

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 10 (1919)
Heft: 11

Artikel: Berechnung der Stromverteilung in sterngeschalteten Drehstromwiderständen mit beliebigen Spannungen und Widerständen
Autor: Schälchlin, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061075>

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: 03.04.2025

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: Hottingen 37.08

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

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.,
Hirschengraben 80/82 Zürich 1 Telephon Hottingen 36.40

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 - Telephon: Hottingen 37.08

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 Hottingen 36.40

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.

X. Jahrgang
X^e Année

Bulletin No. 11

November 1919
Novembre 1919

Berechnung der Stromverteilung in sterngeschalteten Drehstromwiderständen mit beliebigen Spannungen und Widerständen.

Von W. Schälchlin, Aarau.

Die Berechnung der Ströme in einem System von sterngeschalteten Widerständen bietet demjenigen, der nicht viel mit solchen Rechnungen zu tun hat, oft bedeutende Schwierigkeiten, die noch erhöht werden, wenn die Spannungen der Phasen ungleich sind. Eine einfache Rechnungsmethode zur Bestimmung der Ströme auf Grund der Superposition dürfte deshalb vielen willkommen sein. Ich möchte hier noch erwähnen, dass ich die Anregung von Herrn Prof. E. Heusser habe, und ich will ihm an dieser Stelle meinen besten Dank aussprechen.

Superpositionsmethode. Mit folgendem sei kurz der Rechnungsgang zur Bestimmung der Stromverteilung bei sterngeschalteten induktionslosen Widerständen und Einphasen-Wechselstrom oder Gleichstrom angegeben.

Es sei ein System von Widerständen nach Fig. 1 gegeben mit den Potentialen V_1, V_2 und V_3 , die von verschiedener Grösse sein können, und, was die Richtung anbelangt, von der

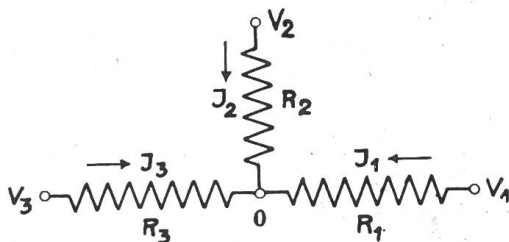


Fig. 1

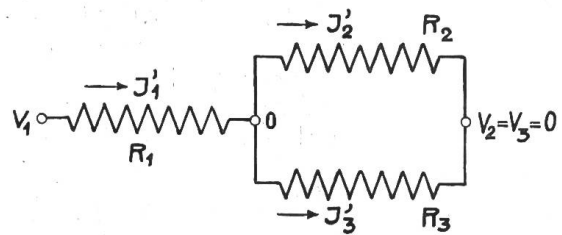


Fig. 2.

Phase 0° (positiv) oder 180° (negativ) sind. Wie bekannt bestimmt sich die Stromverteilung beispielsweise auf folgende Art:

Wir lassen der Reihe nach nur ein Potential wirken, währenddem wir zugleich die beiden andern gleich Null setzen, also:

- 1) $V_1 = V_1$ und $V_2 = V_3 = 0$
- 2) $V_2 = V_2$ und $V_1 = V_3 = 0$
- 3) $V_3 = V_3$ und $V_1 = V_2 = 0$

Es ergeben sich auf diese Weise drei verschiedene Stromkreise (siehe Fig. 2, 3 und 4), die gestatten, jeweilen die Ströme in einfacher Weise auszurechnen. Um die tatsächliche Stromverteilung zu erhalten, muss man die Teilströme sinnngemäss überlagern, und es ergeben sich damit die Ausgleichströme, die im System infolge der ungleichen Potentiale V_1 , V_2 und V_3 fließen.

1. Es sei nun $V_1 = V_1$ und $V_2 = V_3 = 0$

Damit in bezug auf die Richtungen der Ströme keine Irrtümer vorkommen, bezeichnen wir die Ströme, die auf den Nullpunkt 0 zufließen, als positiv, diejenigen, die von ihm wegfließen, als negativ.

Dann erhalten wir der Grösse und Richtung nach:

$$J'_1 = + \frac{V_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = + V_1 \frac{R_2 + R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \quad (a)$$

$$J'_2 = - J'_1 \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \cdot \frac{1}{R_2} = - V_1 \frac{R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

$$J'_3 = - J'_1 \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \cdot \frac{1}{R_3} = - V_1 \frac{R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

Bezeichnen wir den Nenner $R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3$ mit R_n^2 , so schreiben sich diese Formeln einfacher zu:

$$J'_1 = + V_1 \frac{R_2 + R_3}{R_n^2}$$

$$J'_2 = - V_1 \frac{R_3}{R_n^2}$$

$$J'_3 = - V_1 \frac{R_2}{R_n^2}$$

Die Richtung der Ströme ergibt sich bei Betrachtung der Fig. 2 ohne weiteres. Auf ähnliche Art und Weise erhalten wir die Ströme für die beiden anderen Fälle. Ist nämlich:

2. $V_2 = V_2$ und $V_1 = V_3 = 0$ so wird:

$$J''_2 = + \frac{V_2}{R_2 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}} = + V_2 \frac{R_1 + R_3}{R_n^2}$$

$$J''_1 = - J''_2 \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} \cdot \frac{1}{R_1} = - V_2 \frac{R_3}{R_n^2}$$

$$J''_3 = - J''_2 \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} \cdot \frac{1}{R_3} = - V_2 \frac{R_1}{R_n^2}$$

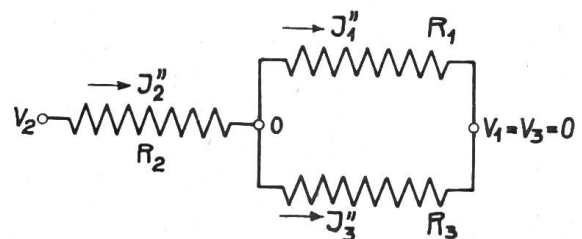


Fig. 3.

3. Ferner sei: $V_3 = V_3$ und $V_1 = V_2 = 0$

Dann wird:

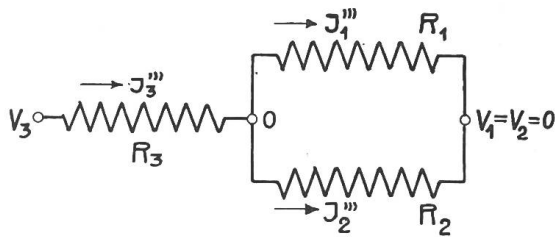


Fig. 4.

$$J_3''' = + \frac{V_3}{R_3 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}} = + V_3 \frac{R_1 + R_2}{R_n^2}$$

$$J_1''' = - J_3''' \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{R_1} = - V_3 \frac{R_2}{R_n^2}$$

$$J_2''' = - J_3''' \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{R_2} = - V_3 \frac{R_1}{R_n^2}$$

Addieren wir die so gefundenen Teilströme unter Berücksichtigung ihrer Stromrichtung, so erhalten wir die resultierenden Ströme J_1 , J_2 und J_3 , welche in nachfolgender Tabelle zusammengestellt sind:

Widerstände	Ströme
R_1	$J_1 = J_1' - (J_1'' + J_1''')$
R_2	$J_2 = J_2' - (J_2'' + J_2''')$
R_3	$J_3 = J_3' - (J_3'' + J_3''')$

Es liegt nun nahe, diese Methode der Bestimmung der Stromverteilung auch auf Drehstrom anzuwenden, wobei nur darauf Bedacht genommen werden muss, dass die Ströme der Phase nach richtig überlagert werden. Die folgende Methode gestattet, die Ueberlagerung der Ströme sehr übersichtlich und einfach vorzunehmen und setzt dabei keine komplizierten Rechnungen voraus.

Es sei ein Drehstromsystem gegeben mit den Spannungen $E_{1,2}$, $E_{2,3}$ und $E_{3,1}$, welche graphisch dargestellt ein geschlossenes Dreieck bilden müssen und an welche ein System von sterngeschalteten Widerständen R_1 , R_2 und R_3 angeschlossen sei. Die darin fließenden Ströme J_1 , J_2 und J_3 seien zu berechnen.

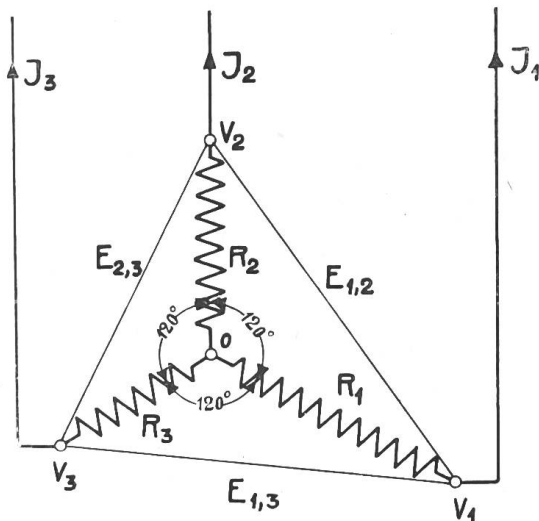


Fig. 5.

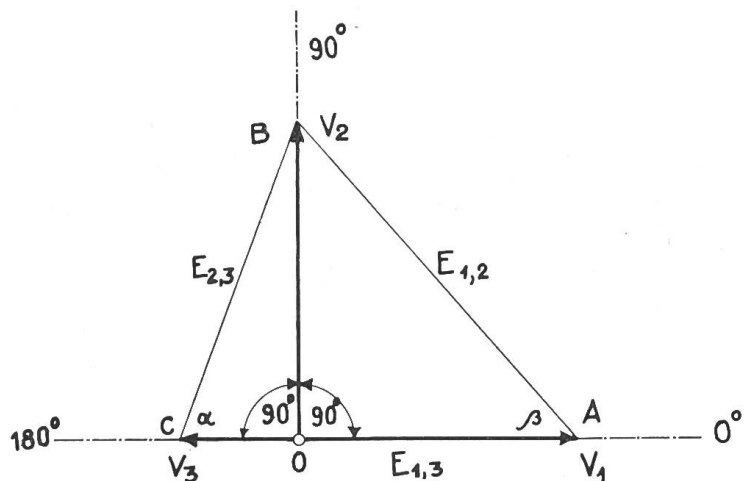


Fig. 6.

Die Spannungsdifferenzen $E_{1,2}$, $E_{2,3}$ und $E_{3,1}$, die zwischen je zwei Seiten bestehen, können wir uns durch drei Potentiale ungleicher Grösse entstanden denken, die eine Phasenverschiebung von 120° gegeneinander aufweisen. Es ist aber aus Fig. 5 leicht ersichtlich,

dass die Spannungen $E_{1,2}$, $E_{2,3}$ und $E_{3,1}$ gleich bleiben, wenn wir auch den Nullpunkt 0 beliebig verschieben; es ändern sich damit nur die Potentiale V_1 , V_2 und V_3 , und zwar der Grösse und Richtung nach. Damit nun die Rechnung sich möglichst einfach gestalte, verlegen wir den Nullpunkt 0 in eine der drei Dreieckseiten und erhalten damit drei Potentiale V_1 , V_2 und V_3 von der aus Fig. 6 ersichtlichen Grösse und Richtung, die um je 90° gegeneinander verschoben sind.

Geben wir dabei willkürlich dem Potential V_1 die Phase 0°
 so erhalten die Potentiale V_2 " " 90°
 und V_3 " " 180°

Zur Ermittlung des absoluten Wertes dieser Potentiale ist die Kenntnis der Winkel α und β des Dreiecks ABC nötig. Diese bestimmen sich mit Hilfe des Cosinus-Satzes zu

$$\cos \alpha = \frac{E_{2,3}^2 + E_{3,1}^2 - E_{1,2}^2}{2 E_{2,3} \cdot E_{3,1}}$$

$$\cos \beta = \frac{E_{1,2}^2 + E_{3,1}^2 - E_{2,3}^2}{2 E_{1,2} \cdot E_{3,1}}$$

Daraus ergeben sich, wie aus Fig. 6 ersichtlich, die Potentiale zu

$$V_1 = E_{1,2} \cos \beta = \frac{E_{1,2}^2 + E_{3,1}^2 - E_{2,3}^2}{2 E_{3,1}} \text{ von der Phase } 0^\circ$$

$$V_3 = E_{2,3} \cos \alpha = \frac{E_{2,3}^2 + E_{3,1}^2 - E_{1,2}^2}{2 \cdot E_{3,1}} \text{ " " " } 180^\circ = -0^\circ$$

$$V_2 = \sqrt{E_{2,3}^2 - V_3^2} \text{ " " " } 90^\circ .$$

Sind die Potentiale V_1 , V_2 und V_3 bekannt, so können wir ohne weiteres auf die für Gleichstrom entwickelten Formeln zurückgreifen; denn nun haben die Potentiale nicht mehr eine beliebige Richtung wie früher, sondern eine solche von 0° , 90° und 180° . Nehmen wir zugleich noch den einfachen Fall an, wo nur ohm'scher Widerstand vorhanden ist, so hat der Strom dieselbe Phase, wie die betreffende Spannung. Lassen wir, wie im vorhergehenden ausgeführt, der Reihe nach nur ein Potential wirken, so erhalten wir für jeden Widerstand

drei Ströme von den Phasen 0° , 90° und 180° , die geometrisch addiert werden müssen, um die entsprechenden Ströme J_1 , J_2 und J_3 zu erhalten sodass wir die durch die Widerstände fließenden Ströme wie folgt berechnen können

$$J_n = \sqrt{(J_n' - J_n''')^2 + J_n''^2}$$

dabei sind die Ströme J' von der Phase 0° angenommen worden die Ströme J'' und J''' haben dann Phasenverschiebungen von 90° bzw. 180° gegenüber J' .

Folgende Ueberlegung soll den Beweis für die Richtigkeit dieser Methode erbringen: An den Endpunkten eines Widerstandes R herrsche die Spannung E , welche entstanden sei durch irgend

zwei Potentiale V_1 und V_2 von beispielsweise in Fig. 7 eingezeichneter Grösse und Richtung. Der Einfachheit halber sei ein rein ohm'scher Widerstand angenommen, ferner möge R gleich 1 gesetzt werden, so dass die Vektoren der Spannungen und Ströme zusammenfallen. Wirken nun abwechselungsweise V_1 und V_2 , so entstehen die Teilströme J_1 und J_2 , die

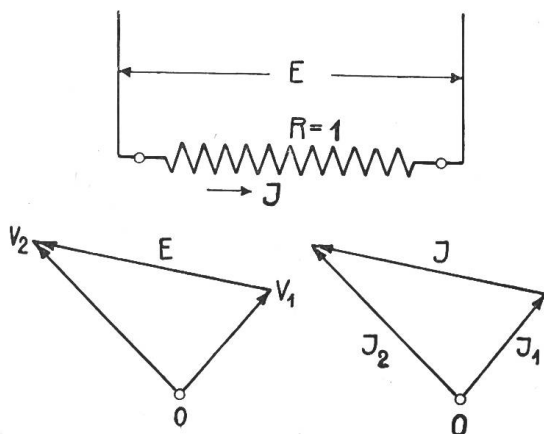


Fig. 7.

addiert, den Strom J ergeben. — Lässt man anderseits die ganze Spannung E wirken, so entsteht unter ihrem Einfluss der Strom J mit gleicher Richtung wie E , und welcher mit dem aus den beiden Stromkomponenten J_1 und J_2 erhaltenen Strom J zusammenfallen muss, da ja auch die Spannung E durch die Potentiale V_1 und V_2 entstanden ist.

Um über die Stromrichtung genau orientiert zu sein, bezeichnen wir diejenigen Ströme als positiv, die auf den Nullpunkt zufließen.

1. Wenn also $V_1 = V_1$ und $V_2 = V_3 = 0$ ist,

so ergeben sich nach früherem folgende Ströme:

$$J_1' = + V_1 \frac{R_2 + R_3}{R_n^2} \qquad J_2' = - V_1 \frac{R_3}{R_n^2} \qquad J_3' = - V_1 \frac{R_2}{R_n^2}$$

alle drei von der Phase 0° .

Da der Strom J_1' , wie aus Fig. 2 ersichtlich, auf den Nullpunkt 0 zufließt, so ist er nach voriger Annahme positiv, währenddem die Ströme J_2' und J_3' ein negatives Vorzeichen erhalten.

2. Setzen wir $V_2 = V_2$ und $V_1 = V_3 = 0$

so erhalten wir die Ströme der Phase 90° , deren Grösse sich ergibt zu:

$$J_2'' = + V_2 \frac{R_1 + R_3}{R_n^2} \qquad J_1'' = - V_2 \frac{R_3}{R_n^2} \qquad J_3'' = - V_2 \frac{R_1}{R_n^2}$$

alle drei von der Phase 90° .

3. Für $V_3 = V_3$ und $V_1 = V_2 = 0$

ermitteln wir die Teilströme von der Phase 180° zu

$$J_3''' = + V_3 \frac{R_1 + R_2}{R_n^2} \qquad J_1''' = - V_3 \frac{R_2}{R_n^2} \qquad J_2''' = - V_3 \frac{R_1}{R_n^2}$$

alle drei von der Phase 180° oder -0° .

Bezüglich der Vorzeichen gilt für den Fall 2 und 3 selbstverständlich das gleiche wie für Fall 1. Um eine bessere Uebersicht über die eben berechneten Teilströme zu gewinnen, seien sie in folgender Tabelle noch einmal zusammengestellt.

Phase	R_1	R_2	R_3
0°	$+ J_1' = + V_1 \frac{R_2 + R_3}{R_n^2}$	$- J_2' = - V_1 \frac{R_3}{R_n^2}$	$- J_3' = - V_1 \frac{R_2}{R_n^2}$
90°	$- J_1'' = - V_2 \frac{R_3}{R_n^2}$	$+ J_2'' = - V_2 \frac{R_1 + R_3}{R_n^2}$	$- J_3'' = - V_2 \frac{R_1}{R_n^2}$
180°	$- J_1''' = - V_3 \frac{R_2}{R_n^2}$	$- J_2''' = - V_3 \frac{R_1}{R_n^2}$	$+ J_3''' = - V_3 \frac{R_1 + R_2}{R_n^2}$

Ueberlagern wir diese Teilströme sinngemäss nach Grösse und Phase, so bekommen wir die bei gleichzeitigem Wirken aller drei Potentiale sich einstellende Stromverteilung nach den Formeln:

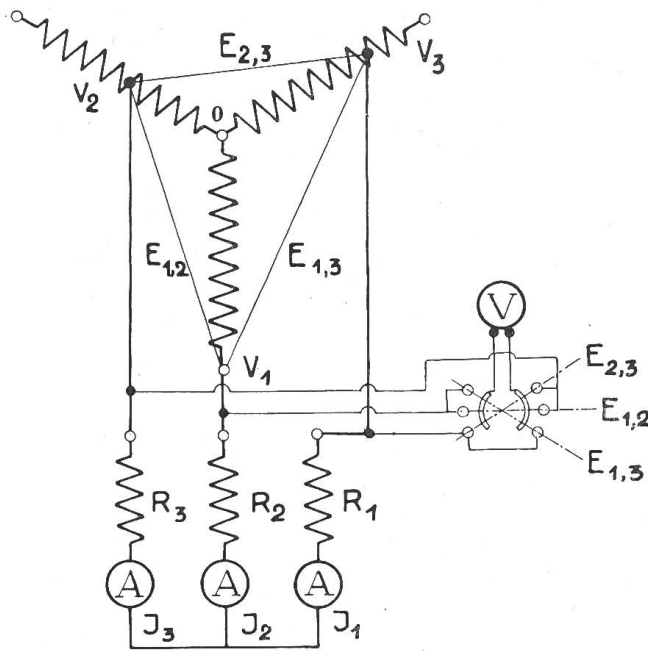


Fig. 8.

$$\begin{aligned}
 1) \quad J_1 &= \sqrt{(+J_1' - J_1'')^2 + (-J_1'')^2} \\
 2) \quad J_2 &= \sqrt{(-J_2' - J_2'')^2 + (+J_2'')^2} \\
 3) \quad J_3 &= \sqrt{(+J_3''' - J_3')^2 + (-J_3'')^2}
 \end{aligned}$$

Zur Erläuterung des hier gezeigten Rechnungsganges sei folgendes Zahlenbeispiel angeführt:

An einen Drehstromtransformator mit verschiedenen Abzapfungen ist ein sterngeschaltetes Widerstandssystem mit den

Widerständen $R_1 = 17,9 \Omega$,
 $R_2 = 12,1 \Omega$,
 $R_3 = 15,8 \Omega$

an die Spannungen $E_{1,2} = 58$ Volt,
 $E_{2,3} = 92$ Volt,
 $E_{3,1} = 71$ Volt

nach Fig. 8 angeschlossen worden, wobei

die Ströme $J_1 = 1,89$ Amp., $J_2 = 3,3$ Amp., $J_3 = 3,56$ Amp.

gemessen wurden. Es soll nun für diesen Versuch die Stromverteilung nachgerechnet werden.

Nach den obigen Ableitungen bestimmen sich die Potentiale zu:

$$V_1 = \frac{E_{1,2}^2 + E_{3,1}^2 - E_{2,3}^2}{2 E_{3,1}} = \frac{58^2 + 71^2 - 92^2}{2 \cdot 71} = \dots - 0,41 \text{ Volt (Phase } 0^\circ)$$

$$V_3 = \frac{E_{2,3}^2 + E_{3,1}^2 - E_{1,2}^2}{2 E_{3,1}} = \frac{92^2 + 71^2 - 58^2}{2 \cdot 71} = \dots + 71,4 \text{ Volt (Phase } 180^\circ)$$

$$V_2 = \sqrt{E_{2,3}^2 - V_3^2} = \sqrt{92^2 - 71,4^2} = \dots + 58 \text{ Volt (Phase } 90^\circ)$$

Das negative Vorzeichen des Potentials V_1 erklärt sich dadurch, dass der Nullpunkt ausserhalb des Spannungsdreiecks fällt, V_1 somit gleiche Richtung wie V_3 hat. (Vergl. Fig. 6 und 10.)

Diese Potentiale bewirken nun im Widerstandssystem folgende Teilströme:

$$\begin{aligned}
 J_1' &= + V_1 \frac{R_2 + R_3}{R_n^2} = - 0,41 \frac{12,1 + 15,8}{17,9 \cdot 12,1 + 17,9 \cdot 15,8 + 12,1 \cdot 15,8} = - 0,017 \text{ A} \\
 J_2' &= - V_1 \frac{R_3}{R_n^2} = + 0,41 \frac{15,8}{691} = + 0,01 \text{ A} \\
 J_3' &= - V_1 \frac{R_2}{R_n^2} = + 0,41 \frac{12,1}{691} = + 0,007 \text{ A}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} J_1' \\ J_2' \\ J_3' \end{aligned}} \right\} \text{Phase } 0^\circ$$

$$\begin{aligned}
 J_2'' &= + V_2 \frac{R_1 + R_2}{R_n^2} = 58 \frac{17,9 + 15,8}{691} = + 2,83 \text{ A} \\
 J_1'' &= - V_2 \frac{R_3}{R_n^2} = - 58 \frac{15,8}{691} = - 1,33 \text{ A} \\
 J_3'' &= - V_2 \frac{R_1}{R_n^2} = - 58 \frac{17,9}{691} = - 1,50 \text{ A}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} J_2'' \\ J_1'' \\ J_3'' \end{aligned}} \right\} \text{Phase } 90^\circ$$

$$\left. \begin{aligned} J_3''' &= + V_3 \frac{R_1 + R_2}{R_n^2} = + 71,4 \frac{17,9 + 12,1}{691} = + 3,10 \text{ A} \\ J_1''' &= - V_3 \frac{R_2}{R_n^2} = - 71,4 \frac{12,1}{691} = - 1,25 \text{ A} \\ J_2''' &= - V_3 \frac{R_1}{R_n^2} = - 71,4 \frac{17,9}{691} = - 1,85 \text{ A} \end{aligned} \right\} \text{Phase } 180^\circ$$

Phase	R_1	R_2	R_3
0°	$J_1' = - 0,017 \text{ A}$	$J_2' = + 0,01 \text{ A}$	$J_3' = + 0,007 \text{ A}$
90°	$J_1'' = - 1,33 \text{ A}$	$J_2'' = + 2,83 \text{ A}$	$J_3'' = - 1,50 \text{ A}$
180°	$J_1''' = - 1,25 \text{ A}$	$J_2''' = - 1,85 \text{ A}$	$J_3''' = + 3,10 \text{ A}$

Damit lassen sich nun die Ströme in den Widerständen bestimmen entweder graphisch nach Fig. 9 oder analytisch wie folgt:

$$J_1 = \sqrt{(+J_1' - J_1''')^2 + (-J_1'')^2} = \sqrt{(-0,017 + 1,25)^2 + 1,33^2} = 1,84 \text{ A}$$

$$J_2 = \sqrt{(-J_2' - J_2''')^2 + (+J_2'')^2} = \sqrt{(-0,01 - 1,85)^2 + 2,83^2} = 3,38 \text{ A}$$

$$J_3 = \sqrt{(+J_3''' - J_3')^2 + (-J_3'')^2} = \sqrt{(3,1 - 0,007)^2 + 1,85^2} = 3,61 \text{ A}$$

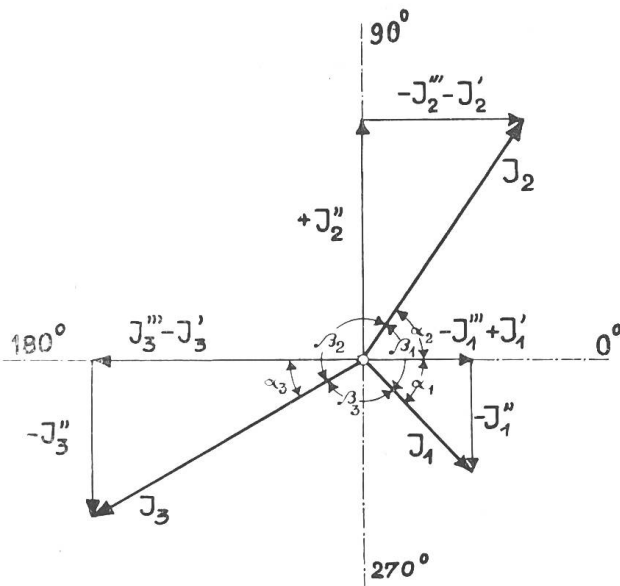


Fig. 9.

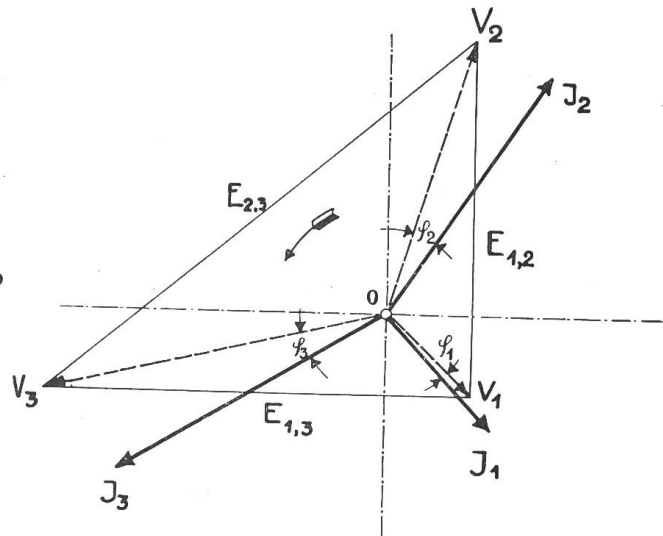


Fig. 10.

Die Phase der drei Ströme J_1 , J_2 und J_3 ergibt sich aus Fig. 9 wie folgt:

$$\text{tg } a_1 = \frac{1,33}{1,25 - 0,017} = 1,088 \quad a_1 = 47^\circ$$

$$\text{tg } a_2 = \frac{2,83}{1,85 + 0,01} = 1,52 \quad a_2 = 57^\circ$$

$$\text{tg } a_3 = \frac{1,5}{3,1 - 0,007} = 0,486 \quad a_3 = 26^\circ$$

Es stellen sich also zwischen den Strömen Phasenverschiebungen von

$$\beta_1 = 104^\circ ; \quad \beta_2 = 149^\circ ; \quad \beta_3 = 107^\circ \quad \text{ein.}$$

Betrachten wir nun die Phasenverschiebung zwischen Phasenspannung und Strom, wie sie am Transformator auftritt. Ich möchte mich in diesem Fall der bessern Uebersicht halber mit der graphischen Darstellung in Fig. 10 begnügen, in welcher die Spannungen und Ströme sowohl der Grösse als der Richtung nach massstäblich aufgezeichnet sind, so dass sich ein klares Bild über die Phasenverschiebung ergibt.

Wird ein Transformator in Sternschaltung symmetrisch mit ohm'schen Widerständen belastet, so sind der Strom J und die Phasenspannung V miteinander in Phase und seine Leistung schreibt sich zu:

$$P = 3 \cdot V \cdot J = 3 \cdot J^2 \cdot R \quad \text{Watt}$$

wobei R den Belastungswiderstand pro Phase bedeutet.

Bei unsymmetrischer Belastung tritt, trotzdem der Transformator nur auf ohm'schen Widerstand arbeitet, eine Phasenverschiebung φ_1, φ_2 bzw. φ_3 auf, die mit der Unsymmetrie der Belastung wächst, wobei der Transformator folgende Leistung abgibt:

$$P = V_1 J_1 \cos \varphi_1 + V_2 J_2 \cos \varphi_2 + V_3 J_3 \cos \varphi_3 = J_1^2 R_1 + J_2^2 R_2 + J_3^2 R_3 \quad \text{Watt. (Fig. 10.)}$$

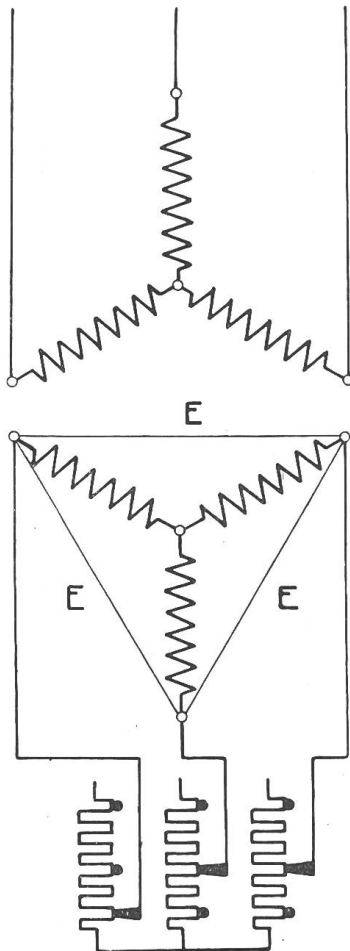


Fig. 11.

Nehmen wir der Einfachheit halber ein Uebersetzungsverhältnis $n = 1:1$ an, so nimmt der Transformator die nachstehende Leistung auf:

$$P_p = V_1 J_1 + V_2 J_2 + V_3 J_3 \quad \text{VA ,}$$

während er folgende Leistung abgibt:

$$P_s = V_1 J_1 \cos \varphi_1 + V_2 J_2 \cos \varphi_2 + V_3 J_3 \cos \varphi_3 \quad \text{Watt.}$$

Es ergibt sich also für den Transformator der nachstehende Leistungsfaktor:

$$\cos \varphi = \frac{V_1 J_1 \cos \varphi_1 + V_2 J_2 \cos \varphi_2 + V_3 J_3 \cos \varphi_3}{V_1 J_1 + V_2 J_2 + V_3 J_3}$$

der unter Umständen sehr klein sein kann.

Kehren wir von diesem kleinen Abstecker wieder zu unserm Thema zurück, so konstatieren wir kleine Differenzen zwischen den berechneten und den gemessenen Strömen:

	J_1	J_2	J_3
Strom berechnet in A	1,84	3,38	3,61
Strom gemessen in A	1,89	3,3	3,56
Fehler in %	+ 2,7	- 2,4	- 1,4

Diese kleinen Differenzen rühren hauptsächlich von der Ungenauigkeit der verwendeten Messinstrumente her (el. magn. System).

Haben wir bis jetzt den allgemeinen Fall mit nach Grösse und Richtung verschiedenen Spannungen behandelt, so sei hier im Anschluss daran noch kurz auf einige Spezialfälle hingewiesen.

Stehen zwei Spannungen z. B. $E_{1,2}$ und $E_{2,3}$ aufeinander senkrecht, so vereinfacht sich die Rechnung, indem wir dann den Nullpunkt 0 gerade in einen Eckpunkt des Spannungs-

dreieckes, z. B. nach V_2 verlegen können (siehe Fig. 6). Wir bekommen damit nur zwei Potentiale anstatt wie früher drei, und der Summenstrom berechnet sich zu:

$$J = \sqrt{J'^2 + J''^2}$$

Bezüglich der Richtung der Ströme gilt das nämliche wie das für den allgemeinen Fall gesagte.

Einen anderen Spezialfall, der übrigens wohl häufig auftritt, erhalten wir, wenn nur die Widerstände ungleich sind, zwischen den Drähten aber überall die gleiche Spannung herrscht. Dieser Fall tritt unter anderem bei Asynchron-Motoren ein, bei denen im Anlasser die Widerstände abwechselungsweise nur in einer Phase abgeschaltet werden, wie dies in Fig. 11 angedeutet ist, wobei nur der dritte Teil der sonst nötigen Kontakte gebraucht wird.

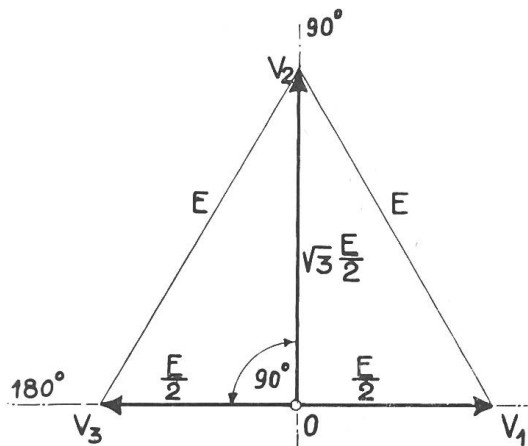


Fig. 12.

Bei der Bestimmung der Stromverteilung verfahren wir wieder wie früher, d. h. wir verlegen den Nullpunkt in eine der drei Dreieckseiten. Bei gleichen Spannungen E erhalten wir ein gleichzeitiges Spannungsdreieck, und die Potentiale V_1 , V_2 und V_3 bestimmen sich der Grösse und Richtung nach zu:

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \frac{E}{2} \text{ von der Phase } 0^\circ \\ V_2 &= \frac{\sqrt{3}}{2} E \text{ von der Phase } 90^\circ \\ V_3 &= \frac{E}{2} \text{ von der Phase } 180^\circ \end{aligned} \right\} \text{ siehe Fig. 12.}$$

Analog dem allgemeinen Fall lassen wir auch hier nur immer je ein Potential wirken. Es ergeben sich dann entsprechend den Fig. 2, 3 und 4 folgende Ströme:

$$\left. \begin{aligned} J_1' &= + V_1 \frac{R_2 + R_3}{R_n^2} = + \frac{E}{2} \frac{R_2 + R_3}{R_n^2} \\ J_2' &= - \frac{E}{2} \frac{R_3}{R_n^2} \\ J_3' &= - \frac{E}{2} \frac{R_2}{R_n^2} \end{aligned} \right\} \text{ von der Phase } 0^\circ$$

$$\left. \begin{aligned} J_2'' &= + V_2 \frac{R_1 + R_3}{R_n^2} = + \sqrt{3} \frac{E}{2} \frac{R_1 + R_3}{R_n^2} \\ J_1'' &= - \sqrt{3} \frac{E}{2} \frac{R_3}{R_n^2} \\ J_3'' &= - \sqrt{3} \frac{E}{2} \frac{R_1}{R_n^2} \end{aligned} \right\} \text{ von der Phase } 90^\circ$$

$$\left. \begin{aligned} J_3''' &= + V_3 \frac{R_1 + R_2}{R_n^2} = + \frac{E}{2} \frac{R_1 + R_2}{R_n^2} \\ J_1''' &= - \frac{E}{2} \frac{R_2}{R_n^2} \\ J_2''' &= - \frac{E}{2} \frac{R_1}{R_n^2} \end{aligned} \right\} \text{ von der Phase } 180^\circ$$

Durch sinngemässe Ueberlagerung dieser Teilströme erhalten wir die tatsächlichen Werte von J_1 , J_2 und J_3 (vergl. Fig. 9). Es ist nämlich:

$$J_1 = \sqrt{(+J_1' - J_1''')^2 + (-J_1'')^2} = E \frac{\sqrt{R_2^2 + R_2 R_3 + R_3^2}}{R_n^2}$$

$$J_2 = \sqrt{(-J_2' - J_2''')^2 + (+J_2'')^2} = E \frac{\sqrt{R_1^2 + R_1 R_3 + R_3^2}}{R_n^2}$$

$$J_3 = \sqrt{(+J_3''' - J_3')^2 + (-J_3'')^2} = E \frac{\sqrt{R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2}}{R_n^2}$$

Bezüglich der Phase gilt auch hier das für den allgemeinen Fall gesagte. — Auf dasselbe Resultat kommt man übrigens auch, wenn man die Potentiale V_1 , V_2 und V_3 um 120° verschoben wählt, was für den speziellen Fall für *gleiche Spannungen* ebenso einfach ist.

Miscellanea.

† **Dipl. Ing. E. Oppikofer, Direktor des Elektrizitätswerkes Basel.** „Media vita in morte sumus“. Wer von den Besuchern der Jahresversammlung des S. E. V. in Montreux hätte gedacht, dass Ingenieur Oppikofer, den wir dort als fröhlichen Teilnehmer und frischen Votanten wie immer begrüßen konnten, schon bald darnach nicht mehr unter uns sein werde! Kaum glauben konnten wir die am letzten Tage des Oktober eintreffende Nachricht, dass unser lieber Oppikofer soeben einem Schlage erlegen sei, mitten aus angestrenzter Arbeit heraus. Zwar sollen sich bei ihm seit einiger Zeit leichte Krankheitserscheinungen gezeigt haben, denen der arbeitsfreudige Mensch vielleicht zu wenig Beachtung schenkte, zu wenig mit Schonung begegnete, aber nichts liess ein so plötzliches Ende ahnen. Schöner Tod, aber zu früh, viel zu früh für den im besten Alter stehenden Mann, für seine Familie, für uns. Was alles war noch von diesem Manne zu erwarten! Emil Oppikofer wuchs als Sohn des damaligen Obertelegrapheninspektors der S. B. B. in Bern auf und besuchte die eidgen. technische Hochschule. Mit dem Diplom als Maschineningenieur in der speziellen Richtung der Elektrotechnik verliess er die Hochschule 1895, an der er durch seinen lebhaften Geist und sein hohes Interesse für allgemeine Dinge schon seinen Lehrern vorteilhaft auffiel. Bis 1898 machte er dann, von der Pike auf als Chefmonteur dienend und nachher als Konstrukteur seine praktische Schule bei der Compagnie de l'Industrie Electrique in Genf durch, nachdem er schon vor dem Studium in den Ateliers de Vevey praktisch gearbeitet hatte. Der Schreiber dieser Zeilen, als Bauleiter für die neuen Elektrizitätswerke der Stadt Bern und die Elektrifikation und den Ausbau der dortigen Strassenbahn, berief ihn dann als ersten Ingenieur in das Projektierungsbureau für diese Anlagen nach Bern. Durch seine Tüchtigkeit und Zuverlässigkeit als Ingenieur und seinen praktischen Wirklichkeitssinn bewältigte er diese Aufgabe, der er begeisterte Berufsfreude entgegenbrachte, mit Auszeichnung. Auch die Leitung der Bauten selbst für die Erstellung der ausgedehnten neuen

Drehstromversorgung von Bern, des Umformerwerks für den Tramstrom und der elektrischen Teile der neuen Strassenbahn selbst fiel ihm hier zu. Nach Vollendung der Bauten wählte ihn die Stadt Bern zum Direktor der neuen Elektrizitätswerke (und Wasserwerke) der Stadt Bern und sie tat mit dieser Wahl, trotzdem Oppikofer damals noch ein verhältnismässig recht junger Mann war, einen guten Griff. Das Elektrizitätswerk der Stadt nahm unter seiner Leitung bald eine bedeutende und vorteilhafte Entwicklung, dank dem organisatorischen Talent seines jungen Direktors. Ein grosses Dampfereservewerk wurde bald geschaffen und die Vorarbeiten für den Ausbau einer eigenen grösseren Wasserkraft in der Felsenau an die Hand genommen. Inzwischen sah sich die Stadt Basel veranlasst, für ihr Elektrizitätswerk, das durch das Hinzukommen des Werkes Augst starker Vergrösserung entgegensah, einen Elektro-Ingenieur als Direktor anzustellen, und es war bei dem Ruf, den Oppikofer bereits gewonnen, nicht zu verwundern, dass die Wahl auf ihn fiel. 1908 zog er mit seiner jungen Familie nach Basel, mit Eifer an seine grosse, neue Aufgabe herantretend. Die Gestaltung des elektromechanischen Teils des Werkes Augst, dessen technisch und wirtschaftlich richtige Verbindung mit den bestehenden Gleichstromanlagen in Basel und die bedeutende Ausdehnung der dortigen Verteilungsanlagen waren die nächsten, nicht einfachen Probleme, die Oppikofer mit weitem Blick löste. Rasch steigerte sich der Bedarf in Basel; es galt, behufs besserer Ausnutzung der Augster Kraft die kalorischen Anlagen grosszügig zu erweitern und unter schwierigen Verhältnissen die Akkumulierungs- und Umformer-Einrichtungen in der Stadt zu vergrössern. Sein weiter Blick, der überall über das Althergebrachte hinaussah und ihn stets mit den neuesten Fortschritten operieren liess, befähigten Direktor Oppikofer zu mustergültiger Lösung dieser Aufgaben. Sein starkes organisatorisches Talent, seine grosse wirtschaftliche Einsicht und sein in hohem Masse auf Beachtung allgemeiner Verhältnisse gerichteter Blick bewirkten aber auch, dass Basel in Bezug auf manigfaltigste, wirt-