

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 24 (1933)
Heft: 7

Artikel: Die Berechnung eisenloser Schutzdrosselspulen
Autor: Edler, Robert
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059516>

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: 10.01.2026

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

das Material mit Qualitätszeichen sehr strengen Prüfungen unterworfen wird. Ein Nachteil der Einführung des Qualitätszeichens besteht darin, dass heute der gleiche Apparat von mehreren Fabrikanten in den verschiedensten Modellen, alle mit Qualitätszeichen, geliefert wird; da alle diese Modelle

gerechterweise denselben Anspruch auf Zulassung durch das Werk haben, können sich Schwierigkeiten der Lagerhaltung im Hinblick auf die Auswechslung und Reparatur dieser verschiedenen Modelle ergeben.

Die Berechnung eisenloser Schutzdrosselspulen.

Von Prof. Ing. Robert Edler, Wien.

Die Nennstromstärke I und die Induktivität L_s cm ($L_s \cdot 10^{-6}$ Millihenry) kann nach den «Leitsätzen für den Schutz elektrischer Anlagen gegen Ueberspannungen» (Sonderdruck VDE 323) gewählt werden. Ausser den Grundformeln von Stefan und von Hemmeter stehen die bequemeren Näherungsformeln von Korndörfer zur Verfügung; erstere erfordern umständliche Rechnungen, letztere sind viel einfacher und doch hinreichend genau. Alle haben aber den für die praktische Berechnung schwerwiegenden Nachteil, dass sie den Einfluss der Erwärmung im Dauerbetriebe (Nennstrom I) und bei Kurzschluss (Kurzschlussstrom I_K) nicht unmittelbar erkennen lassen, so dass oft Umrechnungen nötig werden, bis man zu einem in jeder Hinsicht befriedigenden Ergebnis gelangt. Der Wunsch, das Kupfergewicht der Spule möglichst klein zu machen, hat nur für den Dauerbetrieb mit dem Nennstrom eine Berechtigung, weil ja eine hohe thermische Kurzschlussfestigkeit der Spule nur durch ein grosses Kupfergewicht erreicht werden kann. Endlich spielen die Werkstatteinrichtungen und die Geschicklichkeit des Wicklers eine grosse Rolle, weil von ihnen die Ausnutzung der Wickelfläche (Kupferfüllfaktor) abhängt; damit hängt auch der Durchmesserzuwachs des Kupferdrahtes durch die Isolation (Umspinnung, Papierbandumwicklung, Umflechtung) zusammen, der durch die Normblätter für isolierte Drähte (DIN-VDE 6436, April 1926) bestimmt ist.

Der neue Berechnungsweg stützt sich auf die allgemeinen Formeln von Stefan und von Hemmeter und berücksichtigt alle oben erwähnten Einflüsse, er führt aber dabei in sehr einfacher Weise und mit einem nur sehr geringen Aufwand von Rechnungen in jedem Falle unmittelbar zum Ziele, und zwar mit einer für technische Rechnungen vollständig ausreichenden Genauigkeit, da die Fehler, die infolge der herangezogenen Vereinfachungen entstehen, kaum 1 % erreichen.

I. Grundformeln.

a) Formel von Stefan.

Die Formel von Stefan gilt für die Grenzen $0 \leq \frac{c}{b} \leq 1$, also für $c \leq b$ (Fig. 1). Alle Masse in cm.

Nach Stefan¹⁾ ist dann mit w = Windungszahl:

$$L_s \text{ (cm)} = w^2 \cdot 4 \pi \cdot r \cdot \left[\left(1 + \frac{3b^2 + c^2}{96 \cdot r^2} \right) \cdot \lognat \frac{8 \cdot r}{\sqrt{b^2 + c^2}} - y_1 + \frac{b^2}{16 \cdot r^2} \cdot y_2 \right] + K \quad (1)$$

¹⁾ Stefan, Sitzungsberichte der Wiener Akademie der Wissenschaften 88/2 (1883), S. 1201; Wiedemanns Annalen der Physik 22 (1884), S. 107; Orlich, Kapazität und Induktivität, Verlag Vieweg, Braunschweig (1909), S. 85, Gl. 48a und S. 286, Zahlentafel; Streckert, Hilfsbuch für die Elektrotechnik, Verlag Springer, Berlin (1925), 10. Auflage, Bd. I, S. 83. — Stefans Formel ist eine Vereinfachung der Formel von Weinstein (Wiedemanns Annalen der Physik, Bd. 22 [1884], S. 107; vgl. Glage, Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie, Bd. 2, S. 509.

L'intensité nominale I et l'inductivité L_s cm ($L_s \cdot 10^{-6}$ millihenrys) peuvent être choisies selon les «directives pour la protection des installations électriques contre les surtensions» (tirage à part VDE 323). Outre les formules fondamentales de Stefan et de Hemmeter, on dispose des formules plus pratiques de Korndörfer, donnant une bonne approximation; les premières demandent des calculs compliqués, les secondes sont bien plus simples, tout en étant suffisamment exactes. Néanmoins, toutes ces formules possèdent, pour les calculs pratiques, le grave inconvénient qu'elles ne laissent pas reconnaître sans autre l'influence de l'échauffement en régime permanent (courant nominal I) et lors de courts-circuits (courant de court-circuit I_K), de sorte qu'il est souvent nécessaire d'entreprendre des calculs assez longs pour arriver à un résultat satisfaisant à tous les points de vue. La tendance à réduire le poids du cuivre de la bobine ne se justifie que pour le régime permanent sous le courant nominal, car une haute résistance de la bobine aux courts-circuits ne peut être obtenue qu'en augmentant le poids du cuivre. Finalement, les installations de l'atelier et l'adresse du bobineur jouent un rôle important, car c'est de ces facteurs que dépend l'utilisation de la section de bobinage (facteur de remplissage du cuivre); l'augmentation du diamètre du fil par l'isolement (guilage, tresse, bandage de papier), fixé par les normes pour conducteurs isolés (DIN-VDE 6436, avril 1926) a également son importance.

Le nouveau mode de calcul repose sur les formules générales de Stefan et de Hemmeter et tient compte de tous les facteurs mentionnés plus haut; il conduit dans chaque cas droit au but, très simplement et sans peine, avec une exactitude suffisante pour des calculs techniques, l'erreur causée par les simplifications n'atteignant pas 1 %.

y_1 und y_2 sind Funktionen von $\frac{c}{b}$; ihre Werte sind an zahlreichen Literaturstellen zu finden, z. B. bei Orlich²⁾.

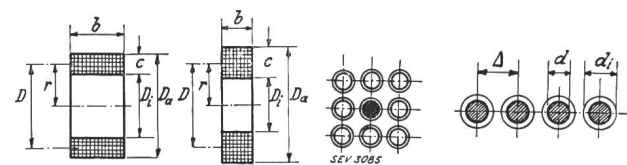


Fig. 1.

Fig. 2.

K ist ein Korrektionsglied für Runddraht; nach Stefan ist bei Berücksichtigung der 8 Nachbardrähte (Fig. 2):

$$K = 4 \pi \cdot r \cdot w \cdot \left(\lognat \frac{d}{d_i} + 0,15494 \right) \quad (2)$$

²⁾ Orlich, Kapazität und Induktivität, S. 286.

Eine genauere Berechnung des Korrektionsgliedes hat Rosa³⁾ durchgeführt. Zumeist kann man aber das Korrektionsglied vernachlässigen, da sein Einfluss gewöhnlich unter 1 % bleibt.

Die Rechnungen werden vereinfacht, wenn man

$$\beta = \frac{b}{D} \text{ und } \gamma = \frac{c}{D} \quad (3)$$

setzt; dann wird:

$$D_a = D \cdot (1 + \gamma) \text{ und } D_i = D \cdot (1 - \gamma) \quad (4)$$

und aus Gl. (1) mit Vernachlässigung von K :

$$L_s \text{ (cm)} = 2 \pi \cdot D \cdot w^2 \cdot \left[\left(1 + \frac{3\beta^2 + \gamma^2}{24} \right) \cdot \lognat \frac{4}{\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}} - y_1 + \frac{\beta^2}{4} \cdot y_2 \right] \quad (5)$$

Setzt man:

$$2 \pi \cdot [\dots] = A_1 \quad (6)$$

wobei A_1 eine Funktion von β und γ ist, und zwar für $\gamma \leq \beta$, dann wird:

$$L_s \text{ (cm)} = A_1 \cdot D \cdot w^2 \text{ (für } \gamma \leq \beta) \quad (7)$$

b) Formel von Hemmeter.

Die Formel von Hemmeter ist ebenso aufgebaut, wie die Formel von Stefan; sie gilt aber für $b \leq c$, also für flachere Ringspulen (Fig. 3); sie lautet⁴⁾:

$$L_s \text{ (cm)} = w^2 \cdot 4 \pi \cdot r \cdot \left[\left(1 + \frac{3b^2 + c^2}{96 \cdot r^2} \right) \cdot \lognat \frac{8r}{\sqrt{b^2 + c^2}} - y_1 + \frac{c^2}{16 \cdot r^2} \cdot y_2' \right] \quad (8)$$

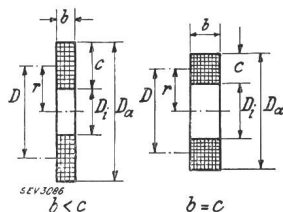


Fig. 3.

Sie lässt sich mit Gl. 3 vereinfachen wie folgt:

$$L_s \text{ (cm)} = 2 \pi \cdot D \cdot w^2 \cdot \left[\left(1 + \frac{3\beta^2 + \gamma^2}{24} \right) \cdot \lognat \frac{4}{\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}} - y_1 + \frac{\gamma^2}{4} \cdot y_2' \right] \quad (9)$$

Setzt man:

$$2 \pi \cdot [\dots] = A_2 \quad (10)$$

wobei A_2 eine Funktion von β und γ ist, und zwar für $\beta \leq \gamma$, dann wird:

$$L_s \text{ (cm)} = A_2 \cdot D \cdot w^2 \text{ (für } \beta \leq \gamma) \quad (11)$$

für $\beta = \gamma$ wird $A_1 = A_2$, d. h. für diesen Grenzfall liefern die Formeln von Stefan und von Hemmeter dieselben Werte.

y_1 und y_2' sind Funktionen von $\frac{b}{c}$; die Werte der Funktion y_1 sind dieselben bei Stefan und bei Hemmeter, weil y_1 eine symmetrische Funktion in bezug auf $\frac{c}{b}$ und $\frac{b}{c}$ ist; dagegen ist y_2' (Hemmeter) eine Funktion von $\frac{b}{c}$, während y_2 (Stefan) eine andere Funktion von $\frac{c}{b}$ ist.

Werte für y_2' hat Hemmeter berechnet⁵⁾.

Einige Werte für y_1, y_2, y_2' enthält die folgende Zahlentafel:

Tabelle I.

Stefan (Gl. 5)			Hemmeter (Gl. 9)		
$\frac{c}{b} = \frac{\gamma}{\beta}$	y_1	y_2	$\frac{b}{c} = \frac{\beta}{\gamma}$	y_1	y_2'
0,0	0,5000	0,1250	0,0	0,5000	0,5972
0,1	0,5924	0,1325	0,1	0,5924	0,6023
0,2	0,6652	0,1548	0,2	0,6652	0,6151
0,3	0,7217	0,1916	0,3	0,7217	0,6329
0,4	0,7645	0,2423	0,4	0,7645	0,6540
0,5	0,7960	0,3066	0,5	0,7960	0,6773
0,6	0,8182	0,3839	0,6	0,8182	0,7023
0,7	0,8331	0,4739	0,7	0,8331	0,7287
0,8	0,8423	0,5760	0,8	0,8423	0,7564
0,9	0,8470	0,6902	0,9	0,8470	0,7856
1,0	0,8483	0,8162	1,0	0,8483	0,8162

Zwischenwerte können aus der Literatur entnommen oder durch graphische Interpolation bestimmt werden.

II. Näherungsformeln von Korndörfer.

Die schwerfälligen Berechnungen, die nach den Formeln von Stefan und von Hemmeter nötig sind, veranlassten Korndörfer zur Aufstellung sehr brauchbarer Näherungsformeln⁶⁾; ihr Fehler übersteigt gewöhnlich nicht 1 %.

Die Formeln von Korndörfer lassen sich in folgender Art darstellen:

$$L_s \text{ (cm)} = 10,5 \cdot D \cdot w^2 \cdot \Phi \quad (12a)$$

$$\text{wobei } \Phi = f\left(\frac{D}{U}\right) \text{ und } U = 2 \cdot (b + c) \quad (12b)$$

$$\text{für } \left(\frac{D}{U}\right) > 0 \text{ ist } \Phi = \sqrt[4]{\left(\frac{D}{U}\right)^3} \quad (12, I)$$

$$\text{für } \left(\frac{D}{U}\right) > \frac{1}{3} \text{ ist } \Phi = \sqrt{\frac{D}{U}} \quad (12, II)$$

$$\text{für } \left(\frac{D}{U}\right) = 1 \text{ ist } \Phi = 1 \quad (12, III)$$

³⁾ Rosa, Bull. Bur. Stand. 3, 1. Washington 1907.

⁴⁾ Hemmeter, Arch. für Elektrotechn., Bd. XI (1922), 5. Heft, S. 154; Bd. XIII (1924), S. 460; Bd. XIV (1925), S. 153. — Strecker, Hilfsbuch, 10. Aufl. (1925), Bd. I, S. 83.

⁵⁾ Arch. Elektrotechn., Bd. XIII (1924), S. 477.

⁶⁾ ETZ, 1917, Heft 44, S. 521; E.u.M. (Wien) 1918, S. 67 (Referat).

Nach *Korndörfer* soll im Dauerbetrieb mit dem Nennstrom I sein:

$$a = \frac{I \cdot w}{b \cdot c} = 100 \text{ AW/cm}^2 \text{ ohne Kühlkanäle;}$$

$$a = 32 \text{ AW/cm}^2 \text{ mit Kühlkanälen.}$$

Die einfachste Formel mit $\Phi = 1$ und mit $D = U$:

$$L_s (\text{cm}) = 10,5 \cdot D \cdot w^2 \quad (12a) \quad (12, \text{III})$$

ergibt Spulen mit günstiger Form und mit geringem Baustoffaufwand.

Die Form der Gl. 12a und 12, III stimmt überein mit der Form der Gl. 7 und 11.

$$\text{Für } D = U = 2 \cdot (b + c) = 2 \cdot (\beta + \gamma) \cdot D \text{ wird} \\ (\beta + \gamma) = 0,5.$$

Es wird später nachgewiesen, dass das *Kupfergewicht* ein *Minimum* wird (für Dauerbetrieb mit dem Nennstrom), wenn $\beta = \gamma \cdot \sqrt{3}$ gewählt wird; dann wird $\frac{\gamma}{\beta} = \frac{c}{b} = 0,5773$, so dass die Formel von *Stefan* (Gl. 5, 6 und 7) anzuwenden ist. Man erhält $A_1 = 10,16$ nach *Stefan*; der Näherungswert von *Korndörfer* 10,5 stimmt also sehr gut; die Übereinstimmung wird noch besser, wenn man das Korrektionsglied K der Formel von *Stefan* (Gl. 1 und 2) berücksichtigt.

Die Werte für Φ (*Korndörfer*) sind Parabeln, die als Ersatzfunktionen der Funktionswerte A_1 (*Stefan*, Gl. 6) und A_2 (*Hemmeter*, Gl. 10) anzusehen sind.

III. Aufstellung der Berechnungsformeln.

a) Allgemeines.

Aus Fig. 1 und 3 lassen sich leicht die folgenden Beziehungen ableiten:

$$w \cdot q = b \cdot c \cdot \frac{P}{100} \cdot f_K = \beta \cdot \gamma \cdot D^2 \cdot f_w \quad (13)$$

Dabei ist

w	Windungszahl;
q (cm ²)	Kupferquerschnitt des Drahtes;
$f_K = \frac{q}{d_i^2}$	Kupferfüllfaktor bei <i>genauer</i> Wicklung, Windung an Windung liegend;
d_i (cm)	Drahtdurchmesser samt Isolation;
$\frac{P}{100}$	Genauigkeitsgrad der Wickelarbeit bei «wildem» Wickeln; er hängt von den Werkstattbehelfen und von der Geschicklichkeit des Wicklers ab;
$f_w = \frac{P}{100} \cdot f_K$	Kupferfüllfaktor bei «wildem» Wickeln.

Die beiden Formeln 7 (*Stefan*) und 11 (*Hemmeter*) lassen sich zusammenziehen in:

$$L_s (\text{cm}) = A \cdot D \cdot w^2 \quad (14)$$

Aus Gl. 13 und 14 wird:

$$L_s (\text{cm}) = A \cdot D^5 \cdot \frac{f_w^2}{q^2} \cdot \beta^2 \cdot \gamma^2 \quad (15)$$

Im Dauerbetrieb mit dem Nennstrom I entsteht die Stromwärme

$$I^2 \cdot R = I^2 \cdot \frac{w \cdot D \pi}{k \cdot q} \quad (\text{Watt}) \quad (16)$$

Für die Leitfähigkeit (Kupfer, warm) kann man den Wert

$$k = 50 \cdot 10^4 \text{ Siemens/cm}^2/\text{cm} \quad (17)$$

annehmen.

Als Kühlfläche F cm² kommen die beiden ringförmigen Stirnflächen und die äussere Mantelfläche in Betracht; die innere Mantelfläche ist gewöhnlich durch die Tragkonstruktion verdeckt; es wird daher:

$$F (\text{cm}^2) = 2 \pi \cdot D \cdot c + D_a \cdot \pi \cdot b = M \cdot D^2 \cdot \pi \quad (18)$$

$$\text{wobei} \quad M = 2\gamma + \beta + \beta\gamma \quad (19)$$

Da man nach einfachen Zwischenrechnungen aus Gl. 16

$$I^2 \cdot R = I^2 \cdot D^3 \cdot \pi \cdot \frac{\beta \cdot \gamma}{k} \cdot \frac{f_w}{q^2} \quad (16a)$$

findet, so wird die *spezifische Kühlfläche*:

$$a (\text{cm}^2/\text{W}) = \frac{F}{I^2 \cdot R} = \frac{M}{\beta \cdot \gamma} \cdot \frac{k}{I^2 \cdot D} \cdot \frac{q^2}{f_w} \quad (20)$$

und daher der mittlere Spulendurchmesser:

$$D = \frac{M}{\beta \cdot \gamma} \cdot \frac{k}{I^2 \cdot a} \cdot \frac{q^2}{f_w} \quad (21)$$

für die spezifische Kühlfläche kann der Wert

$$a = 20 \text{ cm}^2/\text{W} \quad (22)$$

empfohlen werden.

Das Kupfergewicht der Spule ist

$$G_K = w \cdot D \pi \cdot q \cdot s = \pi \cdot \beta \cdot \gamma \cdot f_w \cdot s \cdot D^3 \quad (\text{in g}) \quad (23)$$

Mit dem Werte für D aus Gl. 21 erhält man daher:

$$G_K = N \cdot \pi \cdot s \cdot \frac{k^3}{I^6 \cdot a^3} \cdot \frac{q^6}{f_w^3} \quad (24)$$

$$\text{wobei } N = \frac{M^3}{\beta^2 \cdot \gamma^2} = \frac{(2\gamma + \beta + \beta \cdot \gamma)^3}{\beta^2 \cdot \gamma^2} \quad (25)$$

eine Funktion von β und γ ist; sie muss ein *Minimum* werden, wenn das *Kupfergewicht* ein *Minimum* werden soll, da ja s, k, I, a gegebene Grössen sind, während q nach den handelsüblichen Werten des Drahtdurchmessers zu wählen ist.

b) Minimum des Kupfergewichts.

In dem Ausdrucke für N (Gl. 25) kommen die Verhältniszahlen β und γ vor, die auch in A enthalten sind, jedoch in so verwickelter Form, dass die Herstellung einer für die weiteren Berechnungen annehmbaren Beziehung zwischen β und γ aussichtslos erscheint.

Aber es bietet sich ein anderer Weg: Aus der Formel von *Korndörfer* (12a), die der Gl. 14 äusserlich vollständig gleicht, folgt:

$$A \approx 10,5 \cdot \Phi = 10,5 \cdot f\left(\frac{D}{U}\right) = 10,5 \cdot f\left(\frac{1}{2\beta + 2\gamma}\right) \quad (26)$$

Wenn man nun

$$\beta + \gamma = \sigma \quad (27)$$

setzt und für σ die Grenzen bestimmt, die den Grenzen für $\left(\frac{D}{U}\right)$ entsprechen, so erhält man:

$$\left. \begin{array}{l} \text{für } (D/U) < 1 \quad = 1 \quad > 1 \\ \quad \quad \quad \quad \quad < 3 \\ \text{wird } \sigma > 0,5 \quad = 0,5 \quad < 0,5 \\ \quad \quad \quad \quad \quad > 0,1667 \end{array} \right\} \quad (28)$$

Es genügt also, die Werte $\sigma = 0,2$ bis $\sigma = 1$ zu wählen; günstige Spulenformen entstehen für $\gamma = 0,15$ bis $\gamma = 0,3$; für $\gamma = 1$ wird der Innendurchmesser $D_i = D \cdot (1 - \gamma) = 0$. Für das Verhältnis $\frac{\beta}{\gamma}$ kommen grössere Werte als 3 kaum vor, weil die Tragkonstruktion für solche in axialer Richtung lange Spulen schon erhebliche Schwierigkeiten macht.

Um nun das Minimum des Kupfergewichtes G_K (Gl. 24) zu bestimmen, kann man das Minimum der Funktion N (Gl. 25) nach der Formel von *Korndörfer* (Gl. 12) für $\sigma = 0,2$ bis $1,0$ ermitteln.

Mit $\beta = \sigma - \gamma$ erhält man dann:

$$N = \frac{M^3}{\beta^2 \cdot \gamma^2} = \frac{(\gamma + \gamma\sigma - \gamma^2 + \sigma)^3}{\gamma^4 - 2\sigma\gamma^3 + \sigma^2\gamma^2} \quad (29)$$

Da $\sigma = 0,2$ bis $1,0$ als konstante Grösse gewählt werden kann, so lässt sich die Bedingung für das Minimum ermitteln; für $\frac{dN}{d\gamma} = 0$ wird:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\gamma^4 - 2\sigma\gamma^3 + \sigma^2\gamma^2) \cdot 3 \cdot (\gamma + \gamma\sigma - \gamma^2 + \sigma)^2 \cdot \\ (1 + \sigma - 2\gamma) - (\gamma + \sigma\gamma - \gamma^2 + \sigma)^3 \cdot \\ (4\gamma^3 - 6\sigma\gamma^2 + 2\sigma^2\gamma) \end{array} \right\} = 0 \quad (30)$$

Aus $(\gamma + \gamma\sigma - \gamma^2 + \sigma)^2 = 0$ ergeben sich vier Lösungen, und zwar zwei Lösungen $\gamma > 1$ und zwei Lösungen $\gamma < 0$; diese vier Lösungen sind also unbrauchbar.

Die fünfte Lösung $\gamma = 0$ ist ebenfalls nicht verwendbar. Es bleibt dann noch die folgende Bedingungsgleichung übrig:

$$\left\{ \begin{array}{l} (3 + 3\sigma - 6\gamma) \cdot (\gamma^3 - 2\sigma\gamma^2 + \sigma^2\gamma) \\ - (\gamma + \sigma\gamma - \gamma^2 + \sigma) \cdot (4\gamma^2 - 6\sigma\gamma + 2\sigma^2) \end{array} \right\} = 0 \quad (31)$$

Diese Gleichung lässt sich in der folgenden Form schreiben:

$$\gamma^3 \cdot (1 - 5\sigma + 2\gamma) + \gamma \cdot (4\sigma\gamma + 4\sigma^2\gamma - 7\sigma^2 - \sigma^3) + 2\sigma^3 = 0 \quad (32)$$

sie ist aber durch $(\gamma - \sigma)$ teilbar; daher ist

$$\gamma_6 = \sigma \quad (\text{mit } \beta_6 = 0) \quad (33)$$

die 6. Lösung; sie ist unbrauchbar, weil $\beta > 0$ sein muss.

Es bleiben also nur noch die Lösungen 7, 8 und 9 übrig, die in der Gleichung

$$2\gamma^3 + \gamma \cdot (\gamma - 3\sigma\gamma + \sigma^2 + 5\sigma) - 2\sigma^2 = 0 \quad (34)$$

stecken müssen.

Für die Grenzen $\sigma = 0,2$ bis $\sigma = 1,0$ erhält man daraus eine Gruppe von neun Gleichungen dritten Grades; sie sind in der nachstehenden Uebersicht eingetragen; dabei ist auch die siebente Lösung aufgenommen; die achte und neunte Lösung ist imaginär. Von allen neun möglichen Lösungen der Bedingungsgleichung 30 ist also nur *eine einzige Lösung* brauchbar.

Tabelle II.

$\frac{\sigma}{\beta + \gamma}$	Gleichung (vgl. 34)	γ	$\frac{\beta}{\sigma - \gamma}$	$\frac{\beta}{\gamma}$
0,2	$25 \cdot \gamma^3 + \gamma \cdot (5 \cdot \gamma + 13) = 1 \dots$	0,074	0,126	1,704
0,3	$200 \cdot \gamma^3 + \gamma \cdot (10 \cdot \gamma + 159) = 18 \dots$	0,111	0,189	1,703
0,4	$50 \cdot \gamma^3 - \gamma \cdot (5 \cdot \gamma - 54) = 8 \dots$	0,147	0,253	1,724
0,5	$8 \cdot \gamma^3 - \gamma \cdot (2 \cdot \gamma - 11) = 2 \dots$	0,183	0,317	1,735
0,6	$25 \cdot \gamma^3 - 2 \cdot \gamma \cdot (5 \cdot \gamma - 21) = 9 \dots$	0,220	0,380	1,729
0,7	$200 \cdot \gamma^3 - \gamma \cdot (110 \cdot \gamma - 399) = 98 \dots$	0,256	0,444	1,736
0,8	$50 \cdot \gamma^3 - \gamma \cdot (35 \cdot \gamma - 116) = 32 \dots$	0,291	0,509	1,750
0,9	$200 \cdot \gamma^3 - \gamma \cdot (170 \cdot \gamma - 531) = 162 \dots$	0,326	0,574	1,762
1,0	$\gamma^3 - \gamma \cdot (\gamma - 3) = 1 \dots$	0,362	0,638	1,766
Mittelwert				1,733

In Tabelle II sind auch die Werte für β und für $\frac{\beta}{\gamma}$ eingetragen; der Mittelwert ist fast genau

$$\frac{\beta}{\gamma} = 1,732 = \sqrt{3} \quad (35)$$

daher wird

$$\sigma = \beta + \gamma = \gamma \cdot (1 + \sqrt{3}) = 2,732 \cdot \gamma \quad (36)$$

Die grössten Abweichungen des Verhältnisses $\frac{\beta}{\gamma}$ von dem Werte $\sqrt{3}$ betragen $-1,675\%$ und $+1,965\%$; da aber die Kurve für N in der Nähe des Minimums sehr flach verläuft, so spielen die erwähnten Abweichungen gar keine Rolle.

Durch die Feststellung des Zusammenhanges zwischen β und γ (Gl. 35) ist aber sehr viel gewonnen, denn man kann jetzt die Werte A_1 (Gl. 6) für alle Werte $\sigma = 0,2$ bis $\sigma = 1,0$ ein für allemal berechnen.

Aber auch die Werte für Φ (Gl. 12) lassen sich leicht ermitteln, da ja

$$\frac{D}{U} = \frac{D}{2 \cdot (b+c)} = \frac{1}{2 \cdot (\beta + \gamma)} = \frac{1}{2 \cdot \sigma} \quad (37)$$

durch die Wahl von σ mitbestimmt ist.

Man kann dann die Werte $(10,5 \cdot \Phi)$ mit den Werten für A_1 vergleichen und dadurch einen zuverlässigen Anhaltspunkt für den Genauigkeitsgrad der Näherungsformel von *Korndörfer* gewinnen.

Die Ergebnisse dieser zeitraubenden Berechnungen sind in der folgenden Uebersicht zusammengestellt. Es sei nur erwähnt, dass hier die Formel von *Stefan* gilt, weil

$$\frac{c}{b} = \frac{\gamma}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,5773 \text{ (also } < 1) \quad (38)$$

ist; durch Interpolation (Tab. I) findet man:

$$\gamma_1 = 0,8137 \text{ und } \gamma_2 = 0,3657 \quad (39)$$

Die Formel von *Stefan* nimmt für $\beta = \gamma \cdot \sqrt{3}$ folgende Form an:

$$L_s = A_1 \cdot D \cdot w^2 = 2 \cdot n \cdot D \cdot w^2 \cdot \left[\left(1 + \frac{10 \cdot \gamma^2}{24} \right) \cdot \log \text{nat} \frac{2}{\gamma} - y_1 + \frac{3 \cdot \gamma^2}{4} \cdot y_2 \right] \quad (40)$$

Man erhält also:

Tabelle III.

σ	$\frac{\gamma}{\sigma} = \frac{1}{2,732}$	$\frac{D}{U} = \frac{1}{2 \cdot \sigma}$	$\Phi = \sqrt{\frac{D}{U}}$	$\Phi = \sqrt[4]{\left(\frac{D}{U}\right)^3}$	Stefan A_1 (100%)	Korndörfer $10,5 \cdot \Phi$	Neue Näherungsformel (Gl. 42)
0,2	0,0732	2,5000	1,5811	—	15,7	16,6	105,8
0,3	0,1099	1,6667	1,2910	—	13,2	13,56	102,8
0,4	0,1465	1,2500	1,1180	—	11,45	11,73	102,5
0,5	0,1832	1,0000	1,0000	1,0000	10,16	10,5	103,4
0,6	0,2198	0,8333	—	0,872	9,08	9,15	100,8
0,7	0,2563	0,7143	—	0,776	8,23	8,15	99,0
0,8	0,2930	0,6250	—	0,7027	7,52	7,37	98,0
0,9	0,3295	0,5556	—	0,644	6,90	6,75	97,8
1,0	0,3662	0,5000	—	0,5945	6,36	6,23	98,0

Stefan $L_s \text{ (cm)} = A_1 \cdot D \cdot w^2 \quad (7)$
 Korndörfer $L_s \text{ (cm)} = 10,5 \cdot \Phi \cdot D \cdot w^2 \quad (12a)$

Trägt man die Werte A_1 und $10,5 \cdot \Phi$ als Funktion von γ in einem Linienbilde ein (Fig. 4), so erhält man für A_1 eine stetige Kurve, für $10,5 \cdot \Phi$ jedoch zwei Kurvenstücke, die bei $\sigma = 0,5$ und

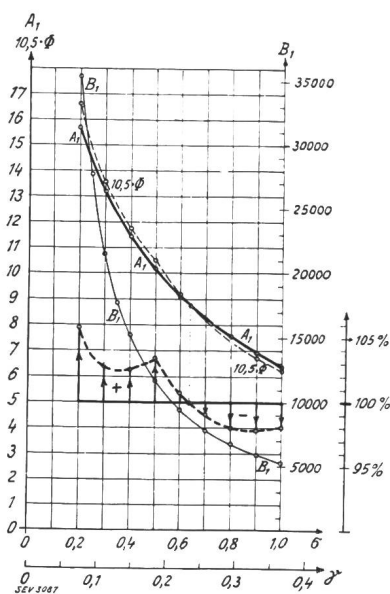


Fig. 4.

$\gamma = 0,1832$ zusammenstossen; die Näherungsformel von *Korndörfer* stützt sich eben auf zwei *Ersatzparabeln* mit den Exponenten $\frac{1}{2}$ und $\frac{3}{4}$, die sich im Punkt für $\sigma = 0,5$ schneiden.

Fig. 4 enthält auch die Fehlerkurve der Näherungsformel von *Korndörfer*.

Es liegt nun nahe, die Kurve für A_1 (*Stefan*) durch ein *Hyperbel* zu ersetzen, indem man sie auf ein neues Achsensystem $0 \ x \ y$ bezieht nach der Gleichung:

$$x \cdot y = C; \quad (m + \gamma) \cdot (n + A_1) = C \quad (41)$$

Wählt man aus Tab. III die drei Festpunkte für $\sigma = 0,2, 0,5$ und $1,0$ zur Bestimmung der drei Konstanten m, n, C , dann erhält man die *neue Näherungsformel*

$$(0,1314 + \gamma) \cdot (0,155 + A_1) = 3,244 \quad (42)$$

für das *Minimum des Kupfergewichtes*.

Tabelle III lässt erkennen, dass die neue Näherungsformel eine sehr gute Uebereinstimmung mit A_1 (*Stefan*) zeigt; die grösste Abweichung beträgt nur 0,76 %.

c) Berechnung des Drahtquerschnittes.

Man erhält aus Gl. 15, 19 und 21

$$\frac{L_s \cdot I^{10} \cdot a^5}{k^5} = A_1 \cdot \frac{M^5}{\beta^3 \cdot \gamma^3} \cdot \frac{q^8}{f_w^3} = B_1 \cdot \frac{q^8}{f_w^3} \quad (43)$$

Wenn man also für $\sigma = 0,2$ bis $\sigma = 1,0$ die Werte für B_1 berechnet, so kann man den Wert $\frac{q^8}{f_w^3}$ ermitteln, weil ja L_s und I gegeben sind, während a und k gewählt werden kann.

Die Lösung der Aufgabe wird sehr bequem, wenn man eine Zahlentafel für die «Drahtfunktion» $\frac{q^8}{f_w^3}$ entwirft und die Werte unter Verwendung logarithmischer Maßstäbe aufträgt.

Zunächst enthält Tab. IV die Werte für B_1 (Fig. 4).

Tabelle IV.

$\sigma = \beta + \gamma$	$\gamma = \frac{\sigma}{2,732}$	β	A_1 (Stefan)	M	$\frac{M^5}{\beta^3 \cdot \gamma^3}$	B_1	B_1 (Gl. 44) Näherungsformel
0,2	0,0732	0,1268	15,7	0,2825	2257	35370	35370
0,3	0,1099	0,1901	13,2	0,4308	1630	21500	21250
0,4	0,1465	0,2535	11,45	0,5836	1321	15110	15110
0,5	0,1832	0,3168	10,16	0,7412	1147	11630	11660
0,6	0,2198	0,3802	9,08	0,9033	1032	9360	9450
0,7	0,2563	0,4437	8,23	1,0700	954	7850	7910
0,8	0,2930	0,5070	7,52	1,2415	904	6795	6785
0,9	0,3295	0,5705	6,90	1,4175	860	5930	5920
1,0	0,3662	0,6338	6,36	1,5982	829	5275	5245

Die Kurve $B_1 = f(\sigma)$ lässt sich auch durch die Gleichung einer *Hyperbel* wiedergeben.

$$(\sigma - 0,045) \cdot (B_1 + 580) = 5555 \quad (44)$$

oder wegen $\sigma = \gamma \cdot 2,732$:

$$(\gamma - 0,0165) \cdot (B_1 + 580) = 2040 \quad (45)$$

Aus Tab. IV erkennt man, dass die grösste Abweichung vom richtigen Werte unter 1 % bleibt.

Gl. 24 für das Kupfergewicht der Spule enthält ausser den bekannten und gegebenen Grössen s , k , a und I nur noch die Drahtfunktion $\frac{q^6}{f_w^2}$ und die von β und γ abhängige Grösse $N = \frac{M^3}{\beta^2 \cdot \gamma^2}$, die für $\beta = \gamma \cdot \sqrt{3}$ ein Minimum wird.

In Gl. 21 für den mittleren Spulendurchmesser kommt ausser den bekannten und gegebenen Grössen k , a und I nur noch die Drahtfunktion $\frac{q^2}{f_w}$ und die von β und γ abhängige Grösse

$$P = \frac{M}{\beta \cdot \gamma} \quad (46)$$

vor; es wird dann

$$D = P \cdot \frac{k}{I^2 \cdot a} \cdot \frac{q^2}{f_w} \quad (47)$$

Wenn man die Werte für N und P mit $\beta = \gamma \cdot \sqrt{3}$ berechnet, so erhält man Tab. V; auch hier lassen sich Näherungsformeln (Hyperbel-Gleichungen) finden.

Man erhält:

$$(\sigma - 0,00747) \cdot (N - 30,5) = 44,55 \quad (48)$$

und

$$\sigma \cdot (P - 0,98) = 5,904 \quad (49)$$

Die Umrechnung auf γ macht keine Schwierigkeiten.

Tabelle V.

$\sigma = \beta + \gamma$	$N = \frac{M^3}{\beta^2 \cdot \gamma^2}$	N (Gl. 48) Nähe- rungs- formel	$P = \frac{M}{\beta \cdot \gamma}$	P (Gl. 49) Nähe- rungs- formel	$\gamma = \frac{\sigma}{2,732}$
0,2	262,3	262,3	30,50	30,55	0,0732
0,3	184,2	183,1	20,67	20,69	0,1099
0,4	144,2	144,1	15,74	15,76	0,1465
0,5	121,1	121,0	12,80	12,80	0,1832
0,6	105,7	105,8	10,82	10,83	0,2198
0,7	94,9	94,9	9,42	9,42	0,2563
0,8	87,0	86,8	8,37	8,36	0,2930
0,9	80,5	80,4	7,54	7,54	0,3295
1,0	75,7	75,4	6,885	6,884	0,3662

Die Uebereinstimmung der Werte ist überraschend gut; der grösste Fehler beträgt bei N nur etwa 0,6 %, bei P sogar nur 0,16 %.

Aus den Formeln für L_s (Gl. 43), für G_K (Gl. 24) und für D (Gl. 21) erkennt man, dass noch die Drahtfunktionen $\frac{q^8}{f_w^3}$, $\frac{q^6}{f_w^2}$ und $\frac{q^2}{f_w}$ vorkommen, die sich nach den Normen für isolierte Drähte berech-

nen lassen, sobald man sich für den Genauigkeitsgrad p % bei der Herstellung der Wicklung entschieden hat.

Den Ausgangspunkt für die praktische Berechnung bildet nun Gl. 43; sobald σ oder $\gamma = (\sigma/2,732)$ zunächst geschätzt wurde, kann (q^8/f_w^3) und daher auch der Drahtdurchmesser d ermittelt werden.

Aus Gl. 43 erkennt man aber, dass auch eine nur geringfügige Aenderung von d auf den Wert von B_1 (und damit auch auf σ und γ) sehr bedeutend einwirkt, weil d in der 16. Potenz vorkommt, während f_w bei kleinen Aenderungen von d fast ganz konstant bleibt.

Für $d_2 = 1,05 \cdot d_1$ wird $q_2^8 = 2,184 \cdot q_1^8$; daher wird nach Gl. 43 $B_2 = \frac{B_1}{2,184} = 0,457 \cdot B_1$.

War also z. B. zuerst $\sigma = 0,5$ angenommen, wo zu $B_1 = 11\,630$ gehört (Tab. IV), so würde bei Erhöhung des Drahtdurchmessers um nur 5 % der Wert $B_2 = 0,457 \cdot 11\,630 = 5310$, somit σ nahezu $= 1$; es würde also γ von 0,1832 auf rund 0,36 ansteigen.

Man erkennt, wie empfindlich die Spulenform auf eine Aenderung des Drahtdurchmessers reagiert; mit Rücksicht auf die handelsüblichen Werte des Drahtdurchmessers sind aber kleine Aenderungen von d unvermeidlich. Man wird sich daher häufig damit abfinden müssen, dass man dem Minimum des Kupfergewichtes nur nahekommt, wenn man mit Rücksicht auf die zur Verfügung stehenden Raumverhältnisse die Grösse von $D_a = D \cdot (1 + \gamma)$ oder $D_i = D \cdot (1 - \gamma)$ nicht beliebig zulassen kann.

Es sind jetzt nur noch die Drahtfunktionen, die in Gl. 43, 24 und 21 vorkommen, zu berechnen.

Für die zumeist verwendeten Drähte mit doppelter Baumwollenspinnung erhält man mit d_0 mm Drahtdurchmesser (blank), mit $4 \cdot \delta_0$ mm Durchmesserzuwachs infolge der Umspinnung und mit q_0 mm² = $100 \cdot q$, wobei q cm² = Drahtquerschnitt (blank) die Drahtfunktionen in Tab. VI.

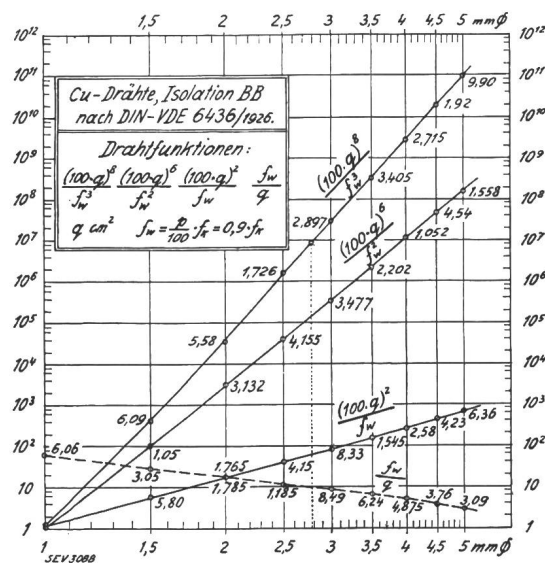


Fig. 5.

Tabelle VI.

Kupferdrähte mit Isolation BB (zweimal Baumwolle) nach DIN VDE 6436/1926									
d_0 mm Ø Cu	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$4 \delta_0$ mm (Auftrag)	0,22	0,22	0,26	0,26	0,26	0,3	0,3	0,4	0,4
q_0 mm ² Cu	0,7854	1,767	3,142	4,909	7,069	9,621	12,566	15,904	19,635
$f_K = q_0 / (d_0 + 4 \delta_0)^2$	0,529	0,597,	0,615	0,645	0,666	0,667	0,680	0,663	0,673
$f_w = 0,9 \cdot f_K$	0,476	0,538	0,554	0,581	0,600	0,600	0,612	0,597	0,605
$\frac{(100 \cdot q)^8}{f_w^3}$	1,353	609	55800	1,726.10 ⁵	28,97.10 ⁵	3,405.10 ⁵	27,15.10 ⁵	192,0.10 ⁵	990.10 ⁵
$\frac{(100 \cdot q)^6}{f_w^2}$	1,041	105,0	3132	4,155.10 ⁴	34,77.10 ⁴	2,202.10 ⁶	10,52.10 ⁶	45,4.10 ⁶	1,558.10 ⁸
$\frac{(100 \cdot q)^2}{f_w}$	1,299	5,80	17,85	41,5	83,3	154,5	258	423	636
$\frac{f_w}{q}$	60,6	30,5	17,65	11,85	8,49	6,24	4,875	3,76	3,09

Die Werte der Drahtfunktionen sind in Fig. 5 eingetragen; die Verwendung logarithmischer Maßstäbe führt zu Linien, die so wenig von Geraden abweichen, dass die Interpolation von Zwischenwerten sehr erleichtert wird.

IV. Thermische Beanspruchung bei Kurzschluss. Wärmezeitkonstante.

In den bisher durchgeführten Entwicklungen wurde der *Dauerbetrieb* mit dem Nennstrom I behandelt; er stützt sich auf die allgemeine Erwärmungsgleichung:

$$I^2 \cdot R \cdot dt = c_1 \cdot G_K \cdot d\tau + C \cdot F \cdot \tau \cdot dt \quad (\text{in Joule}) \quad (50)$$

Dabei ist:

$$\begin{aligned} c_1 &= \sim 0,4 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}; \\ c &= \sim 0,096 = \sim 0,1 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C} = \text{spezifische Wärme des Kupfers;} \end{aligned}$$

$$c_1 = \frac{c}{0,24} \quad (51)$$

C Wärmeabgabefaktor durch Strahlung, Konvektion und Leitung in W/cm² · °C;
 F Kühlfläche in cm².

Im *Dauerbetrieb* gilt

$$c_1 \cdot G_K \cdot d\tau = 0 \text{ und } I^2 \cdot R = C \cdot F \cdot \tau_{\max} \quad (52)$$

$$a = \frac{F}{I^2 \cdot R} = \frac{1}{C \cdot \tau_{\max}} \quad (53)$$

für $a = 20 \text{ cm}^2/\text{W}$ und für $\tau_{\max} = 50^\circ$ wird $C = \frac{1}{1000}$.

Bei *Kurzschluss* mit der Stromstärke $I_K \gg I$ dauert die Belastung nur kurze Zeit; t_K beträgt also nur einige Sekunden und die Erwärmung steigt auf τ_K , und zwar linear mit der Zeit, weil die ganze Wärme aufgespeichert wird; da $C \cdot F \cdot \tau \cdot dt = 0$, erhält man aus Gl. 50:

$$I_K^2 \cdot R \cdot t_K = c_1 \cdot G_K \cdot \tau_K \quad (54)$$

Mit $R = \frac{w \cdot D \cdot \pi}{k \cdot q}$ und $G_K = w \cdot D \cdot \pi \cdot q \cdot s$ wird daher:

$$\left(\frac{I_K}{q}\right)^2 \cdot t_K = j_K^2 \cdot t_K = (c_1 \cdot k \cdot s) \cdot \tau_K \quad (55)$$

wobei j_K (A/cm²) die Stromdichte bei Kurzschluss bedeutet.

Für $c_1 = 0,4$, $k = 50 \cdot 10^4$ und $s = 8,9$ wird daher:

$$j_K^2 \cdot t_K = 178 \cdot 10^4 \cdot \tau_K \quad (56)$$

Lässt man bei Kurzschluss ebenfalls $\tau_K = 50^\circ \text{C}$ als Erwärmung zu, so wird:

$$j_K^2 \cdot t_K = 89 \cdot 10^6 \quad (57)$$

Wenn also die Kurzschlusszeit t_K sec bekannt ist oder nach den Betriebserfordernissen gewählt wird, so lässt sich die Stromdichte j_K berechnen und aus dem Ueberstromverhältnis $\frac{I_K}{I}$ auch der Querschnitt q_K cm² ermitteln.

Umgekehrt kann man aus dem für den Dauerbetrieb berechneten Querschnitt q das *erreichbare Ueberstromverhältnis* für die Kurzschlusszeit t_K bestimmen; wenn es zu klein ist, dann muss q_K aus Gl. 57 berechnet werden. Für $q_K > q$ wird dann aber $a > 20 \text{ cm}^2/\text{W}$.

Um die Wärmezeitkonstante T zu ermitteln, vereinigt man Gl. 54 und 52 und erhält:

$$\left(\frac{I_K}{I}\right)^2 \cdot t_K = \frac{c_1 \cdot G_K}{C \cdot F} \cdot \frac{\tau_K}{\tau_{\max}} = T \cdot \frac{\tau_K}{\tau_{\max}} \quad (58)$$

Man kann T auch noch in anderer Weise entwickeln. Aus Gl. 55 und 58 wird:

$$\left(\frac{I}{q}\right)^2 \cdot T = (c_1 \cdot k \cdot s) \cdot \tau_{\max} \quad (59)$$

Mit $c_1 = 0,4$; $k = 50 \cdot 10^4$; $s = 8,9$ und $\tau_{\max} = 50$ ergibt sich also:

$$\left(\frac{I}{q}\right)^2 \cdot T = 89 \cdot 10^6 \quad (60)$$

Für τ_K wählt man häufig höhere Werte als 50° Erwärmung; dies ist jedoch nicht zu empfehlen, weil die Drosselspule schon im Dauerbetrieb warm wird und bei einem nachher eintretenden Kurzschluss eine zusätzliche Erwärmung erfährt, so dass dann die Gesamterwärmung leicht zu gross wird.

Aus Gl. 21 erhält man wegen Gl. 46 und 59

$$T = \frac{a \cdot \tau_{\max}}{P} \cdot c_1 \cdot s \cdot D \cdot f_w \quad (61)$$

Die Werte für P (Gl. 49, Tab. V) hängen von β und γ ab; die Zeitkonstante T steigt, wenn γ grösser gewählt wird, weil dadurch P kleiner wird.

Bei einer allfällig nötigen Aenderung des Drahtdurchmessers nach der ersten Berechnung aus Gl. 43 und Fig. 5 soll daher B_1 (Tab. IV, Gl. 45) kleiner werden, weil dann γ grösser wird; aus Gl. 43 folgt, dass dies durch Vergrösserung von q und daher auch von d gelingt.

Der Drahtdurchmesser ist daher aufzurunden und nicht abzurunden.

Auch Gl. 59 lehrt, dass T nur durch die Vergrösserung von q wirksam erhöht werden kann.

In Gl. 61 bestimmt der Wert $\frac{D}{P}$, aber auch a , τ_{\max} und f_w die Zeitkonstante, die mit diesen Werten steigt. Aus Gl. 47 erhält man:

$$\frac{D}{P} = \frac{k}{I^2 \cdot a} \cdot \frac{q^2}{f_w} \quad (62)$$

und man erkennt wieder, dass die Vergrösserung von q günstig ist; sie ist auch ausgiebiger als die Vergrösserung von a und von f_w ; letzteres ändert sich ja überhaupt nur wenig (Tab. VI).

V. Beispiel.

Gegeben: Nennstrom $I = 10$ A dauernd, Induktivität $L_s = 10$ mH $= 10 \cdot 10^6$ cm.

Gewählt: $a = 20$ cm²/W, $k = 50 \cdot 10^4$ S/cm²/cm (warm).

Erste Annahme: $\sigma = 0,5$; $\gamma = 0,1832$ (Tab. IV); $B_1 = 11630$.

Aus Gl. 43 erhält man:

$$\frac{(100 \cdot q^8)}{f_w^3} = 8,82 \cdot 10^6$$

Aus Fig. 5 kann man für die Isolation BB und für $f_w = 0,9 \cdot f_K$, das ist für $p = 90$ % Wickelgenauigkeit, den Drahtdurchmesser $d_0 = \sim 2,78$ mm ablesen, der aber im Handel nicht vorkommt.

Zweite Annahme: $d_0 = 2,8$ mm, $q_0 = 6,158$ mm².

Nach den Drahtnormen (Tab. VI) ist der Drahtdurchmesser samt Umspinnung $d_{01} = 2,8 + 0,26 = 3,06$ mm; daher wird

$$f_w = 0,9 \cdot f_K = 0,9 \cdot \frac{6,158}{9,364} = 0,592$$

Wegen $100 \cdot q = q_0$ wird also:

$$\frac{(100 \cdot q)^8}{f_w^3} = \frac{6,158^8}{0,592^3} = 10,07 \cdot 10^6$$

in Uebereinstimmung mit Fig. 5.

Aus Gl. 43 lässt sich jetzt der korrigierte Wert für B_1 berechnen; man erhält:

$$\frac{32}{3125 \cdot 10^3} = B_1 \cdot \frac{10,07 \cdot 10^6}{10^{16}}; \quad B_1 = 10170$$

(Vgl. Fig. 5, Tab. IV).

Aus Gl. 45 findet man $\gamma = 0,2065$, daher $\beta = \gamma \cdot \sqrt{3} = 0,3578$ und $\sigma = 0,5643$. Aus Gl. 49 folgt $P = 11,47$. (Vgl. Tab. V.)

Jetzt lässt sich schon der mittlere Spulendurchmesser D ermitteln; es wird aus Gl. 47:

$$D = P \cdot \frac{k}{I^2 \cdot a} \cdot \frac{q^2}{f_w} = 11,47 \cdot \frac{50 \cdot 10^4}{10^2 \cdot 20} \cdot \frac{37,92 \cdot 10^{-4}}{0,592} = 18,37 \text{ cm};$$

daher $c = \gamma \cdot D = 3,79$ cm und $b = \beta \cdot D = 6,56$ cm; ferner $D_a = D + c = 22,16$ cm und $D_1 = 14,58$ cm.

Aus Gl. 13 kann man die Windungszahl berechnen; es wird:

$$w = 239 \text{ Windungen.}$$

Aus Gl. 42 findet man $A_1 = 9,445$ (Tab. III, Fig. 4).

Aus Gl. 7 erhält man endlich:

$$L_s = A_1 \cdot D \cdot w^2 = 9,9 \cdot 10^6 \text{ cm.}$$

Die geringfügige Abweichung vom Sollwert $L_s = 10 \cdot 10^6$ cm ist auf die Ablesungsfehler am Rechenschieber zurückzuführen.

Man erhält nun weiter:

$$R = \frac{w \cdot D \cdot \pi}{k \cdot q} = 0,448 \text{ Ohm (warm)}$$

$$I^2 \cdot R = 44,8 \text{ Watt (dauernd).}$$

Aus Gl. 18 wird:

$$F = 2 \pi \cdot 18,37 \cdot 3,79 + 22,16 \cdot \pi \cdot 6,56 = 893 \text{ cm}^2; \text{ die spezifische Kühlfläche ergibt sich also zu } a = 19,96 \text{ cm}^2/\text{W (statt 20).}$$

Für das Kupfergewicht findet man:

$$G_K = w \cdot D \cdot \pi \cdot q \cdot s = 7550 \text{ g.}$$

Aus Gl. 48 ergibt sich $N = 110,5$ (vgl. Tab. V), so dass man für das Kupfergewicht (Gl. 24) den Wert $G_K = 7540$ g erhält (Rechenschieber!).

Für die Zeitkonstante T findet man aus Gl. 60 den Wert $T = 3375 \text{ sec} = 56 \text{ m } 15 \text{ s}$. Zur Kontrolle kann man Gl. 61 benutzen, die mit dem schon berechneten Werte $P = 11,47$ ebenfalls $T = 3375$ ergibt.

Aus Gl. 58 erhält man für $\tau_K = \tau_{\max}$ und für die Kurzschlusszeit $t_K = 10 \text{ sec}$ das Stromüberlastungsverhältnis

$$\frac{I_K}{I} = \sqrt{\frac{T}{t_K}} = \sqrt{337,5} = 18,37$$

Für andere Zeiten t_K lässt sich $\frac{I_K}{I}$ leicht berechnen.

Aus dem Beispiele erkennt man, dass der neue Berechnungsweg in kurzer Zeit *unmittelbar* zum Ziele führt und dass die entwickelten Näherungsformeln die Berechnung sehr erleichtern, ja sogar eigentlich erst ermöglichen. Endlich wird durch den neuen Berechnungsweg an mehreren Stellen eine Kontrolle der Rechnung möglich, wodurch die Berechnung an Sicherheit gewinnt.

Miscellanea.

Persönliches.

(Mitteilungen aus Mitgliederkreisen sind stets erwünscht.)

Elektrizitätswerk Winterthur. Als Nachfolger des auf Ende April d. J. zurücktretenden Herrn Direktor J. Leemann wählte der Stadtrat am 17. März Herrn *Walter Howald*, dipl. Ing., von Burgdorf, bisher Ingenieur der Bernischen Kraftwerke A.-G. in Bern.

Kleine Mitteilungen.

50 Jahre Elektrotechnischer Verein in Wien. Am 5. April d. J. feiert der Elektrotechnische Verein in Wien, Theobaldgasse 12, die Vollendung des 50. Jahres seines Bestehens mit folgendem Programm: 1. Begrüssung; 2. Ansprachen; 3. Festvortrag des Herrn Prof. E. F. Petritsch der Technischen Hochschule in Wien über «Die elektrische Welle». Die E. u. M. wird bei diesem Anlass als Vereinsorgan eine Festnummer herausgeben.

Wir gratulieren dem Elektrotechnischen Verein in Wien herzlich zu diesem Jubiläum.

Rapports du Congrès de Paris de l'UIPD. Les rapports du Congrès de Paris de l'Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'énergie électrique (8 au 12 juillet 1932), cités au Bulletin de l'ASE 1932, No. 15, page 389, ont paru en deux volumes de 420 et 860 pages. Le prix de ces deux volumes, qui ne peuvent être vendus séparément, est de 175 francs français, augmenté des frais d'envoi. Les demandes devront être envoyées immédiatement à l'Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'énergie électrique, 26, rue de la Baume, Paris 8^e.

Elektrowärmeausstellung Essen 1933 (1. Juli bis 13. August). Um allen Interessenten einen geschlossenen Ueberblick über die modernsten Elektrowärmegeräte sowie über die Anwendung der Elektrowärme auf allen Gebieten des Haushalts, des Gewerbes und der Industrie zu geben, wird im kommenden Sommer in der Zeit vom 1. Juli bis 13. August in Essen eine grosse Elektrowärmeausstellung veranstaltet. In besonderen Gruppen wird die Anwendung der Elektrowärme im Haushalt, für das Kochen, Heizen und Backen, sowie im Gastwirts- und Nahrungsmittelgewerbe anhand von praktischen Vorführungen erläutert. Weiter wird gezeigt, wie die Elektrowärme in der Industrie zum Verhütten, Schmelzen, Glühen und Härten von Eisen und Metallen technisch und wirtschaftlich nutzbar gemacht werden

kann. Ebenso bringt die Ausstellung einen Ueberblick über die Anwendung der Elektrowärme in der chemischen und keramischen Industrie, sowie in der Papier- und Textilfabrikation. Besonderes Interesse wird die Verwendung von Elektrowärme in der Landwirtschaft und im Gartenbau (Bodenbeheizung, Futterbereitung usw.) sowie in der Heilkunde (Elektromedizin) finden. Um auch den Nichtfachleuten die Bedeutung der elektrischen Wärme im Haushalt, im Gewerbe und in der Industrie verständlich zu machen, wird die Ausstellung den Charakter einer Lehrschau tragen und mit wissenschaftlichen, wirtschaftlichen und historischen Abteilungen verbunden sein. Eine besondere Gruppe umfasst auch die Schweissttechnik, die heute als Widerstandsschweissung, Lichtbogenschweissung und kombinierte gaselektrische Schweissung im Hoch- und Tiefbau sowie im Brückenbau und Schiffbau eine wichtige Rolle spielt.

Das Justiz-Ministerium hat der Ausstellung den Erfindungsschutz laut Bekanntmachung im Reichsgesetzblatt vom 23. Februar 1933 gewährt.

Nähere Auskunft erteilt der *Verein Elektrowärme-Ausstellung e. V., Essen, Postfach 346.*

Freizeitkurs für Ingenieure. Das Betriebswissenschaftliche Institut veranstaltet Samstag, den 1. April 1933, im Auditorium IV der Eidg. Techn. Hochschule einen Einzelkurs mit folgenden Referaten:

9—11 Uhr: Die wirtschaftliche Bedeutung der Gewerbehgiene (mit Führungen). Referent: Fabrikinspektor Dr. *W. Sulzer*, Zürich.

11—12 Uhr: Praktische Valutapolitik.

Referent: Dir. *P. Ostertag*, Zürich.

An den Vortrag von Dr. Sulzer soll sich nachmittags eine Führung durch die gewerbehgienische Sammlung des Eidgenössischen Fabrikinspektorates in Zürich anschliessen. Teilnehmerkarten zu 1 Fr. an der Tageskasse.

Einblicke in neuere Aufgaben der Lichttechnik. Ueber dieses Thema sprach am 3. März d. J. Prof. *R. Spieser* im Technischen Verein in Winterthur. Der Referent streifte die meisten Probleme der modernen Licht- und Beleuchtungstechnik und ging besonders auf die objektive Lichtmessung, die arbeitstechnischen Untersuchungen (Beispiel: Beleuchtung des Webstuhles), Strassen- und Luftverkehrsbeleuchtung und auf die Lichtarchitektur ein. Er wusste die umfassenden mündlichen Ausführungen durch sorgfältig ausgewählte Lichtbilder und eine Reihe von interessanten Demonstrationsobjekten, unter anderen diverse Photometer, Natriumdampfampe, Linestraröhre, zu illustrieren.

Wirtschaftliche Mitteilungen. — Communications de nature économique.

Aus den Geschäftsberichten bedeutenderer schweizerischer Elektrizitätswerke.

Elektrizitätswerk Wangen a. A., pro 1932.

Dieses von den Bernischen Kraftwerken (BKW) gepachtete Werk konnte im abgelaufenen Jahre 57 129 000 kWh erzeugen, bei einer Höchstleistung von 7700 kW.

Der von den BKW bezahlte Pachtzins betrug . . . 1 237 500
Die Einnahmen aus Aktivzinsen, plus Salvovortrag, betrugen . . . 30 213

Die Ausgaben setzten sich wie folgt zusammen:

Obligationenzinsen	99 675
Steuern und Abgaben	126 171
Abschreibungen und Zuweisung an den Reserve- und den Kapitaltilgungsfonds	465 906
Dividende von 5½ % an das einbezahlte Aktienkapital	495 000

Das Aktienkapital beträgt 10 Millionen, wovon 1 Million nicht einbezahlt ist. Das Obligationenkapital beträgt noch 2,215 Millionen. Die Gesamtanlagen, inklusive Zähler und Werkzeuge, stehen mit 14,73 Millionen zu Buche.