

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 25 (1934)
Heft: 18

Artikel: Die Löschung des Erdschlusslichtbogens
Autor: Gastel, A. van
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060172>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.02.2026

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

des Anteils der Kochherde und Heisswasserspeicher ist natürlich ein Rückgang des Anteils der Beleuchtung verbunden. Es ist jedoch wenig wahrscheinlich, dass der dominierende Einfluss der Beleuchtung auf die Einnahmen der Werke in absehbarer Zeit verloren gehen wird, auch wenn die Verbreitung der thermischen Apparate weiter im

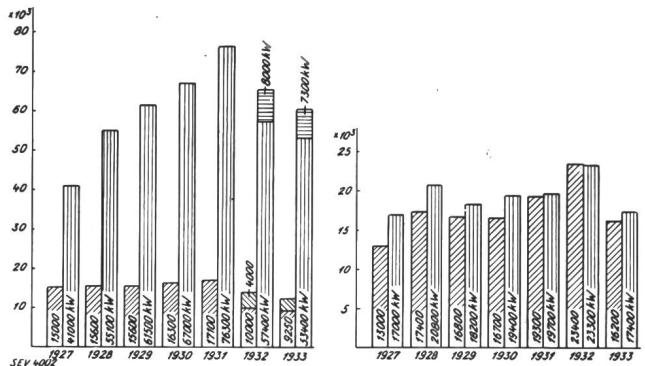


Fig. 1.

Zahl (links) und Anschlusswert (rechts) der von 1927
Kochherde und Réchauds
nur 1932 und 1933:

■ Réchauds allein.
■■ Kochherde und Brat-
öfen.

Fig. 2.

Heisswasserspeicher.
1927 bis 1933 verkauften
thermischen Kleinapparate.

klar, dass die Verkaufsziffer nicht ohne weiteres der Zunahme an angeschlossenen Apparaten gleichgesetzt werden kann. Ein Teil dieser Apparate werden als Ersatz für ausser Gebrauch gesetzte ältere oder zerstörte Geräte gekauft, so dass die Zahl der verkauften Apparate immer wesentlich höher ist als die von den Werken festgestellte Zunahme der angeschlossenen Apparate.

Anderseits können die jährlichen Verkaufszahlen interessante Hinweise auf die allgemeine Wirtschaftslage darstellen. Aus diesem Grunde haben wir für die Jahre 1927 bis 1933 die jährlichen Verkaufszahlen der 3 wichtigsten Apparategattungen — Kochherde, Heisswasserspeicher und übrige thermische Apparate — graphisch aufgetragen. Fig. 1 und 2, welche sich auf die Kochherde und Heisswasserspeicher beziehen, lassen den Einfluss der heutigen wirtschaftlichen Depression deutlich erkennen. Für die übrigen Apparate scheinen die Auswirkungen der Krise nicht so stark zu sein. Diese Erscheinung dürfte dem Umstand zuzuschreiben sein, dass die Industrie immer neue Apparate erfindet, welche neue Anwendungen hervorrufen und deren Absatz den Rückgang im Verkauf der bekannten Geräte einigermaßen zu decken vermag.

Zum Schluss möchten wir allen, die durch gewissenhaftes Ausfüllen der Fragebögen unsere Aufgabe erleichtert haben, unseren besten Dank aussprechen.

Die Löschung des Erdschlusslichtbogens.

Von A. van Gastel, Wettingen.

621.316.935

Mit dem Einbau von Löschspulen in Netzen mit isoliertem Nullpunkt wird in erster Linie die selbsttätige Löschung des Erdschlusslichtbogens bezweckt («kompensierte Netze»). Es zeigt sich, dass bei Löschung des Erdschlusslichtbogens in einem kompensierten Netz die Spannung der kranken Phase gegen Erde wesentlich langsamer zurückkehrt als in einem Netz mit vollständig isoliertem Nullpunkt, zudem bei guter Abstimmung der Löschspule nicht über den Wert der Phasenspannung hinausschwingt. Auch wird der Einfluss der Verstimmung der Löschspule auf die Aufbaugeschwindigkeit der Spannung gegen Erde bei verschiedener Netzdämpfung untersucht.

1. Allgemeines.

Der Erdschluss in einem Netz bewirkt ausschliesslich eine Änderung der Strom- und Spannungsverhältnisse gegen Erde; diejenige der einzelnen Phasen gegeneinander werden von dem

Le but principal des bobines d'extinction dans les réseaux à neutre isolé est d'éteindre automatiquement l'arc qui se produit lors d'une mise à la terre fortuite d'une des phases («réseaux compensés»). Il s'est avéré que, lors de l'extinction d'un arc à la terre dans un réseau compensé, la tension entre la phase atteinte et la terre se rétablit sensiblement plus lentement que lorsque le neutre est complètement isolé et, si la bobine d'extinction est judicieusement accordée, n'oscille pas au delà de la tension de phase. L'auteur étudie également l'influence du degré d'accordement de la bobine d'extinction sur la vitesse de rétablissement de la tension en fonction de l'amortissement du réseau.

Erdschluss überhaupt nicht beeinflusst. Deshalb werden für die nachstehenden Betrachtungen über die Löschung des Erdschlusslichtbogens in dreiphasigen Netzen der Einfachheit halber die folgenden Bezeichnungen festgelegt.

- a) Kapazität C : Die Teilkapazität einer Phase des gesamten Netzes gegen Erde.
- b) Ladestrom I_C : Der über die vorgenannte Kapazität fliessende Ladestrom.
- c) Isolationswiderstand R : Der Ohmsche Widerstand einer Phase des gesamten Netzes gegen Erde.
- d) Ableitungsstrom I_R : Der über den vorgenannten Widerstand fliessende Strom.
- e) Spannung U : Die Phasenspannung des Netzes.
- f) Spannung V : Die Spannung einer Phase gegen Erde.

Die Grössen für die einzelnen Phasen werden mit den Indices 1, 2 und 3 unterschieden; wenn sie sich auf den Nullpunkt beziehen, erhalten sie den Index 0. Schliesslich stellen kleine Buchstaben Augenblickswerte, grosse Buchstaben Maximalwerte dar.

2. Spannungen und Ladeströme im Normalbetrieb.

Im gesunden Betrieb bestimmen die Kapazitäten eines Netzes mit isoliertem Nullpunkt die Nullpunktspannung, und zwar so, dass über Erde kein Ladestrom fliessst. Wenn das Netz symmetrisch ist und dementsprechend die Kapazitäten C_1 , C_2 und C_3 gleich gross sind, hat der Netznulldpunkt das Potential 0; es ist in diesem Falle $V_0 = 0$. Die Spannungen V_1 , V_2 und V_3 und ebenso die diesen um 90° voreilenden Ladeströme I_{C1} , I_{C2} und I_{C3} bilden dreiphasig symmetrische Systeme (Fig. 1).

Ausser den Ladeströmen, welche als reine Blindströme zu betrachten sind, fliessen über die Isolationswiderstände des Netzes Ableitungsströme. In einem symmetrischen Netz, in dem $R_1 = R_2 = R_3$,

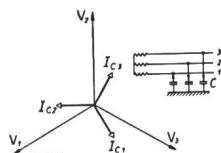


Fig. 1.
Ladeströme und
Spannungen in
Normalbetrieb.

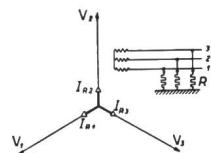


Fig. 2.
Ableitungsströme
und Spannungen in
Normalbetrieb.

bilden auch die Ableitungsströme ein symmetrisches System. Sie sind mit den Spannungen V_1 , V_2 und V_3 in Phase und deshalb als reine Wirkströme aufzufassen (Fig. 2).

3. Spannungen und Ladeströme bei Erdschluss.

Durch den Erdschluss wird die Kapazität einer Phase überbrückt oder kurzgeschlossen, wenn angenommen wird, dass an der Erdschlüsstelle keine Uebergangswiderstände auftreten. Folglich ändert sich die Spannungslage des Netzes gegen Erde. Die kranke Phase nimmt das Erdpotential an und die beiden gesunden Phasen erhöhen ihre Spannungen auf den Wert der verketteten Netzspannung. Wenn

mit U_1 die Phasenspannung der kranken Phase bezeichnet wird, bilden die Spannungen $V_1 = 0$, $V_2 = U_1 \sqrt{3}$ und $V_3 = U_1 \sqrt{3}$ ein unsymmetrisches Spannungssystem (Fig. 3).

Auch die Systeme der Lade- und der Ableitungsströme werden unsymmetrisch als Folge des Erdschlusses. Es bildet sich ein Summenstrom aus, der als Erdschlüsstrom seinen Weg über die Erdschlüsstelle und über die kranke Phase nimmt. Der Erdschlüsstrom I_e enthält die beiden Kompo-

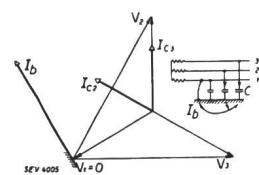


Fig. 3.
Ladeströme und
Spannungen bei
Erdschluss.

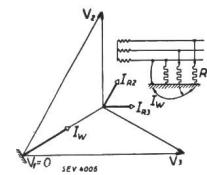


Fig. 4.
Ableitungsströme
und Spannungen bei
Erdschluss.

nenten, den Ladestrom und den Ableitungsstrom der beiden gesunden Phasen. Der Ladestrom eilt der Phasenspannung der kranken Phase um 90° vor, der Ableitungsstrom ist mit der genannten Spannung in Phase (Fig. 4).

Die Grösse der Blindkomponente ist von der Netzlänge, der Netzspannung, der Frequenz und von der Anordnung und den Abmessungen der Leiter abhängig. In Freileitungsnetzen kann im Mittel mit einem Erdschlüsstrom von 2 bis 3 A pro 10 kV Betriebsspannung und 100 km Netzlänge (Frequenz 50) gerechnet werden. In Kabelnetzen ist dieser Wert beträchtlich grösser, zudem sehr stark von der Konstruktion des Kabels abhängig. Für ein normales Drehstromkabel variiert der Erdschlüsstrom je nach Querschnitt zwischen 30 und 150 A, für H-Kabel zwischen 90 und 400 A, beide Werte bezogen auf 10 kV Betriebsspannung, 100 km Kabellänge und Frequenz 50.

Die Wirkkomponente ist durchwegs wesentlich kleiner als die Blindkomponente, auch dann, wenn berücksichtigt wird, dass zu den Ableitungsverlusten die Verluste der Ladeströme in den Leitungen, in den Transformatoren und im Erdungssystem (Erde, Erdseil, Erdplatten) gerechnet werden müssen. So ist in gut isolierten Freileitungsnetzen die Wirkkomponente meistens nicht grösser als etwa 10 % der Blindkomponente. Dagegen kann in weniger gut isolierten Netzen mit schlechten Erdungsverhältnissen und kleinen Leitungsquerschnitten die Wirkkomponente bis zu 40 % ansteigen. In Kabelnetzen sind die Verluste in der Kabelisolation sehr klein; hier aber entstehen Verluste im Bleimantel und zufolge der Unsymmetrie des Ladestromsystems auch in der Kabelarmierung, welche die Wirkkomponente vergrössern. Selbstverständlich spielt die Konstruktion des Kabels, zudem die Art der Verlegung eine wesentliche Rolle. In normalen Fällen beträgt die Wirkkomponente bis zu 5 % der Blindkomponente.

4. Die Kompensation des Erdschlüßstromes.

Um den Strom an der Erdschlüßstelle zu kompensieren, werden bekanntlich zwischen Netznulypunkt und Erde an einer oder an mehreren Stellen des Netzes Drosselspulen geschaltet. Auf diese Art ist bei Erdschluss neben dem kapazitiven Stromkreis noch ein induktiver Stromkreis vorhanden, in dem, unter Einfluss der Phasenspannung der kranken Phase, ein dieser Spannung um 90° nach-eilender Blindstrom erzeugt wird. Es ist also möglich, die kapazitive Blindkomponente des Erdschlüßstromes durch die induktive Komponente des Drosselspulenstromes aufzuheben. Dies bedingt eine entsprechende Bemessung der Drosselspulen-induktivität, d. h. die Abstimmung derselben auf die Netzkapazität.

Zufolge der Verluste in den Nullpunktsdrossel-spulen wird die Wirkkomponente des Erdschlüßstromes vergrössert. Die Verluste betragen im Mittel 1 bis 2 % der Spulenleistung, so dass die Vergrösserung keine grosse Rolle spielt.

Die Nullpunktsdrosselspulen haben nicht nur die Aufgabe, den Erdschlüßstrom an der Erdschlüßstelle herabzusetzen, sondern vielmehr den Zweck, den Erdschlüßlichtbogen zu löschen, weshalb sie allgemein unter dem Namen «Löschspulen» bekannt sind. Eben weil die meisten Erdschlüsse mit Ueberschlägen an den Isolatoren auftreten, zum mindesten anfangen, ist diese Aufgabe sehr wichtig. Eine rasche Löschung des Erdschlüßlichtbogens wird verhindern, dass der Lichtbogen sich sehr stark ausdehnt und eventuell auf die anderen, gesunden Phasen übergreift und so zu einem Kurzschluss führt. Auch kann der Erdschlüßlichtbogen, wenn er lange genug stehen bleibt, durch Abschmelzung von Leitermaterial einen Leiterbruch verursachen. Schliesslich ist die sofortige Löschung des Erdschlüßlichtbogens besonders wichtig, weil dadurch die Entstehung des aussetzenden Erdschlusses verhindert wird. Einen besseren Schutz gegen die Ueberspannungen und der Sprungwellenbeanspruchung (die Folge des aussetzenden Erdschlusses) als der Einbau von Löschspulen gibt es heutzutage noch nicht.

Aus den Betriebserfahrungen mit Löschspulen in einer grossen Anzahl von kompensierten Netzen ist bekannt, dass bei guter Abstimmung der Löschspuleninduktivität auf die Netzkapazität die Löschung des Erdschlüßlichtbogens sehr leicht vor sich geht. Die Verkleinerung des Erdschlüßstromes an und für sich trägt zweifellos viel dazu bei. Allein diese Tatsache genügt nicht, um die grosse Löschfähigkeit des Lichtbogens zu erklären; denn wenn in einem Netz mit isoliertem Nullpunkt die Löschgrenze z. B. bei 10 A liegt, so erlischt in einem Netz grösserer Ausdehnung nach Einbau von Löschspulen der Erdschlüßlichtbogen auch dann noch sehr leicht, wenn der Lichtbogenstrom z. B. 20 A beträgt, vorausgesetzt, dass die Löschspulen richtig abgestimmt sind. Es müssen also weitere Faktoren die Löschung des Erdschlüßlichtbogens in kompen-

sierten Netzen begünstigen. Diese zu bestimmen, ist der Zweck dieses Aufsatzes. Dazu wird zuerst der Löschvorgang in einem isolierten Netz betrachtet. Anschliessend werden die Löschverhältnisse in einem kompensierten Netz untersucht. Aus einem Vergleich der Resultate dieser Betrachtungen lassen sich die Unterschiede in der Löschung des Erdschlüßlichtbogens ermitteln und aus diesen kann dann auf die Ursache der Erleichterung der Lichtbogenlöschung bei Anwendung der Erdschlüsskom-pensation geschlossen werden.

Um die Betrachtungen möglichst einfach zu gestalten, seien folgende Annahmen getroffen:

- das Netz sei vollständig symmetrisch,
- die Spannung im Netz sei überall gleich,
- der Erdschlüßstrom enthalte keine Oberwellen,
- der Lichtbogenwiderstand wird vernachlässigt.

5. Der Löschvorgang im isolierten Netz.

Durch den Erdschluss wird die Spannung V_1 der kranken Phase gleich Null; diejenige der gesunden Phasen erhöht sich auf den Wert der verketteten Netzspannung $U_1\sqrt{3}$. Die Ladeströme dieser beiden Phasen, in der Grösse von $CU_1\sqrt{3}$, schlies- sen einen Winkel von 60° ein, so dass der resultie-rende Ladestrom, die Blindkomponente des Erd-schlüßstromes

$$I_b = I_c\sqrt{3} = 3\omega CU_1.$$

Ueber die Ableitungswiderstände der gesunden Phasen fliessen Ableitungsströme, die einen Winkel von 60° einschliessen und zusammen die Wirkkom-pONENTE des Erdschlüßstromes bilden

$$I_w = I_R\sqrt{3} = 3 \frac{U_1}{R}$$

Der gesamte Erdschlüßstrom hat die Grösse

$$I_e = \sqrt{I_b^2 + I_w^2}$$

Der Winkel α zwischen der Wirkkomponente I_w und dem Erdschlüßstrom I_e ist bestimmt durch (Fig. 5)

$$\sin \alpha = \frac{I_b}{I_e} \quad \cos \alpha = \frac{I_w}{I_e}$$

Es ist bekannt, dass die Unterbrechung eines Wechselstromes im Augenblick seines natürlichen Nulldurchganges stattfindet. Dementsprechend hat auch jeder Wechselstromlichtbogen im Augenblick,

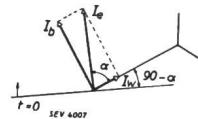


Fig. 5.

Blind- und Wirkkomponente des Erdschlüßstromes.

in dem der Lichtbogenstrom den Nullwert erreicht, die Tendenz zu löschen. Ob es zu einer wirklichen Löschung kommt, ist noch eine offene Frage. Je-denfalls hängt dies damit zusammen, wie gross in dem betrachteten Augenblick die Spannung an der Lichtbogenstrecke ist. Reicht sie aus zur Aufrech-

erhaltung des Lichtbogens, oder, anders gesagt, genügt sie, um den Lichtbogen von neuem zu zünden, so brennt der Bogen weiter. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, den zeitlichen Verlauf der Spannung an der Lichtbogenstrecke, vom Augenblick des Nulldurchgangs des Erdschlüßstromes an, zu verfolgen.

Zu diesem Zweck werden die Momentanwerte der Spannungen der drei Phasen bestimmt, und zwar in dem Augenblick, in dem der Lichtbogenstrom durch den Nullwert geht. Dieser Augenblick

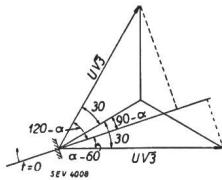


Fig. 6.

Augenblickswerte der Spannungen zur Zeit $t = 0$ in einem isolierten Netz.

wird mit $t = 0$ bezeichnet. Zur Zeit $t = 0$ ist also $i_e = 0$. Die Momentanwerte der Spannungen der gesunden Phasen sind (Fig. 6)

$$\text{Phase 2: } v_2 = -U_1 \sqrt{3} \cos (120 - \alpha)$$

$$\text{Phase 3: } v_3 = -U_1 \sqrt{3} \cos (\alpha - 60)$$

Die Phase mit dem Erdschluss hat beim Anfang der Löschung noch keine Spannung: $v_1 = 0$.

Die Ladungen an den Kapazitäten der drei Phasen entsprechen den vorstehenden Momentanwerten der Spannungen; sie sind

$$\text{Phase 1: } Cv_1 = 0$$

$$\text{Phase 2: } Cv_2 = -CU_1 \sqrt{3} \cos (120 - \alpha)$$

$$\text{Phase 3: } Cv_3 = -CU_1 \sqrt{3} \cos (\alpha - 60)$$

Die Gesamtladung des Netzes, also die Summe der Ladungen der drei Phasen, ist demnach

$$\begin{aligned} C(v_1 + v_2 + v_3) &= -CU_1 \sqrt{3} \{ \cos (120 - \alpha) + \cos (\alpha - 60) \} \\ &= -CU_1 \sqrt{3} \{ 2 \cos 30 \cos (90 - \alpha) \} \\ &= -3CU_1 \sin \alpha. \end{aligned}$$

Mit der Löschung des Erdschlusslichtbogens kehrt das Netz zum gesunden Betriebszustand zurück. Dieser ist gekennzeichnet durch ein symmetrisches Spannungssystem V_1, V_2, V_3 . Da die Summe dieser Spannungen in jedem Augenblick gleich Null ist, muss auch die Summe der Kapazitätsladungen der drei Phasen zu jeder Zeit gleich Null sein. Für das gesunde Netz gilt also

$$C(v_1 + v_2 + v_3) = 0.$$

Die Löschung des Erdschlusslichtbogens macht die Kapazitätsladung $-3CU_1 \sin \alpha$ frei. Es folgt nun ein Entladungsvorgang, bei dem die freie Ladung in den Ableitungswiderständen in Wärme umgewandelt wird. Diese Entladung geht natürlich nicht ganz plötzlich vor sich, sie beansprucht vielmehr eine gewisse Zeit. Der Entladestrom klingt allmählich bis auf Null ab; in der gleichen Zeit wird die freie Ladung in Wärme umgesetzt.

Es ist nicht schwierig, zu zeigen, dass alle drei Phasen des Netzes sich bei der Entladung ihrer Kapazitäten genau gleich verhalten, so dass entweder jede Phase für sich oder die drei Phasen zusammen als parallel geschaltet betrachtet werden können. Dazu genügt die Ueberlegung, dass die drei Phasen mitsamt dem Netznulnpunkt um den negativen Betrag der Phasenspannung U_1 der kranken Phase verschoben werden (Fig. 7). Weil die Spannungsverlagerung für alle drei Phasen die

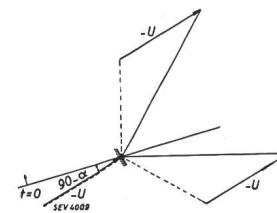


Fig. 7.

Spannungsverschiebung der drei Phasen durch den Erdschluss.

gleiche ist, entfällt von der freien Ladung $-3CU_1 \sin \alpha$ auf jede Phase der dritte Teil oder $-CU_1 \sin \alpha$.

Der Momentanwert der Spannungsverlagerung (Nullpunktsspannung) zur Zeit $t = 0$ ist

$$v_0 = -U_1 \sin \alpha.$$

Somit kann die totale freie Ladung auch geschrieben werden als

$$3Cv_0$$

oder diejenige einer einzigen Phase als

$$Cv_0.$$

Mit der Umwandlung der freien Ladung in Wärme klingt die Spannung v_0 , d. h. die Nullpunktsspannung bis auf den Wert Null ab. Ist dieser Wert erreicht, so befindet sich das Netz wieder im Betriebszustand.

Die Abklingung folgt in Form einer exponentiellen Funktion der Zeit $(e^{-\frac{t}{T}})$, so dass der Momentanwert der Nullpunktsspannung an jeder beliebigen Zeit t bestimmt werden kann aus

$$v_{0t} = v_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

In dieser Formel bedeutet e die Basis der natürlichen Logarithmen und T die Zeitkonstante des Abklingens. Für einen Stromkreis mit Widerstand R und Kapazität C ist

$$T = RC.$$

Aus

$$I_b = 3\omega CU_1 \text{ und } I_w = \frac{3U_1}{R}$$

folgt

$$T = \frac{1}{\omega} \frac{I_b}{I_w}$$

Die Spannung an der Erdschlüßstelle ist die Summe der abklingenden Nullpunktsspannung

$$v_{0t} = -U_1 e^{-\frac{t}{T}} \sin \alpha$$

und der Phasenspannung der kranken Phase

$$u_t = -U_1 \sin(\omega t - \alpha).$$

Die wiederkehrende Spannung ist somit:

$$v_t = -U_1 \{ \sin(\omega t - \alpha) + e^{\frac{-t}{T}} \sin \alpha \}$$

6. Der Löschvorgang im kompensierten Netz.

Der Löschvorgang in einem kompensierten Netz unterscheidet sich grundsätzlich von demjenigen des isolierten Netzes in einer Änderung der Zeit des Nulldurchgangs des Lichtbogenstromes. Die Blindkomponente des Erdgeschlußstromes wird zum größten Teil durch die induktive Komponente des Löschspulenstromes aufgehoben. Ausser dem nicht kompensierten Teil der Blindkomponente enthält der Reststrom an der Erdgeschlußstelle noch die Wirkkomponente des Erdgeschlußstromes, die im Vergleich mit derjenigen des isolierten Netzes grösser geworden ist, weil sie auch die Verluste der Löschspule zu decken hat.

Die Blindkomponente des Löschspulenstromes

$$I_L = I_b \left(1 + \frac{\varepsilon}{100} \right)$$

wenn mit ε die Verstimmung der Löschspuleninduktivität in Prozenten bezeichnet wird. Die Verstimmung kann positiv oder negativ sein, je nachdem das Netz über- oder unterkompensiert ist. Die Blindkomponente des Reststromes beträgt:

$$\begin{aligned} I_{rb} &= I_b - I_b \left(1 + \frac{\varepsilon}{100} \right) \\ &= -I_b \frac{\varepsilon}{100} \\ &= -3 \omega C U_1 \frac{\varepsilon}{100} \end{aligned}$$

Wenn der den Verlusten der Löschspule entsprechende Widerstand mit R_d bezeichnet wird, wird die Wirkkomponente I_w des isolierten Netzes um den Betrag $\frac{U_1}{R_d}$ erhöht, so dass die Wirkkomponente des Reststromes

$$\begin{aligned} I_{rw} &= I_w + \frac{U_1}{R_d} \\ &= U_1 \left(\frac{3}{R} + \frac{1}{R_d} \right) \end{aligned}$$

Die Stromverhältnisse des kompensierten Netzes sind in der Fig. 8 dargestellt. Der gesamte Reststrom hat die Grösse

$$I_r = \sqrt{(I_{rb})^2 + (I_{rw})^2}$$

Der Winkel β zwischen dem Wirkreststrom und dem totalen Reststrom ist bestimmt durch

$$\sin \beta = \frac{I_{rb}}{I_r} \quad \cos \beta = \frac{I_{rw}}{I_r}$$

Wenn der Reststrom durch den Nullwert geht, sind die Augenblickswerte der Spannungen der drei Phasen (Fig. 9)

für die kranke Phase 1: $v_1 = 0$

für die gesunde Phase 2: $v_2 = -U_1 \sqrt{3} \cos(60 - \beta)$

für die gesunde Phase 3: $v_3 = -U_1 \sqrt{3} \cos(120 - \beta)$

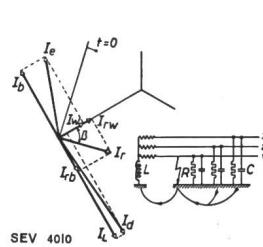


Fig. 8.
Blind- und Wirkkomponente
des Reststromes in einem
kompensierten Netz.

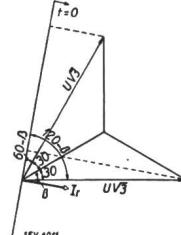


Fig. 9.
Augenblickswerte
der Spannungen
zur Zeit $t = 0$, in
einem kompensierten
Netz.

Die Kapazitätsladungen sind den vorstehenden Spannungen proportional, also:

für die kranke Phase 1: $Cv_1 = 0$

für die gesunde Phase 2:

$$Cv_2 = -CU_1 \sqrt{3} \cos(60 - \beta)$$

für die gesunde Phase 3:

$$Cv_3 = -CU_1 \sqrt{3} \cos(120 - \beta)$$

Die Gesamtladung der Kapazitäten im betrachteten Augenblick ($t = 0$) beträgt also

$$\begin{aligned} C(v_1 + v_2 + v_3) &= -CU_1 \sqrt{3} \{ \cos(60 - \beta) + \cos(120 - \beta) \} \\ &= -CU_1 \sqrt{3} \{ 2 \cos 30 \cos(90 - \beta) \} \\ &= -3 CU_1 \sin \beta \end{aligned}$$

oder wenn berücksichtigt wird, dass

$$\sin \beta = \frac{I_{rb}}{I_r}$$

ist die Gesamtladung zur Zeit $t = 0$ (Anfang der Löschung)

$$C(v_1 + v_2 + v_3) = -3 CU_1 \frac{I_{rb}}{I_r}$$

Im kompensierten Netz ist die kapazitive Ladung, welche durch die Löschung des Erdgeschlusslichtbogens frei wird, von der Grösse der Blindkomponente des Reststromes, d. h. von der Abstimmung der Löschspule, abhängig. Wenn die Verstimmung gleich Null ist (Resonanzabstimmung), ist $I_{rb} = 0$ und es wird durch die Löschung des Lichtbogens keine Kapazitätsladung freigemacht. Die Verteilung der Ladung auf die Phasen entspricht bereits beim Anfang der Löschung derjenigen des gesunden Betriebszustandes. Die freie Ladung wächst mit zunehmender Verstimmung der Löschspule, um für $\varepsilon = -100$ den Wert der freien Ladung des isolierten Netzes anzunehmen. Tatsächlich ist für $\varepsilon = -100$

$$I_{rb} = I_b \quad I_{rw} = I_w$$

und

$$\sin \beta = \frac{I_b}{I_e} = \sin \alpha$$

Nun genügt es aber nicht, für das kompensierte Netz nur die freie Kapazitätsladung zu betrachten, sondern es soll auch berücksichtigt werden, dass beim Anfang der Löschung, also zur Zeit $t = 0$, der Löschspulenstrom einen gewissen Wert hat. Ist dieser Momentanwert i_L , dann ist in der Spule eine elektromagnetische Energie

$$\frac{1}{2} L i_L^2$$

vorhanden. Diese Energie ist nach der Löschung des Erdschlusslichtbogens ebenfalls als freie Energie zu betrachten. Zwischen den freien kapazitiven und induktiven Energiemengen setzt eine Schwingung ein; die Energien pendeln im Schwingungskreis hin und her, sich in den Widerständen dieses Kreises allmählich in Wärme umwandelnd. Der Schwingungskreis (Fig. 10a) besteht aus den Kapazitäten und den Ableitungswiderständen der drei Phasen in Parallelschaltung, in Serie mit der Löschspulenimpedanz. Der Ersatzstromkreis (Fig. 10b) enthält die folgenden für die Schwingung charakteristischen Konstanten: L , $3C$ und R' . Dabei ist

$$R' = R_d + \frac{1}{3 R \omega^2 C^2}$$

Für einen Schwingungskreis mit Konstanten R , L und C gelten die folgenden Formeln für die Schwingungsfrequenz f_s und die Zeitkonstante des Abklingens T

$$f_s = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

$$T = \frac{2L}{R}$$

Auf den vorliegenden Fall angewendet sind

$$f_s = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{1}{3LC} - \left(\frac{R'}{2L}\right)^2}$$

$$T = \frac{2L}{R'}$$

Wie im isolierten Netz klingt auch im kompensierten Netz mit der Umwandlung der freien Ener-

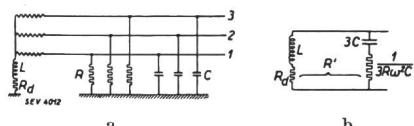
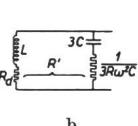


Fig. 10. Schwingungskreis für die überschüssige Energie.



Ersatzkreis für Fig. 10a.

giemengen in Wärme die Nullpunktsspannung ab. Zur Zeit $t = 0$ hat diese Spannung den Wert

$$v_0 = -U_1 \sin \beta$$

Ihre Frequenz ist die Schwingungsfrequenz f_s . Unter Berücksichtigung der aperiodischen Abklingung mit der Zeitkonstante T kann die Nullpunktsspannung geschrieben werden als

$$v_{0t} = -U_1 e^{\frac{-t}{T}} \sin(2\pi f_s t + \beta)$$

Die an der Erdschlußstelle unmittelbar in Anschluss an die Löschung des Lichtbogens wiederkehrende Spannung ist die Summe der Augenblickswerte von Nullpunktsspannung und Phasenspannung der kranken Phase. Es ist

$$v_t = -U_1 \{ \sin(\omega t + \beta) - e^{\frac{-t}{T}} \sin(2\pi f_s t + \beta) \}$$

7. Unterschiede in der Löschung.

Aus einer Betrachtung der beiden Formeln für den zeitlichen Verlauf der an der kranken Phase nach der Löschung des Erdschlusslichtbogens wiederkehrenden Spannung

$$v_t = -U_1 \{ \sin(\omega t - \alpha) + e^{\frac{-t}{T}} \sin \alpha \}$$

für das isolierte Netz und

$$v_t = -U_1 \{ \sin(\omega t + \beta) - e^{\frac{-t}{T}} \sin(2\pi f_s t + \beta) \}$$

für das kompensierte Netz kann der Unterschied in der Rückkehrgeschwindigkeit der wiederkehrenden Spannung bestimmt werden. Der Vergleich soll sich zuerst auf das isolierte Netz und das kompensierte Netz mit Resonanzspulen beziehen. Später wird dann noch der Einfluss der Verstimmung der Löschspulen zu untersuchen sein. Am besten lassen sich die Verhältnisse an einem *Beispiel* verfolgen.

Dem Beispiel werden folgende Zahlen zugrunde gelegt:

Frequenz 50 Per./s,

Ableitung 10 % (bezogen auf die Blindkomponente des Erdschlußstromes),

Verluste in der Löschspule 1,5 % (bezogen auf die Leistung der Spule),

Verstimmung der Löschspule 0 % (Resonanzabstimmung).

Mit diesen Unterlagen gilt für das *isolierte Netz*

$$\sin \alpha = 0,995$$

$$T = 0,0319 \text{ s.}$$

Nach der Zeit $3T$ beträgt die exponentiell abklingende Nullpunktsspannung $-U_1 e^{\frac{-t}{T}} \sin \alpha$ nur noch etwa 5 % ihres Anfangswertes, ist also praktisch vollständig abgeklungen. Im vorliegenden Fall braucht es hierzu $3 \cdot 0,0319 =$ ca. 0,1 s oder etwa 10 Halbperioden der Betriebsfrequenz. Die Nullpunktsspannung klingt also verhältnismäßig rasch ab. Trotzdem beträgt sie nach einer Halbperiode ($t = 0,01 \text{ s}$) immer noch etwa 73 % ihres ursprünglichen Wertes. In dieser Zeit kehrt die Phasenspannung der kranken Phase ihr Vorzeichen um, so dass die wiederkehrende Spannung nach einer Halbperiode ($0,01 \text{ s}$)

$$v_{0,01} = -U_1 \{ 0,995 + 0,73 \cdot 0,995 \} = 1,72 U_1$$

Der Verlauf der wiederkehrenden Spannung ist aus der Fig. 11 ersichtlich.

Für das *komensierte Netz* ist

$$\sin \beta = 0$$

$$R' = 0,115 \frac{1}{3 \omega C}$$

$$f_s = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\omega^2 - (0,0575 \omega)^2} \approx 50$$

$$T = 0,0554 \text{ s.}$$

Auffallend ist die Vergrößerung der Zeitkonstante für das Abklingen der Nullpunktsspannung im komensierten Netz, was durch die Parallelschaltung von Löschspuleninduktivität und Netzkapazität erklärt werden kann. Im vorliegenden Fall braucht es etwas über 16 Halbwellen der Betriebsfre-

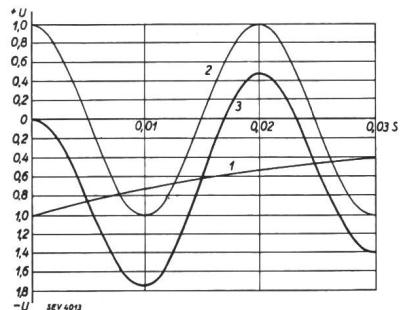


Fig. 11.

Verlauf der an der Erdschlußstelle wiederkehrenden Spannung in einem isolierten Netz.

quenz, bis die Nullpunktsspannung auf 5 % ihres Anfangswertes abgeklungen ist. Die wiederkehrende Spannung an der Erdschlußstelle, nach der Formel

$$v_t = -U_1 \left(\sin \omega t - e^{-\frac{t}{T}} \sin \omega t \right) \\ = -U_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \sin \omega t$$

ist eine sinusförmig veränderliche Spannung mit exponentiell ansteigender Amplitude. Nach einer Viertelperiode erreicht die wiederkehrende Spannung den Wert

$$v_{0,01} = -0,09 U_1$$

Der Verlauf der wiederkehrenden Spannung für die vorstehenden Verhältnisse geht aus der Fig. 12 hervor.

Aus dem Vergleich dieser beiden Beispiele — einmal ein Netz mit isoliertem Nullpunkt, das

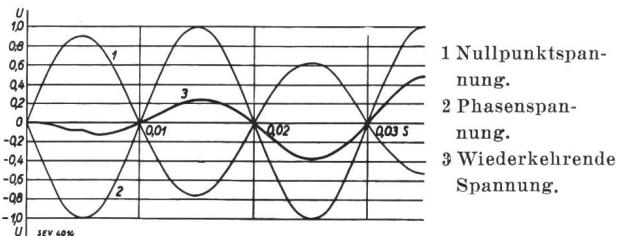


Fig. 12.

Verlauf der an der Erdschlußstelle wiederkehrenden Spannung in einem komensierten Netz. Resonanzabstimmung.

zweite Mal das gleiche Netz, nun aber mit Löschspulen in Resonanzabstimmung komensiert, lassen sich die folgenden Schlüsse ziehen:

a) die Spannung an der Erdschlußstelle erholt sich im komensierten Netz bedeutend langsamer als im isolierten Netz;

b) im komensierten Netz mit auf Resonanz abgestimmter Löschspule steigt die Spannung an der kranken Phase langsam auf den Wert der Phasenspannung des Netzes an; im isolierten Netz wird der Wert der Phasenspannung merklich überschritten.

Die sehr gute Löschfähigkeit des Erdschlusslichtbogens in einem komensierten Netz lässt sich auf Grund der soeben erwähnten Unterschiede in der Spannungsrückkehr erklären. Die Geschwindigkeit, mit welcher die Spannung an der Lichtbogenstrecke nach der Lösung rückkehrt, ist für die endgültige Lösung von entscheidender Bedeutung, denn nur die wiederkehrende Spannung kann eine neue Zündung des Lichtbogens bewirken. In dem Augenblick, in dem der Lichtbogenstrom durch den Nullwert geht, eigentlich auch schon kurz vorher, während der Zeit, in der der Lichtbogenstrom sich dem Nulldurchgang nähert, fängt die Lichtbogenstrecke an, sich zu verfestigen. Mit der Zunahme der Isolationsfestigkeit der Strecke nimmt auch deren Durchschlagsspannung zu. Es kommt jetzt darauf an, welche der beiden Spannungen, die Durch-

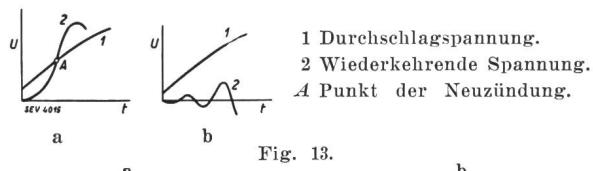


Fig. 13. Neuzündung des Lichtbogens. Lösung des Lichtbogens.

schlagsspannung oder die wiederkehrende Spannung, rascher ansteigt; ist es die Durchschlagsspannung, so bleibt eine Neuzündung aus und die Lösung hat endgültig stattgefunden; ist es dagegen die wiederkehrende Spannung, so kommt es zu einem neuen Durchschlag. In Fig. 13a tritt für das isolierte Netz im Punkt A eine neue Zündung des Erdschlusslichtbogens auf; in Fig. 13b, für das komensierte Netz, schneiden sich die Kurven für die wiederkehrende Spannung und für die Durchschlagsspannung nicht, so dass der Lichtbogen endgültig erlischt.

Die Bedingungen für die sofortige Lösung des Erdschlusslichtbogens sind für das komensierte Netz mit auf Resonanz abgestimmter Löschspule die denkbar günstigsten. Das langsame Anwachsen der Spannung an der kranken Phase gibt der Lichtbogenstrecke die Zeit zur genügenden Abkühlung und zur Erlangung ihrer ursprünglichen elektrischen Festigkeit. Da ferner die Spannung an der kranken Phase bei Resonanzkompenstation niemals den Wert der Phasenspannung des Netzes übersteigt, wird die Isolation an der Erdschlußstelle auch nach der Lösung möglichst wenig beansprucht.

8. Einfluss der Verstimmung der Löschspulen auf den Löschevorgang.

Die an der kranken Phase wiederkehrende Spannung v wurde bestimmt als

$$v_t = -U_1 \{ \sin(\omega t + \beta) - e^{\frac{-t}{T}} \sin(2\pi f_s t + \beta) \}$$

In dieser Formel ist

$$f_s = f \sqrt{1 + \frac{\varepsilon}{100}}$$

Wenn das Verhältnis zwischen Wirkkomponente und Blindkomponente des Erdschlußstromes mit p bezeichnet wird (p in Prozent) ist

$$T = \frac{100}{p} \frac{2}{\omega \left(1 + \frac{\varepsilon}{100}\right)}$$

Schliesslich ist

$$\sin \beta = \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2 + p^2}}$$

Auch hier lassen sich die Spannungsverhältnisse in Anschluss an die Lösung am besten an einem Beispiel verfolgen.

Dem Beispiel werden die nachstehenden Zahlen zugrunde gelegt:

Frequenz 50 Per./s,

Ableitung 10 %,

Verluste in der Löschspule 1,5 %,

Verstimmung der Löschspule + 10 %.

Mit diesen Zahlen ist

$$\sin \beta = 0,656$$

$$T = 0,05 \text{ s}$$

$$f_s = 52,4.$$

Der Verlauf der wiederkehrenden Spannung an der kranken Phase geht aus Fig. 14 hervor. Der Vergleich mit der Resonanzabstimmung zeigt, dass die Spannung etwas rascher zurückkehrt, als dies

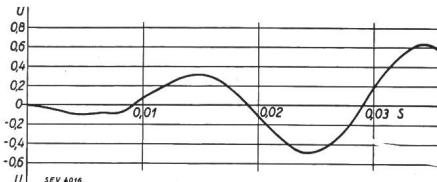


Fig. 14.

Verlauf der an der Erdschlußstelle wiederkehrenden Spannung in einem kompensierten Netz. Verstimmung + 10 %.

bei der Resonanzabstimmung der Fall war. In der ersten Halbwelle der Betriebsfrequenz erreicht die Spannung den Wert $0,13 U_1$, also etwa 45 % mehr, als wenn die Löschspule auf Resonanz abgestimmt wäre, aber nur etwa 7,5 % von der im isolierten Netz in der ersten Halbperiode auftretenden Spannung. Die Verstimmung der Spule macht sich in den weiteren Perioden immer mehr bemerkbar zu-

folge der Frequenzdifferenz der beiden Kurven $U_1 \sin \omega t$ und $U_1 e^{\frac{-t}{T}} \sin 2\pi f_s t$, durch die die Null-durchgänge immer mehr auseinander rücken. Sobald die Phasendifferenz der beiden Kurven um 180° beträgt, besitzen ihre Augenblickswerte die gleiche Richtung, so dass die wiederkehrende Spannung grösser wird als die Phasenspannung des Netzes. Im vorliegenden Fall beträgt der Frequenz-

unterschied 2,4 Per./s, so dass trotz der zehnprozentigen Verstimmung der Löschspule die wiederkehrende Spannung praktisch nicht über den Wert der Phasenspannung hinausschwingt.

Dagegen muss es einleuchten, dass bei grösserer Verstimmung die wiederkehrende Spannung mehr über den Wert U_1 hinausschwingt, und zwar um so mehr, je kleiner die Netzdämpfung, d. h.

je schwächer das Abklingen der Kurve $U_1 e^{\frac{-t}{T}} \sin 2\pi f_s t$ ist. Wenn z. B. die Verstimmung 50 %, die Netzdämpfung 10 % beträgt, erreicht die wiederkehrende Spannung den Wert $1,3 U_1$. Beträgt dagegen bei gleicher Verstimmung die Netzdämpfung

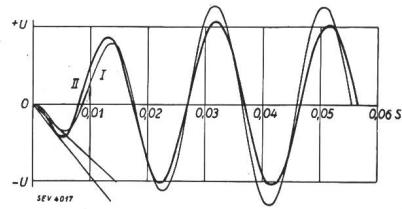


Fig. 15.

Einfluss der Netzdämpfung auf die wiederkehrende Spannung. Kurve I für 10 %, Kurve II für 30 % Dämpfung.

30 %, so wird durch die stärkere Dämpfung ein Ueberschwingen nur bis zum Wert $1,05 U_1$ stattfinden. Fig. 15 zeigt den Verlauf der wiederkehrenden Spannung für diese Verhältnisse; Kurve I gilt für eine Netzdämpfung von 10 %, Kurve II für eine solche von 30 %. Wie daraus ersichtlich ist, bewirkt die grössere Dämpfung zuerst ein schnelleres, später dagegen ein langsameres Anwachsen der wiederkehrenden Spannung.

Die Tangente durch den Ursprung ($t = 0$) der Kurve für die wiederkehrende Spannung ist ein Mass für die grösste mittlere Rückkehrgeschwindigkeit der Spannung. Fig. 16 gibt diese Rückkehrgeschwindigkeit (als Spannung bezogen auf $0,01 \text{ s}$) in Funktion von der Verstimmung der Löschspule, Kurve I für die Netzdämpfung 10 %, Kurve II für eine Dämpfung von 30 %. Die Kurven zeigen noch

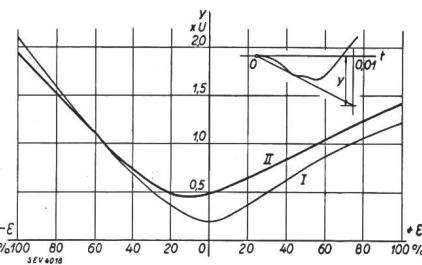


Fig. 16.

Einfluss der Verstimmung auf die wiederkehrende Spannung. Kurve I für 10 %, Kurve II für 30 % Netzdämpfung.

einmal ganz deutlich den grossen Unterschied zwischen dem isolierten Netz (Verstimmung $\varepsilon = -100 \%$) und dem vollständig kompensierten Netz. Viel weniger gross ist dagegen der Unterschied zwischen dem vollständig und dem unvollständig kompensierten Netz, d. h. zwischen der Anwendung von Resonanz- und Dissonanz-Löschspulen, wenigstens so lange die Verstimmung der Spulen relativ klein

gehalten wird. Die praktischen Erfahrungen bestätigen diese Feststellung und haben dazu geführt, im allgemeinen die Verstimmung innerhalb bestimmter Grenzen zu halten. Für Netze mit sehr grossen Erdschlußströmen (500 A und mehr) dürfte etwa 5 bis 10 % als die oberste Verstimmungsgrenze zu betrachten sein. Wenn der Erdschlußstrom klei-

ner ist, kann die Grenze höher gelegt werden, ohne dass sie aber den Wert von 20 bis 30 % überschreiten sollte. Aus den Kurven ist schliesslich ersichtlich, dass bei Netzen mit grosser Ableitung die Verstimmung mit Vorteil kleiner zu wählen ist als in solchen mit kleinerer Ableitung, damit gleich günstige Löschverhältnisse vorliegen.

Technische Mitteilungen. — Communications de nature technique.

Indirekte Beleuchtung des Dufourplatzes in Zollikon.

628.971.7

In den nach modernen Gesichtspunkten angelegten Dufourplatz in Zollikon münden fünf Hauptstrassen, deren beachtenswerter Fahrverkehr auf diesem Platze durch Kreisverkehr geregelt wird.

Der Platz, sowohl die Fahrbahnen als auch die umliegenden Trottoirs, werden von einem Beleuchtungsmast aus be-

Der Mast ist an den Zeitschalter der allgemeinen Strassenbeleuchtung angeschlossen. Vier Reflektoren sind teilläufig, zwei Reflektoren sowie die Lampen für die Beleuchtung der Uhren, Wegweiser und Verkehrssignale durchnächtig geschaltet.

Die absolut blendungsfreie, dem Bedürfnis entsprechend verteilte Beleuchtung wird von Fussgängern und besonders von Autofahrern als angenehm empfunden. *H. Sameli.*



bei Tag

Masse:

Höhe des Reflexions-	12 m
Durchmesser des Re-	
flexionsschirmes	3 m
Anzahl Reflektoren	6
Glühlampen	6 · 500 Watt
Durchmesser der Ver-	
kehrsinsel	15 m



bei Nacht.

Fig. 1.
Beleuchtungsmast am Dufourplatz in Zollikon.

leuchtet. Um eine angenehme, möglichst blendungsfreie Beleuchtung zu erhalten, wurde eine indirekte Beleuchtung versucht. Ein horizontal liegender, innen weiss gestrichener Reflexionsschirm wird von einer Anzahl auf einem Kreisring angeordneter Reflektoren bestrahlt und wirft ein vollständig diffuses Licht auf den Platz. Der Reflexionsschirm wurde so geformt, dass eine möglichst zweckmässige Lichtverteilung entsteht, was hinreichend gelungen ist. Er wird mit den Reflektoren von einem massiven Betonmast getragen, der überdies drei Transparentwegweiser und vier beleuchtete Verkehrssignale sowie drei elektrische Uhren trägt. Die Uhren werden durch eine unter Dach aufgestellte Mutteruhr gesteuert.

Die elektrischen Stark- und Schwachstromleitungen sind in Rohrleitungen im Mastinnern verlegt und in einem geräumigen Kasten unter der Rundbank über Sicherungen mit den Kabelleitungen verbunden.

Das Vorzeichen von Blindstrom und Blindleistung in Vektordiagrammen¹⁾.

621.3.012.1

Bei der Berechnung komplizierterer elektrischer Anlagen ist eine eindeutige Definition der Blindleistung und ihres mathematischen Vorzeichens nötig. Während bei der Wirkleistung, deren Erzeugung und Verbrauch einen eindeutigen physikalischen Sinn hat, die Wahl des Vorzeichens keine besonderen Schwierigkeiten bereitet, muss man sich bei der Definition des Vorzeichens der Blindleistung an gewisse willkürliche Abmachungen halten.

Für die *vektorielle Darstellung der Blindleistung* ist nun (wie im zitierten Aufsatz ausführlich gezeigt wird) die Wahl des mathematischen Koordinatensystems sowie des Drehsinns der Vektoren massgebend. Das *mathematische Koordinaten-*

¹⁾ Polhausen und v. Timascheff, ETZ 1934, Heft 12, S. 301.