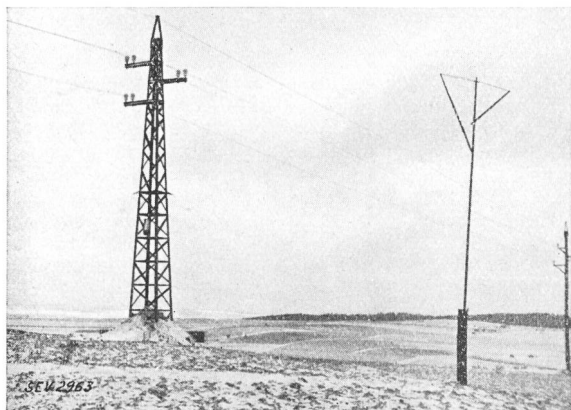


Fig. 6.

²⁾ Es handelte sich um eine Versuchsmessung, welche bloss den Zweck hatte, die Brauchbarkeit unseres Verfahrens, welches ohne besondere Messvorrichtungen ausführbar ist, zu bestätigen.

Die Fortsetzung weiterer Versuche musste wegen Witterungsänderung vorläufig unterbleiben.

zur bequemerer Beobachtung des Anfangsstadiums aufgestellt. Die im Diagramm als Z_1 und Z_2 bezeichneten Messungen wurden in die rechnerische Auswertung (Fig. 3) eingesetzt.

Zusammenfassend sei in bezug auf Bau und Wartung von Leitungen in Gegenden, welche regelmässig durch Eislast leiden, auf folgendes hingewiesen:

1. Je früher man die zusätzliche Eislastbelastung beseitigt (z. B. durch Heizen), desto länger kann die Leitung einer natürlichen Eislastbildung widerstehen (Parabel Fig. 3) (Lawinengesetz).

2. Bei jeder Eislastbildung, besonders aber bei solchen, welche mechanische Beschädigungen verursacht haben, sind die Eislasten, wenn möglich, zu wägen; es sind hiebei jedesmal auch die Dauer der Einwirkung und der Ausgangszustand der Leiter festzustellen. Für bedrohte Gegenden sollten durchschnittliche spezifische Eislasten durch wiederholte Messungen gefunden werden.

3. Für die ausgebauten Leitungen sind gefährliche Eislastdurchmesser zu bestimmen, was mit Hilfe der erwähnten Formeln ausgeführt werden kann; es sei dazu noch folgendes gesagt: Die Eislast wird für eine Leitung gewöhnlich erst dann gefährlich, wenn sie einen rundlichen Querschnitt annimmt, der bei längerer Einwirkung nach und nach aus der ursprünglichen, meistens harmlosen Fächerform entsteht. Mit Rücksicht auf die unvorhergesehenen Wetterumstürze ist damit zu rechnen, dass der leichteste Rauhreif schon innerhalb einiger Stunden zur schweren Eislast werden kann; für die Gewichtsrechnung aus dem Volumen der anhaftenden Niederschläge muss daher stets ein spezifisches Gewicht $\gamma = 0,9$ angenommen werden.

Als für die Leitung gefährlicher Eislastdurchmesser ist derjenige Wert anzusehen, welcher zu einem gefährlichen Eislastgewicht innerhalb der für die Eislastbefreiung erforderlichen Zeit anwachsen könnte³⁾.

4. Der Verlauf jeder grösseren Eislastbildung sollte mittels Meßstäben in der Höhe der Leiter verfolgt werden, wodurch unvorhergesehene Naturereignisse noch rechtzeitig erkannt werden können. Auf Grund derartiger Beobachtungen könnte auch eine Grenze zwischen den katastrophalen und den gewöhnlich auftretenden Eislasten zahlenmässig ausgedrückt werden.

Die aus öffentlichen Rücksichten notwendige Sicherheit gegen mechanische Leitungsschäden in Gegenden, wo grosse Eislasten aufzutreten pflegen, kann viel genauer, als es bisher geschieht, beurteilt werden, und zwar auf Grund von vergleichenden Messungen der spezifischen Eislast in den verschiedensten Gebieten.

³⁾ Der Eislastdurchmesser ist in den meisten Fällen auch heute der einzige Wert, nach welchem die Eislastgefahr auf bestehenden Leitungen beurteilt werden kann.