

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 8 (1917)
Heft: 5

Artikel: Beitrag zu der Bestimmung von zusätzlichen Kupferverlusten in Wechselstrommaschinen
Autor: Rikli, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059584>

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: 03.04.2026

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich mit den Jahres-Beilagen „Statistik der Starkstromanlagen der Schweiz“ sowie „Jahresheft“ und wird unter Mitwirkung einer vom Vorstand des S. E. V. ernannten Redaktionskommission herausgegeben.

Alle den Inhalt des „Bulletin“ betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat
des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins,
Neumühlequai 12, Zürich 1 - Telephon 9571

Alle Zuschriften betreffend Abonnement, Expedition und Inserate sind zu richten an den Verlag:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.,
Hirschengraben 80/82 Zürich 1 - Telephon 6741

Publié sous la direction d'une Commission de Rédaction nommée par le Comité de l'A.S.E.

Ce bulletin paraît mensuellement et comporte comme annexes annuelles la „Statistique des installations électriques à fort courant de la Suisse“, ainsi que l'„Annuaire“.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la matière du „Bulletin“ au

Secrétariat général
de l'Association Suisse des Electriciens
Neumühlequai 12, Zurich 1 - Téléphone 9571

Toutes les correspondances concernant les abonnements, l'expédition et les annonces, doivent être adressées à l'éditeur:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Hirschengraben 80/82 Zurich 1 - Téléphone 6741

Abonnementspreis
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft und Statistik:
Schweiz Fr. 15.—, Ausland Fr. 25.—.
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 1.50 plus Porto.

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A. S. E.), y compris l'Annuaire et la Statistique, Fr. 15.— pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 1.50, port en plus.

VIII. Jahrgang
VIII^e Année

Bulletin No. 5

Mai 1917
Mai

Beitrag zu der Bestimmung von zusätzlichen Kupferverlusten in Wechselstrommaschinen.

Von *H. Rikli*, Ingenieur, Zürich.

Bekanntlich treten in Wechselstrommaschinen bei Belastung Verluste durch Stromwärme auf, die oft um ein Beträchtliches höher sind, als dem Produkt $J^2 \cdot R$, den ohmschen Verlusten, entspricht. Der Mehrbetrag dieser Verluste gegenüber $J^2 \cdot R$ umfasst die sogenannten „Zusätzlichen Kupferverluste“, sie haben ihre Ursache in dem oscillierenden Felde, welches durch den Belastungsstrom im induzierten Teile hervorgerufen wird, und diesen letzteren und auch zum Teil den Rotor, den induzierenden Teil, durchsetzt. Dadurch entstehen in allen von jenem Felde, dem sog. Statorstrefelfe, durchsetzten metallischen Teilen Wirbelströme, die je nach Dimensionen und Leitungsfähigkeit dieser Teile, und je nach örtlicher Stärke jenes Feldes erhebliche Verluste bewirken können. Ein Teil dieser zusätzlichen Verluste ist der rechnerischen Bestimmung nicht zugänglich, nämlich die Verluste in allen massiven Konstruktionsteilen der Maschine, da es vor Allem nicht möglich ist für alle Teile die örtliche Stärke des Statorfeldes zu bestimmen. Dagegen ist für diejenigen Stellen, wo dieses Feld am stärksten ausgeprägt ist, und wo also auch die relativ grössten zusätzlichen Verluste auftreten, nämlich für die Wicklungsteile in den Statornuten, eine Bestimmung der auftretenden zusätzlichen Verluste sehr wohl möglich. Ueber die Bestimmung dieser Verluste sind schon eine ganze Reihe von Artikeln in verschiedenen Zeitschriften erschienen. Ich erwähne hier nur den Aufsatz von W. Rogowski: „Ueber zusätzliche Kupferverluste, über kritische Kupferhöhen einer Nut und über das kritische Widerstandsverhältnis einer Wechselstrommaschine“, erschienen im Archiv für Elektrotechnik 1913, Band II, Heft 3.

Dieser Aufsatz gibt in überaus klarer anschaulicher Weise ein Bild über die Verhältnisse, welche die zusätzlichen Kupferverluste in der Nut einer Wechselstrommaschine

bedingen, und gibt zugleich an Hand einfacher Berechnungsformeln und einiger Kurven- tafeln die Möglichkeit diese Verluste für alle vorkommenden Fälle zu berechnen.

Ferner hat in der letzten Nummer des „Bulletin“ Herr Prof. Fischer-Hinnen es unter- nommen, die der Rogowski'schen Arbeit zu Grunde gelegten Formeln von Field abzuleiten.

In der Erkenntnis der Gefährlichkeit grosser massiver Stabquerschnitte für das Auf- treten hoher Zusatzverluste durch Stromwärme verwendet die Maschinenfabrik Oerlikon schon seit Jahren für grössere Querschnitte von Statorleitern verseilte in Stabform gepresste Kabel. Durch den oben erwähnten Aufsatz von Rogowski wurde ich veranlasst diesem Gegenstand vermehrte Aufmerksamkeit zu schenken. Insonderheit war es mir darum zu tun, die Nützlichkeit der verwendeten Kabelstäbe zu untersuchen und gleichzeitig die Richtigkeit der von Rogowski angegebenen Formeln experimentell nachzuprüfen. Ich habe im Laufe der Zeit in der Maschinenfabrik Oerlikon diese Versuche an verschiedenen Maschinen durchgeführt und zwar nur für den Fall von 1 Stab pro Nut und will hier einige dieser Versuchsergebnisse mitteilen.

Die Messung der Wattverluste wurde an einzelnen Stäben direkt ausgeführt, dabei konnte dieselbe natürlich nicht mit einem Wattmeter vorgenommen werden, da die an den Stäben bei Belastung auftretende Spannung viel zu niedrig war um eine namhafte Ablesung an einem gebräuchlichen Wattmeter zu erhalten. Es wurden deshalb auf oszillo- graphischem Wege Strom- und Spannungskurven am Stab aufgenommen. Der Strom wurde zugleich durch ein Präzisionsinstrument direkt gemessen; die die Spannungskurve aufnehmende Schleife des Oszillographen wurde dann mit den gleichen Widerständen wie bei der Messung mit Gleichstrom geeicht, und daraus und aus der Kurvenform die effek- tive Wechselstromspannung am Stabe bestimmt; ferner konnte aus den Oszillogrammen die jeweilige Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung direkt abgelesen werden.

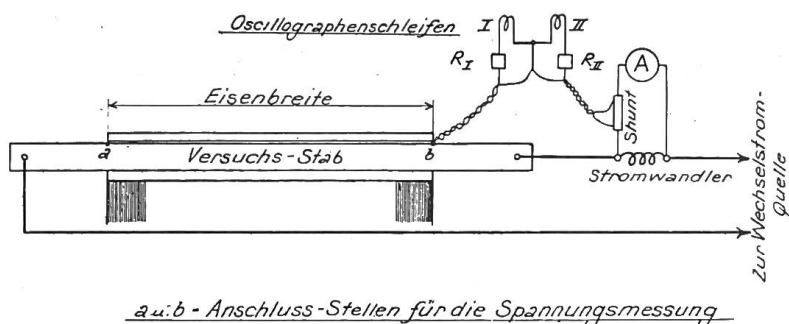


Fig. 1.

Die Versuchsanordnung, welche für alle Messungen die- selbe war, ist in Fig. 1 darge- stellt. Der Anschluss für die Spannungsmessung wurde an der der Bohrung zugekehrten Seite der Stäbe gemacht und der eine Messdraht dicht an der Oberfläche des Stabes bis zur andern Anschluss- stelle geführt, damit keine ausserhalb des Stabes verlaufenden Streu- linien auf die Messung einwirken konnten. Aus dem gleichen Grunde wurden die Zuleitungen zum Oszillographen von den Anschluss- stellen aus verdreht geführt.

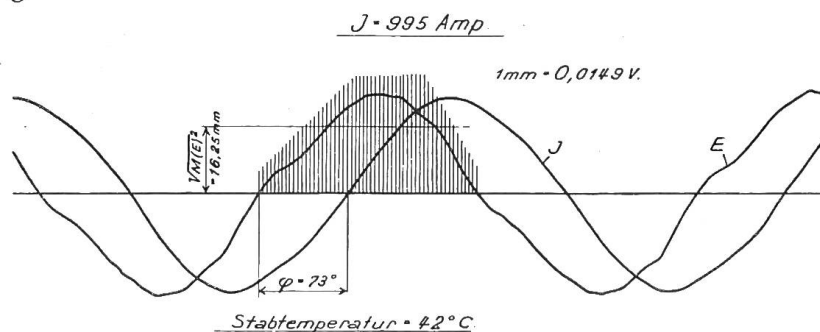
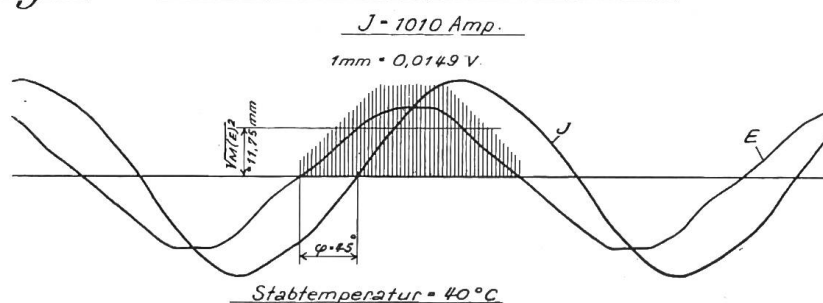
linien auf die Messung einwirken konnten. Aus dem gleichen Grunde wurden die Zuleitungen zum Oszillographen von den Anschluss- stellen aus verdreht geführt.

Der erste Versuch wurde durchgeführt an einem Nutenstab eines 2500 kVA-Dreh- strom-Turbo-Generators für 525 Volt, 3000 T der Maschinenfabrik Oerlikon. Die Nuten- stäbe dieser Maschine waren als verseilte gepresste Kabel von 13×36 mm Querschnitt hergestellt; der effektive Stabquerschnitt betrug 400 mm^2 . Als Vergleichsstab wurde ein massiver Kupferstab von ebenfalls $13 \times 36 \text{ mm} = 468 \text{ mm}^2$ Querschnitt untersucht. Bei den Versuchen lagen die beiden Stäbe in offenen Nuten von 21 mm Breite und 62 mm Tiefe eines Turbogenerators von 1000 mm Eisenbreite.

In Fig. 2 sind die Versuchsergebnisse, welche an dem **verseilten Leiter** erhalten wurden wiedergegeben. Die Auswertung derselben ergibt:

Phasenverschiebung zwischen E und J = 22 mm. Eine Halbperiode misst 54 mm, also ist:

$$\varphi = \frac{180}{54} \cdot 22 = 73^\circ, \text{ und } \cos \varphi = 0,293.$$

Fig. 2 Versuch mit verseiltem Cu-Leiter 13·36.Fig. 3 Versuch mit massivem Cu-Stab 13·36.Fig. 4 Eichlinie für Messungen am verseilten Leiter 13·36
massivem Stab 13·36:

Die Planimetrierung der Spannungskurve ergibt als Effektivwert der Spannung $= \sqrt{M(E)^2} = 16,25 \text{ mm}$. Die Eichung der Oszillographenschleife für diese Schaltung ergab nach Fig. 4 $1 \text{ mm} = 0,0149 \text{ Volt}$, also ist

$$E_{\text{eff.}} = 0,0149 \cdot 16,25 = 0,242 \text{ Volt.}$$

Ferner war Stromstärke $J = 995 \text{ Amp.}$ Dann wird der Wattverlust:

$$= 0,293 \cdot 0,242 \cdot 995 = 70,8 \text{ Watt.}$$

Die Stabtemperatur war hierbei 42° C.

Der Wattverlust für *Gleichstrom* bei gleicher Stabtemperatur ist:

$$= 995^2 \cdot 0,000051 = 50,5 \text{ Watt.}$$

Das Verlustverhältnis zwischen Wechselstrom von 50 Perioden und Gleichstrom war also:

$$K_{\text{w.g.}} = \frac{70,8}{50,5} = 1,40.$$

In Fig. 3 sind die Versuchsergebnisse, welche an dem **massivem Kupferstab** gleicher äusserer Dimensionen erreicht wurden, dargestellt.

Die Auswertung ergibt in analoger Weise wie oben:

$$\begin{aligned}\varphi &= 13,5 \text{ mm} = 45^\circ, \cos \varphi = 0,707 \\ E_{\text{eff.}} &= 11,75 \text{ mm} = 0,0149 \cdot 11,75 = 0,175 \text{ Volt.} \\ J &= 1010 \text{ Amp.}\end{aligned}$$

also ist der Wattverlust:

$$= 0,707 \cdot 0,175 \cdot 1010 = 125 \text{ Watt}$$

bei einer Stabtemperatur von 40° C .

Der entsprechende Wert für Gleichstrom war:

$$1010^2 \cdot 0,0000430 = 44 \text{ Watt}$$

daraus

$$K_{\text{w.g.}} = \frac{125}{44} = 2,84$$

Das Verlustverhältnis ist also reichlich doppelt so gross, wie bei einem gleich grossen verseilten Leiter, was die Verwendung letzterer Konstruktion vollauf rechtfertigt. Eine Nachrechnung des Verlustverhältnisses für den massiven Stab nach den Angaben von Rogowski ergibt folgendes:

In dem Aufsatz von Rogowski ist in der Gleichung

$$K_{\text{w.g.}} = \varphi (\alpha \cdot h)$$

der Koeffizient α gegeben durch die Beziehung:

$$\alpha = \sqrt{\frac{f}{50} \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{L}{50}}$$

darin ist:

f	=	Periodenzahl pro Sekunde, für obigen Fall	=	50				
b	=	Stabbreite in cm	"	"	"	=	1,3	cm
a	=	Nutenbreite in cm	"	"	"	=	2,1	cm
L	=	Leitfähigkeit	"	"	"	=	50	

daraus:

$$\alpha = 0,788$$

Ferner ist h die Stabhöhe in cm für obigen Fall = 3,6 cm also $\alpha \cdot h = 0,788 \cdot 3,6 = 2,84$ und aus der Kurve für $\varphi (\alpha \cdot h)$ entnehmen wir der Rogowskischen Arbeit

$$K_{\text{w.g.}} = \varphi (\alpha \cdot h) = 2,80$$

Was mit dem gemessenen Wert von 2,84 in sehr genauer Uebereinstimmung ist.

Weitere gleichartige Versuchsreihen wurden durchgeführt an dem Stator eines 15000 kVA. Drehstrom-Turbo-Generators für 7000 Volt 1500 Touren der Maschinenfabrik Oerlikon und zwar mit folgenden Stäben:

1. Verseiltes gepresstes Kabel aus Kupferdrähten von 10×58 mm Querschnitt.
2. Massiver Kupferstab von 9×60 mm Querschnitt.
3. " Aluminiumstab von 9×50 mm Querschnitt.
4. " " " 12×75 " "

Die Auswertung der Versuchsergebnisse, sowie die gerechneten Koeffizienten $K_{\text{w.g.}}$ für die massiven Stäbe sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Die Werte des ersten Versuches finden sich am Schlusse der Tabelle.

Gemessene und berechnete Werte des Koeffizienten $K_{w.g.}$ für verschiedene Stäbe und Querschnitte.

Nuten- dimensionen mm	Untersuchter Stab Querschnitt mm	Strom- stärke bei 50 Peri- oden A	Span- nung a. d. Stab- enden V	$\cos \varphi$	Watt- verlust bei Wechselstr. 50 Per. W	Stab- temp. beim Versuch C ⁰	Widerstand des untersuchten Stabes bei der Versuchtemp. Ω	Watt- verlust bei Gleich- strom W	Kw-g. beob- achtet	Kw-g. be- rechnet
17×80	Cu-Kabel 10×58	835	0,922	0,1478	114	28,6	0,0000962	67	1.70	—
17×80	„ 10×58	1013	1,125	0,1478	168	28,6	0,0000962	98,5	1.70	—
17×80	Cu-Stab 9×60	858	0,526	0,624	281	52,6	0,0000790	58	4.85	4.72
17×80	„ 9×60	1016	0,618	0,580	364	52,6	0,0000790	82	4.45	4.72
17×80	Alum.-Stab 9×50	728	0,546	0,675	268	60,0	0,0001647	87,5	3.06	2.99
17×80	„ 9×50	828	0,620	0,650	338	57,3	0,0001632	111,5	3.03	3.00
17×80	„ 12×75	800	0,490	0,687	269	43,5	0,0000802	51,3	5.25	5.28
17×80	„ 12×75	984	0,612	0,731	439	49,2	0,0000821	81,0	5.42	5.22
21×63	Cu-Kabel 13×36	995	0,242	0,293	70,8	42,0	0,0000510	50,5	1.40	—
21×63	Cu-Stab 13×36	1010	0,175	0,707	125	40,0	0,0000430	44,0	2.84	2.80

Es geht aus den Versuchen deutlich hervor, dass die Anwendung verseilter Leiter gegenüber massiven Stäben namentlich bei grossen Stabhöhen ganz enorme Vorteile bietet, nicht nur wegen des günstigen Einflusses auf den Wirkungsgrad, sondern speziell bei grossen raschlaufenden Generatoren mit sehr breitem Statoreisen z. B. Turbogeneratoren, wegen der bedeutend kleineren Wärmemengen, welche aus dem Innern der Maschinen nach aussen abgeführt werden müssen und der dadurch bedingten bedeutenden Herabsetzung der Maximaltemperatur. Das Verlustverhältnis kann sich bei ideal verseilten Leitern noch weit mehr der Einheit nähern, jedoch waren die verwendeten Kabelstäbe nach dieser Richtung nicht ganz einwandfrei, indem dieselben eine zu grosse Pressung aufwiesen, wodurch die Unterteilung des ganzen Querschnittes in viele Leiter von kleinem Querschnitt zum Teil wieder illusorisch gemacht wurde. Auch besass das Kabel 10×58 mm nicht die richtige Ganghöhe, da dieselbe nicht ohne Rest in der totalen Eisenbreite aufging, wodurch immer ein kleiner Betrag, der innere Ströme bildende Differenzspannung zwischen den einzelnen Leitern bestehen blieb.

Ferner zeigen die Versuche mit massiven Stäben für das Verlustverhältnis $K_{w.g.}$ eine sehr gute, ja man kann sagen eine absolute Uebereinstimmung mit den berechneten Werten; dies ist von um so grösserem Wert, als die Formeln in der Rogowskischen Arbeit sehr einfache Beziehungen darstellen, durch welche man mit einigen Rechenschieberstellungen bei Entwürfen sofort in der Lage ist das Verlustverhältnis zu bestimmen.