**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens

**Herausgeber:** Association suisse des électriciens

**Band:** 29 (1938)

**Heft:** 24

**Artikel:** Elektrostatische Spannungsmess- und Synchronisier-Einrichtung mit Messwandlern

**Autor:** Müller-Strobel, J.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-1059017

bon a supplanté le feu de bois, les chefs de cuisine ont tenté de faire les grillades sur feu de charbon, mais ils sont revenus par la suite au feu de charbon de bois. Lorsque le gaz fit son apparition, on l'a utilisé pour les grillades. Mais toutes ces méthodes présentent le gros désavantage de transmettre à la grillade toutes les odeurs, voire même la fumée et la suie. Cela a changé d'un seul coup avec l'apparition des corps de chauffe électriques à incandescence, qui fonctionnent sans aucun produit de combustion et agissent uniquement par rayonnement. Ces corps de chauffe peuvent être disposés au-dessus de la viande, de sorte que le jus et la graisse ne peuvent pas se brûler en tombant sur le foyer. Comme partout, le chauffage électrique est dans un tel cas la solution la plus hygiénique et la seule qui soit satisfaisante au point de vue esthétique.

La souplesse d'adaptation du chauffage électrique permet de construire pour chaque usage l'appareil qui convient le mieux. La technique de la chaleur électrique met à la disposition de la gastronomie tout ce dont elle a besoin et de la façon qu'elle le désire. La cuisine moderne se caractérise par sa décentralisation et par ses appareils individuels qui sont, comme nous venons de le montrer, d'un rendement beaucoup plus élevé et plus économiques qu'un seul appareil universel, tel que le fourneau à charbon. La disposition décentralisée permet de travailler tout autrement. Il est toutefois nécessaire que l'ordre règne dans ces cuisines et que tous les appareils soient utilisés correctement, afin que la marche des travaux reste bien réglée.

Comme on le voit, toutes les exigences formulées au début de cet article sont satisfaites. Ce nouveau système n'est donc pas décevant. L'essentiel est l'*organisation parfaite sur laquelle il repose.* Il faudra encore beaucoup de peine et de travail pour que ces connaissances soient mieux répandues et l'on devra s'efforcer de démontrer par des exemples concrets ce qui doit être et ce qui ne doit pas être, ce qui est bien, ce qui laisse encore à désirer et ce qui est faux. Il est néanmoins certain que la cuisine électrique a commencé sa marche triomphale. Mais il est nécessaire de maintenir dans ce domaine des principes simples et clairs, des schémas bien ordonnés, une construction très soignée et un service de la plus grande propreté. Une cuisine électrique moderne doit être régie selon les mêmes principes que ceux en vigueur depuis longtemps dans les services essentiellement techniques.

# Elektrostatische Spannungsmess- und Synchronisier-Einrichtung mit Messwandlern.

Von *J. Müller-Strobel*, Zürich-Altstetten.

621.317.32.082.15 : 621.316.729

*Für die Spannungsmess- und Synchronisier-Einrichtung mit Messwandlern werden die Strom- und Spannungsgleichungen abgeleitet. Hiedurch wird eine klare Uebersicht des Funktionierens und der Bedeutung der einzelnen Schaltelemente des Meßsystems geboten. Um einwandfreie Messungen gewährleisten zu können, ist die Bürde an die Messwandler und die kapazitive Spannungsteilung je nach den gewünschten Forderungen anzupassen. Die Anpassungsbedingungen sind als algebraische Gleichungen formuliert, ebenso diejenigen für einwandfreies Synchronisieren.*

*Um einerseits die Uebersichtlichkeit zu heben, anderseits den Lesern, welche graphische Lösungsverfahren vorziehen, auch gerecht zu werden, ist nebst Spannungs- und Stromdiagramm das Impedanzdiagramm beigefügt.*

*Die gestellte Aufgabe ist mit der Wiedergabe der prinzipiellen Bedingungen gelöst, denn die Grösse der Messwandler und der erforderlichen Regulierorgane können an Hand der entwickelten Gleichungen bestimmt werden. Das Uebersetzungsdiagramm erfasst den Einfluss der Bürde nebst den dem System beigefügten Regulierorgane. Um die Uebereinstimmung von Diagramm und analytischer Rechnung zu beweisen, ist ein Rechenbeispiel angegliedert.*

*L'auteur se propose d'établir les conditions pour la mesure correcte, ainsi que pour une synchronisation efficace au moyen d'une installation à transformateurs de mesure. Il est nécessaire pour cela que le secondaire des transformateurs de mesure et le réducteur capacitif de tension soient accordés selon les caractéristiques désirées. En partant des équations normales du courant et de la tension, on arrive en effet à formuler algébriquement ces conditions.*

*Pour être complet, et pour permettre aux lecteurs plus familiarisés avec les méthodes graphiques de suivre le problème, on a ajouté les diagrammes des courants et des tensions, ainsi que celui des impédances.*

*Au moyen de la solution générale proposée, on peut entreprendre le calcul du transformateur de mesure, ainsi que celui des organes régulateurs. Le rapport de réduction peut être reporté dans un diagramme, ce qui permet de suivre sa variation avec celle de la charge secondaire y compris les organes régulateurs.*

*Enfin, on montre par un petit exemple numérique que les deux méthodes de calcul graphique et algébrique conduisent aux mêmes résultats.*

## I. Einleitung.

Das Bedürfnis, Hochspannungsanlagen sehr genau zu überwachen, warf die Frage auf, wie einfache Spannungsmesseinrichtungen ohne grossen Kostenaufwand gebaut werden können. Schon frühzeitig ging man dazu über, an Stelle platzraubender und teurer Spannungswandler Vorrichtungen zu verwenden, die diese Nachteile nicht besitzen und doch eine einwandfreie Spannungsmessung und Synchronisierung ermöglichen. Der nächstliegende Gedanke war der, die Hochspannungsdurchführungen und verwandte Apparate, welche ohnehin bei allen Hochspannungsanlagen vorhanden sind, als kapazitive Spannungsteilung zu verwenden. Eine derartige Unterteilung lässt sich sehr einfach bei den Kondensatordurchführungen vornehmen, da für die elektrische Steuerung sowieso Metalleinlagen in den Superresocelkörper eingefügt werden müssen. Selbstverständlich findet auch die Oeldurchführung, Stab- oder Schleifenstromwandler hiezu Verwendung. Die zwei folgenden Methoden haben eine eigentliche Entwicklung erfahren:

1. Die rein elektrische Spannungsmess- und Synchronisiereinrichtung mit elektrostatischem Voltmeter und elektrostatischem Synchronoskop (System Sieber).

2. Elektrostatische Spannungsmesseinrichtung und Synchronisiereinrichtung mit Zwischen- oder Ladewandler. Handelsüblicher Name: «C»-Messung.

Ueber das unter 1. angeführte Verfahren und die zugehörenden Einrichtungen wurde bereits an anderer Stelle [1]) ausführlich berichtet; es wird deshalb darüber nicht berichtet. Dagegen soll die unter 2. angeführte «C»-Messung, besonders ihre Wirkungsweise, einer Betrachtung unterzogen werden.

Praktische Bedeutung hat die «C»-Messung dort erlangt, wo man auf *höchste* Messgenauigkeit verzichtet, um ohne die sehr teuren Hochspannungsmesswandler auszukommen. Die erreichbare Genauigkeit beträgt bei der Spannungsmessung (genaue Abstimmung) ± 1 %; sie kann bei ungünstigen Verhältnissen bis auf ± 5 % fallen. Als Störung tritt im wesentlichen der unzureichende Isolationswiderstand zwischen Erde und Messbelag oder Zuleitung auf, eine Fehlerquelle, die bei sorgfältiger Fabrikation ohne besondere Mühe eliminiert werden kann. In der Hauptsache wird die «C»-Messung für Erdschlusskontrolle, zur Messung der verketteten Spannung und vor allem zum Synchronisieren verwendet.

## II. Einrichtung für die Transformation des Verschiebungsstromes.

Das generelle Schaltschema der «C»-Messung mit Angabe der zugehörenden Apparate zeigt Fig. 1.

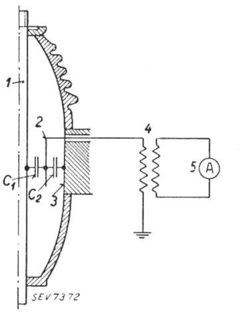


Fig. 1.
**Durchführung als statischer Spannungsteiler,** ausgebildet mit Messwandler für die Transformierung des Verschiebungsstromes des Spannungsteilers auf die gewünschte Grösse.
*1* Durchführungsbolzen.
*2* Messbelag.
*3* Geerdeter Flansch der Durchführung.
*4* Messwandler.
*5* Instrument.
$C_1$ Kapazität zwischen den Durchführungsbolzen und dem Messbelag.
$C_2$ Kapazität zwischen dem Messbelag u. dem geerdeten Flansch.

Um sekundärseitig am Messwandler ein oder mehrere elektrodynamische Instrumente mit normalem

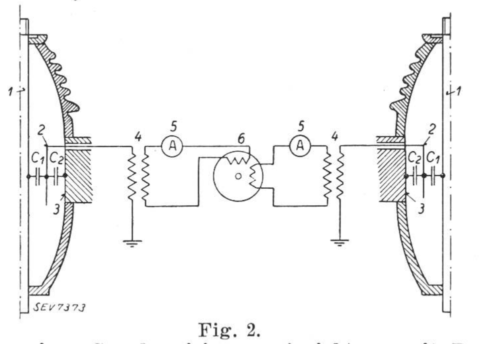


Fig. 2.
**Aufbau einer Synchronisierungseinrichtung mit Durchführungen.**
Bezeichnung *1—4* wie in Fig. 1.
*5* Ampèremeter mit geeichter Voltmeterskala.
*6* Synchronoskop.

Eigenverbrauch anschliessen zu können, wird der Verschiebungs- oder Ladestrom des kapazitiven Spannungsteilers mittels einem Transformator transformiert.

Zur Vornahme der Synchronisierung zweier Netze werden Volt- oder Doppelvoltmeter und Synchronoskop *6* über je einen Messwandler der Phase und Gegenphase nach Fig. 2 geschaltet. Die Erzeugung eines Drehfeldes im Synchronoskop ist gewährleistet. Funktionell sind die Instrumente 5 mit Voltmeterskala versehene Strommesser. Fig. 3 zeigt eine Schalterdurchführung, bei der der Messwandler direkt neben ihr angeordnet ist. Vorteilhaft ist auch die Ausführung mit blanker Zuleitung vom Messbelag zum Stromwandler. An Stelle der Kabeleinführung tritt eine Durchführung am Messwandler.

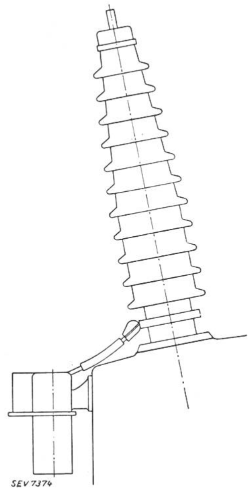


Fig. 3.
**Schalter- oder Transformatorendurchführung mit angebautem Messwandler und flexibler Zuleitung.**

Bekanntlich können an Stelle der Instrumente auch Relais eingebaut werden, sofern ihr Eigenverbrauch nicht zu gross ist. Je nach der verfügbaren Spannung sind bei Spannungsteilern ähnlich den Durchführungen 10 ... 30 VA, bei Kopplungs- oder Schutzkondensatoren mit Anzapfungen je nach Grösse 30 ... 120 VA und darüber erreichbar.

## III. Ableitungen der Grundgleichungen.

Als Grundlage für die Berechnung der Spannungen und Ströme der «C»-Messungsvorrichtung dient

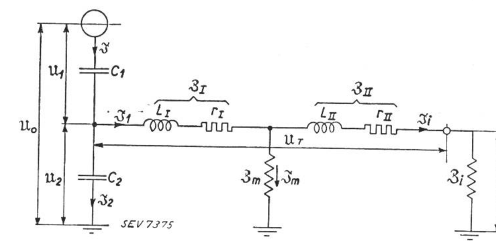


Fig. 4.
**Ersatzbild der elektrostatischen Spannungs- und Synchronisierungseinrichtung.**
$\mathfrak{U}_0$ Spannung Netz — Erde.
$\mathfrak{U}_1$ Teilspannung der Kapazität $C_1$ zwischen dem Durchführungsbolzen und dem Messbelag.
$\mathfrak{U}_2$ Teilspannung der Kapazität $C_2$ zwischen dem Messbelag und dem geerdeten Flansch.
$\mathfrak{U}_i$ Spannung an der Bürde.
$\mathfrak{U}_T$ Spannungsabfall zwischen der Klemmenspannung des Messwandlers.
$\mathfrak{J}$ Ladestrom für die Messvorrichtung.
$\mathfrak{J}_2$ Strom der Kapazität $C_2$.
$\mathfrak{J}_1$ Primärstrom des Messwandlers.
$\mathfrak{J}_m$ Magnetisierungsstrom des Messwandlers.
$\mathfrak{J}_i$ Sekundärstrom des Messwandlers, der identisch dem Belastungsstrom der Bürde Zi ist.
$\mathfrak{Z}_I$ Impedanz des Primärkreises des Messwandlers.
$\mathfrak{Z}_{II}$ Impedanz des Messwandler-Sekundärkreises.
$\mathfrak{Z}_i$ Impedanz der Bürde.

[1]) S. Rump: Bull. SEV 1935, Nr. 11, S. 291.
A. Palm, S. Rump: Bull. SEV 1931, Nr. 6, S. 181.

[2]) Im Ersatzschema Fig. 4 ist im Gegensatz zu den Fig. 1, 2 und 3 angenommen, der Bürdenstrom $\mathfrak{J}_i$ fliesse zur Erde. $\mathfrak{Z}_i$ sollte mit $\mathfrak{Z}_m$ verbunden werden. Für die Berechnung ist diese Aenderung vorteilhaft, während das physikalische Verhalten der Messeinrichtung keineswegs beeinflusst wird.

das Ersatzschema Fig. 4 [1]), das adäquat demjenigen [2]) der Fig. 1 ist. Der Messwandler ist durch einen T-Ersatzstromkreis, die Belastung des Sekundärkreises durch den Strom $\mathfrak{J}_i$ und die Impedanz $\mathfrak{Z}_i$ berücksichtigt. Die aus der Ableitungsadmittanz $\mathfrak{Y}_m$ berechenbare «Querimpedanz» der Magnetisierung ist mit $\mathfrak{Z}_m$, der Magnetisierungsstrom mit $\mathfrak{J}_m$ bezeichnet. Grundsätzlich werden in diesen ersten Ableitungen nur die summarischen Transformatorimpedanzen [2]) $\mathfrak{Z}_I$ und $\mathfrak{Z}_{II}$ eingeschlossen. Eine Unterteilung erfolgt später.

Die Phasenspannung $\mathfrak{U}_0$ am Spannungsteiler setzt sich zusammen aus den Teilspannungen $\mathfrak{U}_1$ und $\mathfrak{U}_2$. Diese sind wieder Funktionen der Kapazitäten $C_1$, $C_2$ und der Ströme $\mathfrak{J}$ und $\mathfrak{J}_2$

$$\mathfrak{U}_0 = \mathfrak{U}_1 + \mathfrak{U}_2 = \frac{\mathfrak{J}}{j\,\omega\,C_1} + \frac{\mathfrak{J}_2}{j\,\omega\,C_2} \tag{1}$$

Die Gl. (1) nach dem Kirchhoffschen Knotenpunktgesetz erweitert, lautet

$$\mathfrak{U}_0 = \frac{\mathfrak{J}}{j\,\omega\,C_1} + \mathfrak{J}_i\mathfrak{Z}_i + \mathfrak{J}_m\mathfrak{Z}_m \tag{2}$$

Um den Einfluss von jedem Schaltelement wiedergeben zu können, ist die summarische Reduktion auf den Primärkreis des Transformators nicht vorgenommen.

Die Summation der Ströme ergibt

$$\mathfrak{J} = \mathfrak{J}_1 + \mathfrak{J}_2 \quad (3) \qquad \mathfrak{J}_1 = \mathfrak{J}_i + \mathfrak{J}_m \quad (4)$$

und die der Teilspannungen über den Kreis $\mathfrak{Z}_m$ und $\mathfrak{Z}_i$

$$\mathfrak{J}_m\,\mathfrak{Z}_m = \mathfrak{J}_i\,(\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i) \tag{5}$$

$\mathfrak{J}_m$ aus Gl. (5) in Gl. (4) eingesetzt und $\mathfrak{J}_i$ vor die Klammer gestellt, führt auf die Beziehung

$$\mathfrak{J}_1 = \mathfrak{J}_i + \mathfrak{J}_i\left(\frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m}\right) = \mathfrak{J}_i\left(1 + \frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m}\right) \tag{6}$$

Für die Berechnung der Spannung $\mathfrak{U}_2$ an der sog. Messkapazität $C_2$ ist die Kenntnis einer weiteren Beziehung mit der Kapazitanz $1/\omega C_2$ nötig, nämlich

$$\frac{\mathfrak{J}_2}{j\,\omega\,C_2} = \mathfrak{J}_1\mathfrak{Z}_I + \mathfrak{J}_i\,(\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i) \tag{7}$$

Wird Gl. (7) mit dem in das Netzwerk fliessenden Strom $\mathfrak{J}_1$ [Gl. (6)] erweitert (vgl. Fig. 4), geht sie über in

$$\frac{\mathfrak{J}_2}{j\,\omega\,C_2} = \mathfrak{J}_i\left(1 + \frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m}\right)\mathfrak{Z}_I + \mathfrak{J}_i\,(\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i) \tag{8}$$

Nach dem Einsetzen des Verschiebungsstromes $\mathfrak{J}_2$ der Kapazität $C_2$ [Gl. (8)] und des primärseitig in den Wandler fliessenden Stromes $\mathfrak{J}_1$ der Gl. (6) wird der *Ladestrom* $\mathfrak{J}$ der *Teilkapazität* $C_1$ nach Gl. (3)

$$\mathfrak{J} = \mathfrak{J}_1 + \mathfrak{J}_2 = \mathfrak{J}_i\left(1 + \frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m}\right) +$$
$$\mathfrak{J}_i\left[\left(1 + \frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m}\right)\mathfrak{Z}_I + \mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i\right] j\,\omega\,C_2 \tag{9}$$

Den Strom $\mathfrak{J}$ nach Gl. (9) und $\mathfrak{J}_m\mathfrak{Z}_m$ nach Gl. (5) in die Grundgleichung Gl. (2) eingesetzt, erlaubt, für $\mathfrak{U}_0$ zu schreiben

$$\mathfrak{U}_0 = \frac{\mathfrak{J}_i}{j\,\omega\,C_1}\left(1 + \frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m}\right) + \mathfrak{J}_i\left[\left(1 + \frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m}\right)\mathfrak{Z}_I + \right.$$
$$\left.\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i\right]\cdot\frac{C_1}{C_2} + \mathfrak{J}_i\left[\left(1 + \frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m}\right)\mathfrak{Z}_I + \mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i\right] \tag{10}$$

Alle die Ableitungsadmittanz $1/\mathfrak{Z}_m$ enthaltenden Glieder zusammengefasst, führen auf die endgültige Gleichung

$$\mathfrak{U}_0 = \mathfrak{J}_i\left[\left(\mathfrak{Z}_I\left(1 + \frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m}\right) + \right.\right.$$
$$\left.\left.\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i\right)\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) + \left(1 + \frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m}\right)\frac{1}{j\,\omega\,C_1}\right] \tag{11}$$

Um einen ersten Ueberblick von der gegenseitigen Beeinflussbarkeit der einzelnen Schaltelemente zu erhalten, ist es von Vorteil, den Magnetisierungsstrom des schwach gesättigten Messwandlers zu vernachlässigen. Da für eine konkrete Konstruktion die Impedanz $\mathfrak{Z}_{II}$ angenähert konstant ist, die Belastungsimpedanz $\mathfrak{Z}_i$ sich nur schwach ändert und die Querimpedanz $\mathfrak{Z}_m$ eine sehr grosse Zahl ist, darf an Stelle des Gliedes $\frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m}$ ohne einen bemerkenswerten Fehler zu begehen, der konstante vektorielle Faktor $\mathfrak{h}$ gesetzt werden. Es folgt die Gleichung

$$1 + \frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m} = 1 + \mathfrak{h} \tag{12}$$

wo der Betrag von $\mathfrak{h}$ zwischen 0,01 und 0,02 variiert.

Zu beachten ist die Tatsache, dass $1 + \mathfrak{h}$ nach Gl. (11) nur die Primärimpedanz $\mathfrak{Z}_I$ und die Kapazitanz $\frac{1}{j\,\omega\,C_1}$ zu beeinflussen vermag, weshalb ein Einfluss ohne besondere Schwierigkeiten abschätzbar ist.

Eine etwas einfachere und doch hinreichend genaue Darstellung der Messeinrichtung ist möglich, wenn man in den weiteren Ableitungen $1 + \mathfrak{h}$ gleich Eins setzt, bzw. den Magnetisierungsstrom unberücksichtigt lässt. Für den Magnetisierungsstrom $\mathfrak{J}_m = 0$ ist die Impedanz $\mathfrak{Z}_m = \infty$. Die Gl. (11) vereinfacht sich und man erhält die für die weitere Behandlung grundlegende Form

$$\mathfrak{U}_0 = \mathfrak{J}_i\left[(\mathfrak{Z}_I + \mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i)\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) + \frac{1}{j\,\omega\,C_1}\right] \tag{13}$$

Man beachte in Gl. (13) die Bedeutung der Suszeptanz $\omega C_1$, da in allen praktischen Fällen $1/\omega C_1$ eine sehr grosse Zahl wird und deshalb entscheidenden Einfluss besitzt.

Um die Frage nach dem *Oberwelleneinfluss* zu beantworten, ist der einfachste einzuschlagende Weg der, den Bürdenstrom $\mathfrak{J}_i \equiv \mathfrak{J}_1$ in Abhängigkeit von der Spannung $U_0$ gegen Erde zu berechnen. Die Gl. (13) umgeschrieben und nach $\mathfrak{J}_i$ aufgelöst, ergibt, wenn man für $\mathfrak{Z}_T = \mathfrak{Z}_I + \mathfrak{Z}_{II}$ setzt:

$$\mathfrak{J}_i = \frac{\mathfrak{U}_0\, \omega\, C_1}{\omega\,(C_1+C_2)\,(\mathfrak{Z}_T+\mathfrak{Z}_i)+\frac{1}{j}} \tag{13b}$$

Nach bekannten Regeln wird der Betrag von $\mathfrak{J}_i$ bei Berücksichtigung der in Gl. (20) und (21) definierten Widerstände $r_T$, $\omega l_T$ und der reduzierten $r_i'$ und $\omega l_i'$ und $U_0 = U(\omega_0) + U(\omega_2) + \ldots + U(\nu\omega_0)$

$$I_i = \frac{U_0\,\omega\, C_1}{\sqrt{[\omega\,(C_1+C_2)\,(r_T+r_i')]^2+[\omega^2 (C_1+C_2)\,(L_T+L_i')-1]^2}} \tag{13c}$$

Nach der Einführung des bekannten Frequenzfaktors $\nu = \frac{\omega}{\omega_0}$ (Grundfrequenz $\omega_0$) wird der Betrag des Bürdenstromes $I_i$ für $U_0 = \Sigma\, U_0(\nu\omega_0)$

$$I_i = \frac{U_0\ \omega\ C_1}{\sqrt{\omega_0^4\,(L_T+L_i')^2\,(C_1+C_2)^2\left[\nu^2+\frac{(r_T+r_i')^2}{\omega_0^2\,(L_T+L_i')^2}\right]-2\,\omega_0^2\,(C_1+C_2)\,(L_T+L_i')+\frac{1}{\nu^2}}} \tag{13d}$$

Die übliche [3]) [4]) Darstellung der Stromaufnahme $I_i$ der Bürde erfolgt in Abhängigkeit vom bereits genannten Frequenzfaktor $\nu$. Den Einfluss von $\omega_0\nu$ auf $I_i$ bei konstantem Uebersetzungsverhältnis *ü* des Wandlers stellt Fig. 5, denjenigen des Totalwiderstandes $/\mathfrak{Z}_T/+/\mathfrak{Z}_i/$ auf den Bürdenstrom $I_i$ für verschiedene $\nu\omega_0$ stellen die Kurven der Fig. 6 dar. Je *grösser* der Widerstand des Zwischenwandlers, um so *geringer* ist der *Oberwelleneinfluss.*

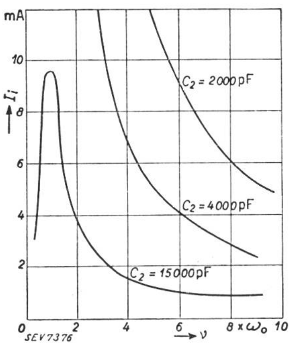



Fig. 5.
**Bürdenstrom $\mathfrak{J}_i$ in Abhängigkeit von der Frequenz** $\omega = \nu\,\omega_0$ $(\frac{\omega_0}{2\pi} = 50$ Hz) und der Kapazität $C_2$ des Spannungsteilers. $|\mathfrak{Z}_T| + |\mathfrak{Z}_i| = 2{,}20 \cdot 10^5\ \Omega$; $\omega_0 L = 1{,}35 \cdot 10^5\ \Omega$; $C_1 = 200$ pF. $U_0 = 150$ kV.

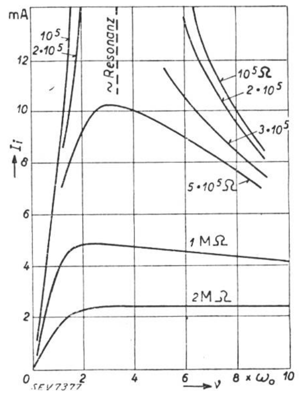



Fig. 6.
**Bürdenstrom $\mathfrak{J}_i \equiv \mathfrak{J}_1$ in Abhängigkeit** von der Frequenz $\omega = \nu\,\omega_0$ $(\frac{\omega^0}{2\pi} = 50$ Hz) und dem auf den Primärkreis reduzierten Totalwiderstand $|\mathfrak{Z}_T| + |\mathfrak{Z}_i|$. $U_0$ $(\nu\,\omega_0) = 150$ kV.

Die Klemmenspannung am Messwandler, die gleichfalls von Interesse sein kann, lässt sich aus Gl. (1) und (8) für $\mathfrak{Z}_m \rightarrow \infty$ ermitteln,

$$\mathfrak{U}_2 = \frac{\mathfrak{J}_2}{j\omega C_2} = \frac{\mathfrak{J}_i\,(\mathfrak{Z}_I+\mathfrak{Z}_{II}+\mathfrak{Z}_i)\,j\,\omega\, C_2}{j\,\omega\, C_2} = \mathfrak{J}_i\,(\mathfrak{Z}_T+\mathfrak{Z}_i) \tag{13e}$$

Führt man wie bei Gl. (13d) den Frequenzfaktor $\nu$ ein, so kann die Spannung $\mathfrak{U}_2$ an der Teilkapazität $C_2$ in Funktion der Frequenz für verschieden grosse Ohmwerte des Zwischenwandlers und der Stromaufnahme $\mathfrak{J}_i$ der Bürde bei verschieden grossen Gesamtwiderständen $r_T + r_i'$ und $\omega_0(L_T + L_i')$ folgendermassen geschrieben werden:

$$U_2 = I_i\ \omega_0\ (L_T+L_i')\sqrt{\frac{(r_T+r_i')^2}{\omega_0(L_T+L_i')^2}+\nu^2} \tag{13f}$$

Für die in Fig. 5 angegebenen Daten besitzt die Klemmenspannung für verschiedene $C_2$ und $\nu\omega_0$ $(\omega_0 = 2\pi f = 2\pi \cdot 50)$ den in Fig. 7 dargestellten Verlauf. Selbst für grosse $\nu\omega_0$ steigt die Spannung bei einem $\mathfrak{Z}_T = 1\,\mathrm{M}\Omega$ nicht mehr merklich an (flacher

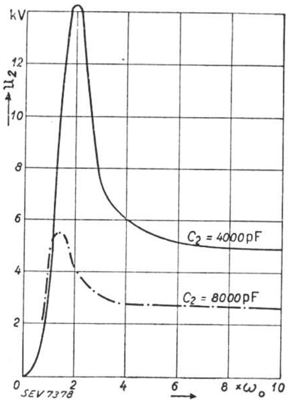



Fig. 7.
**Abhängigkeit der Spannung $\mathfrak{U}_i$ am Messwandler von der** Frequenz $\omega = \nu\,\omega_0$ $(2\pi \cdot 50 = \omega_0)$ und der Kapazität $C_2$ des Spannungsteilers. $U_0$ $(\nu\,\omega_0) = 150$ kV.

Kurvenast), so dass in dem Bereich ein *Oberwelleneinfluss nicht* besteht.

## IV. Uebertragungsbedingungen.

Die grundsätzlich bei einem derartigen Messsystem auftretende Frage ist die: Wie wird die zu messende Hochspannung $\mathfrak{U}_0$ im Messkreis durch die *Uebertragungsorgane abgebildet.* Zwei Forderungen lassen sich formulieren:

a) Für die Vornahme der *Synchronisierung* werden nach Fig. 2 über zwei Systeme *A* und *B* Spannungen und Ströme übertragen, die im Synchronoskop ein Drehfeld erzeugen. Damit die Uebertragung der Phasenlage von Netz *A* und *B* auf den Instrumentenkreis ohne eine wesentliche Verzerrung erfolgt, muss der Uebertragungswinkel zwischen Spannung $\mathfrak{U}_0$ und $\mathfrak{U}_i$ für Systeme *A* wie *B* der gleiche sein, selbst wenn Oberwellen stören. Nach Möglichkeiten ist der Forderung b) nachzukommen.

b) Bei der *Spannungsmessung* ist eine getreue Abbildung des numerischen Betrages des Spannungsvektors $\mathfrak{U}_0$ im Messkreis verlangt, was einem

[3]) *Keinath:* Techn. el. Messger. II, Verlag Oldenbourg 1928, S. 24. Wiss. Veröff. Siemens. Konz. V, II (1926), S. 76.

[4]) ATM 1931, V 3333 — 2; T 84. 1934, V 3333 — 3; T 118—T 120.

*J. G. Wellings, J. R. Mortlock, P. Mathews:* J. E. E. 79 (1936), II, S. 577—584.

*P. Boucherot:* Rev. gén. de l'Electricité 5 (1919), S. 203.

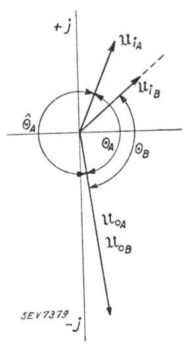
konstanten Uebersetzungsverhältnis $\frac{/\mathfrak{U}_0/}{/\mathfrak{U}_i/}$ gleichkommt. Ein Fehler in der Phasenlage hat keinen Einfluss.

Beide Bedingungen behalten auch ihre Gültigkeit, wenn Oberwellen im Spiele sind, nur wird dann nicht die idealste Lösung gleich vorliegen, sondern es muss ein Mittelweg gesucht werden.

Im folgenden Kapitel werden die genannten Bedingungen analytisch formuliert.

## V. Winkelübertragung.

Um nicht nur eine klare Vorstellung von den gestellten Bedingungen des vorigen Abschnittes IV zu geben, sondern auch den Versuch zu wagen, die analytische Formulierung weiterer Probleme zu erleichtern, ist in Fig. 8 das Strom-Spannungsdiagramm aufgezeichnet. Der Einfachheit halber sind die Spannungsabfälle nach Fig. 4 von der Bürde $\mathfrak{Z}_i$ aus gesehen. Dank dieser Definition der Richtung fällt der Vektor des Belastungsstromes $\mathfrak{I}_i$ mit der positiven Achse des Koordinatensystems zusammen. Kennt man die Grösse der Belastungswiderstände $r_i$, $\omega L_i$ und die Widerstände des Messwandlers $r_T$, $\omega L_T$ [vgl. Gl. (20), (21)], so lassen sich daraus die Vektoren der Spannungen konstruieren. Die Spannung an der Messkapazität gegen Erde wird $\mathfrak{U}_2 = \mathfrak{U}_i + \mathfrak{U}_T$. Senkrecht auf $\mathfrak{U}_2$ steht der Stromvektor $\mathfrak{I}_2$, deren Grösse aus $\mathfrak{U}_2$ und $\omega C_2$ zu berechnen ist. Die vektorielle Addition der Ströme $\mathfrak{I}_i$ und $\mathfrak{I}_2$ ergibt den sogenannten Ladestrom $\mathfrak{I}$, der durch die Kapazität $C_1$ fliesst. Der Teilspannungsvektor $\mathfrak{U}_1$ steht senkrecht auf dem Stromvektor $\mathfrak{I}$. Addiert man zu $U_1$ den Vektor $\mathfrak{U}_2$, so ergibt sich als Resultierende der Spannungsvektor $\mathfrak{U}_0$ der Spannung Netz—Erde.




**Spannungsdiagramm.**
Fig. 8.
**Generelles**

$\mathfrak{U}_{0A}$ $\mathfrak{U}_{0B}$ Netzspannung im System *A* bzw. *B*.
$\mathfrak{U}_{iA}$ Spannung an der Bürde im System *A*.
$\mathfrak{U}_{iB}$ Spannung an der Bürde im System *B*.
$\theta_A$, $\theta_B$ Phasenwinkel der Spannungen für die Systeme *A* bzw. *B*, identisch $\theta$ im Strom - Spannungs-Diagramm Fig. 9.

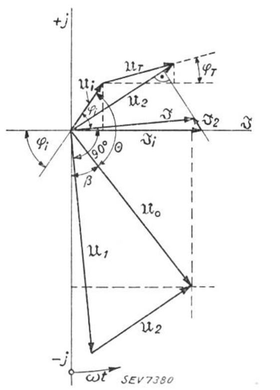



Fig. 9.
**Strom-Spannungsdiagramm.**

$\mathfrak{I}_i$ der Bürde fällt mit der + $\mathfrak{I}$-Axe zusammen.
$\varphi_i$ Phasenwinkel von $\mathfrak{I}_i$, $\mathfrak{U}_i$.
$\varphi_T$ Phasenwinkel von $\mathfrak{U}_T$.
$\omega t$ Winkel der rotierenden Drehaxe.
$\theta$ Winkel zwischen der Spannung $\mathfrak{U}_0$ und $\mathfrak{U}_i$.

Die nächste Aufgabe besteht darin, den Winkel oder den Bogen $\Theta$ der Fig. 9 aus den bekannten Gleichungen zu berechnen. Unter Berücksichtigung einer rotierenden Zeitachse $\omega t$, die man mit der $-j$-Achse zusammenfallen lässt, wird die Spannung $\mathfrak{U}_0$ (Fig. 4):

$$\mathfrak{U}_0 = U_0\, e^{j(\omega t+\beta)} \tag{14}$$

Die sekundärseitige Spannung $\mathfrak{U}_i$ dagegen

$$\mathfrak{U}_i = U_i\, e^{j(\omega t+\beta+\theta)} \tag{15}$$

Da $\mathfrak{U}_0$ und $\mathfrak{U}_i$ nach Gl. (11) eine Abhängigkeit vom Belastungsstrom $\mathfrak{I}_i$ aufweisen, liegt es nahe, durch einfache Division den Strom $\mathfrak{I}_i$ zu eliminieren.

$$\frac{\mathfrak{U}_0}{\mathfrak{U}_i} = \frac{U_0\, e^{j(\omega t+\beta)}}{U_i\, e^{j(\omega t+\beta+\theta)}} = \frac{\mathfrak{I}_i\, \Sigma\, \mathfrak{Z}}{\mathfrak{I}_i \mathfrak{Z}_i} \tag{16}$$

Die Summe der Impedanzen $\Sigma\mathfrak{Z}$ durch eine resultierende $\mathfrak{Z}_\Sigma$ substituiert, $\mathfrak{Z}$ allgemein durch den entsprechenden Absolutbetrag und einer Drehfunktion mit dem Drehwinkel $\varphi_\Sigma$ und $\varphi_i$ ersetzt, führt Gl. (16) nach der Vornahme der Subtraktion der Winkel über in

$$\frac{\mathfrak{U}_0}{\mathfrak{U}_i} = \frac{U_0}{U_i}\, e^{j(\omega t+\beta-(\omega t+\beta+\theta))} = \frac{U_0}{U_i}\, e^{j\theta} = \frac{I_i Z_\Sigma e^{j\varphi_\Sigma}}{I_i Z_i e^{j\varphi_i}} \tag{17}$$

$I_i$ lässt sich kürzen. Es folgt die Beziehung für das Strom-Spannungsdiagramm nach Fig. 6

$$\frac{\mathfrak{U}_0}{\mathfrak{U}_i} = \frac{U_0}{U_i} = e^{j\theta} = \frac{Z_\Sigma}{Z_i}\, e^{j(\varphi_\Sigma - \varphi_i)} \tag{18}$$

Vorläufig interessieren nur die Richtungen der Spannungsvektoren. Die folgende Winkelgleichheit kann aus Gl. (18) abgelesen werden

$$\Theta \equiv \varphi_\Sigma - \varphi_i \tag{19}$$

Die Berechnung des Winkels $\Theta$ erfolgt nach Fig. 10.

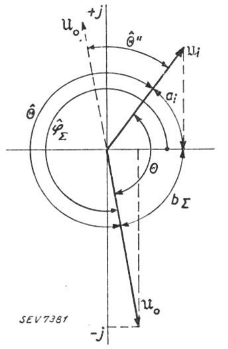



Fig. 10.
**Winkel und Bogenzeichnung** mit den Spannungsvektoren $\mathfrak{U}_0$ und $\mathfrak{U}_i$.
$\theta$ Winkel zwischen $\mathfrak{U}_0$ und $\mathfrak{U}_i$, entspricht in Fig. 8, $\theta_A$ und $\theta_B$ der Systeme *A* bzw. *B*.

Alle Winkel im Bogenmass ausgedrückt ergeben die einfachen Beziehungen

$$\widehat{\varphi_\Sigma} = 2\pi - b_\Sigma \tag{19a}$$

$$\widehat{\Theta} = 2\pi - b_\Sigma - a_i \tag{19b}$$

$$2\pi - \widehat{\Theta} = \Theta \quad = b_\Sigma + a_i \tag{19c}$$

Die Periodizität $\pi$ der arc tg-Funktion berücksichtigt, erlaubt ebenfalls zu schreiben

$$\pi - \widehat{\Theta}'' = \Theta \quad = b_\Sigma + a_i \tag{19d}$$

Aus der Darstellung kann entnommen werden, dass der Bogen des Winkels $\widehat{\Theta}''$ stets eine positive Grösse sein muss. Dieser Bedingung nachkommend, wird bei der analytischen Ableitung eine einschränkende Ungleichung aufgestellt, so dass der positive Charakter von $\widehat{\Theta}''$ stets gewahrt bleibt. Die Vieldeutigkeit der arc tg-Funktion ist hiedurch unterbunden.

Die Bogen $a_i$ der Vektoren $\mathfrak{U}_i$ und $b_\Sigma$ von $\mathfrak{U}_0$ berechnen sich nach bekannten Gesetzen. Alle Grössen sind selbstverständlich auf den Primärkreis zu reduzieren, denn nur so können die Richtungen der beiden Spannungen verglichen werden. Ist $\ddot{u}$ das Uebersetzungsverhältnis des Messwandlers, so gelten die Beziehungen

$$r_T = r_I + \ddot{u}^2 r_{II} = r_I + r'_{II} \tag{20}$$

$$\omega L_T = \omega L_I + \ddot{u}^2 \omega L_{II} = \omega L_{II} + \omega L'_{II} \tag{21}$$

Aus dem resultierenden Widerstandsoperator $\mathfrak{Z}_\Sigma$ der Gl. (12), (16) und (17) lässt sich der Bogen $b_\Sigma$ nach der folgenden Gleichung ermitteln:

$$b_\Sigma = \text{arctg } u_\Sigma = \text{arctg} \frac{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) \omega (L_T + L'_i) - \frac{1}{\omega C_1}}{(r_T + r'_i)\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)}$$

$$u_\Sigma = \text{Argument}) \tag{22}$$

Wird der Zähler und der Nenner des Argumentes mit der Kapazitanz multipliziert und umgerechnet, geht Gl. (22) über in

$$b_\Sigma = \text{arctg}\left[\frac{\omega (L_T + L'_i)}{(r_T + r'_i)} - \frac{1}{(r_T + r'_i)\,\omega (C_1 + C_2)}\right] \tag{23}$$

Bemerkenswert ist das Ergebnis der Gl. (23) deshalb, weil mit aller Deutlichkeit daraus hervorgeht, dass der Bogen $b_\Sigma$ bzw. der Phasenwinkel $\varphi_\Sigma$ von der *Summe der Teilkapazitäten* des Spannungsteilers abhängt. Wie man später zeigt, wird im Gegensatz hiezu die *Spannungsübersetzung* vom Kapazitätsverhältnis $C_2/C_1$ beeinflusst.

Der Bogen des Belastungswinkels $\varphi_i$ wird

$$a_i = \text{arctg } v_i = \text{arctg}\left(\frac{\omega L'_i}{r'_i}\right) \tag{24}$$

$$(v_i = \text{Argument})$$

Mittels trigonometrischer Formeln lässt sich die Summe beider Bogen $b_\Sigma$ und $a_i$ direkt aus den Argumenten bestimmen [Gl. (19d)].

$$\Theta = a_i + b_\Sigma = \text{arctg } u_\Sigma + \text{arctg} v_i = \text{arctg } \varDelta$$

$$= \text{arctg}\left(\frac{u_\Sigma + v_i}{1 - u_\Sigma \cdot v_i}\right) \tag{25}$$

Nach dem Einsetzen der Argumente $u_\Sigma$ und der Gl. (22) bis (24) erhält man den charakteristischen Bogen $\Theta$ zwischen den Spannungsvektoren (vgl. Fig. 10). Für die praktisch wichtigen Fälle ist stets

$$\frac{1}{\omega C_1} \leq \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) \omega (L_T + L'_i) \tag{26a}$$

mit

$$b_\Sigma = + \text{ arctg } u_\Sigma \tag{26b}$$

Der Bogen $\Theta$ selbst ist aus Gl. (25) durch Addition der Argumente $u_\Sigma$ und $v_i$ berechenbar.

$$\Theta = \text{arctg } \varDelta = \text{arctg} \frac{\omega (L_T + L'_i)\, \omega (C_1 + C_2) r'_i - r'_i + \omega L'_i (r_T + r'_i)\, \omega (C_1 + C_2)}{r'_i (r_T + r'_i) \omega (C_1 + C_2) - \omega L'_i\, \omega (L_T + L'_i)\, \omega (C_1 + C_2) - \omega L'_i} \tag{27a}$$

Wiederum den charakteristischen Frequenzfaktor $\nu$ eingeführt, ergibt für $\Theta$

$$\Theta = \text{arctg } \varDelta = \text{arctg} \frac{\nu^2 \omega^2 \left[r' (L_T + L'_i)(C_1 + C_2) + L'_i (r_T + r'_i)(C_1 + C_2)\right] - r'_i}{\omega_0 \nu \left[r'_i (r_T + r'_i)(C_1 + C_2) - L'_i\right] - \omega_0^3 \nu^3 L'_i (L_T + L'_i)(C_1 + C_2)} \tag{27b}$$

Man achte auf die Periodizität von arc tg $\varDelta$.

Sollen im Sekundärkreis des Messwandlers eine *Serieregulierung* des Widerstandes und der Induktanz vorgenommen werden, setzt man nach Fig. 11 an

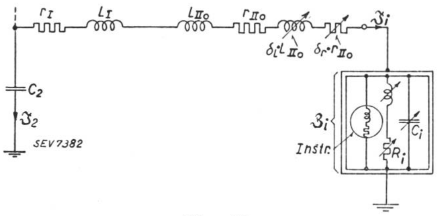



Fig. 11.

**Ersatzschaltbild des Messwandlers** ohne Berücksichtigung des Magnetisierungsstromes.

$\delta_L L_{II0}$ variable Induktanz } im Sekundärkreis des Messwandlers
$\delta_r r_{II0}$ variabler, ohmscher Widerstand } im Sekundärkreis des Messwandlers
$\mathfrak{Z}_i$ resultierende Impedanz der Bürde mit Instrument, regulierbare Widerstände und Kapazität $C_1$.

Stelle des Sekundärwiderstandes und der Reaktanz des Messwandlers, $r_{II}$ und $\omega L_{II}$, Variable mit den Variationen $\delta_r r_{I0}$ und $\delta_L \omega L_{II0}$

$$\omega L_{II} = \omega L_{II0} + \omega \delta_L L_{II0} \tag{28}$$

$$r_I = r_{I0} + \delta_r r_{II0} \tag{29}$$

Es bedeuten in obigen Gleichungen $r_{II0}$ und $\omega L_{II0}$ die Sekundärwiderstände des Messwandlers.

Durch das Bekanntsein der Bedingungsgleichung 27, welche die gegenseitige Wirkung aller Schaltelemente des gesamten Meßsystems erfasst, ist die Grundlage für die Abstimmung zweier gleichartiger Systeme geschaffen. Ebenfalls ist eine überschlagsmässige Abschätzung des Einflusses einzelner Glieder möglich. Die Vordisposition für Experimente ist hiedurch bedeutend erleichtert, worin einer der *hauptsächlichsten Werte* der gesamten Berechnung liegt.

### VI. Uebertragungsverhältnis $\mathfrak{t}$ der Spannungen.

Das Uebersetzungsverhältnis $\mathfrak{t}$ ist direkt aus Gl. (10) ableitbar. Es ist gleich dem Verhältnis der Absolutbeträge der Spannungen $/\mathfrak{U}_0/$ und $/\mathfrak{U}_i/$

$$/\mathfrak{t}/ = \frac{/\mathfrak{U}_0/}{/\mathfrak{U}_i/} = \sqrt{\frac{(r_T + r'_i)^2 \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)^2 + \left[\omega (L_T + L'_i)\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) - \frac{1}{\omega C_1}\right]^2}{r'^2_i + (\omega L'_i)^2}} \tag{29}$$

Den Wurzelausdruck mit Gl. (24), (25) und $\omega = \nu\omega_0$ erweitert und quadriert, ergibt $\mathfrak{k}^2_\nu$

$$|\mathfrak{k}|^2_\nu = \frac{(r_T+r_i')^2\left(1+\frac{C_2}{C_1}\right)^2+\left[\omega_0\,\nu\,(L_T+L_i')\left(1+\frac{C_2}{C_1}\right)-\frac{1}{\omega_0\,\nu\,C_1}\right]^2}{r_i'^2+\nu^2\,(\omega_0\,L_i)^2} \tag{30}$$

Gleich wie die Zwischenwinkel $\Theta$ im vorigen Kapitel lassen sich die Uebersetzungsverhältnisse $|\mathfrak{k}|_\nu$ aus Gl. (30) berechnen. Eine wertvolle Ergänzung ist das im folgenden Abschnitt abgeleitete Uebersetzungsdiagramm, Fig. 13.

## VII. Diagramme.

### *a) Impedanzdiagramm.*

Das Impedanzdiagramm ist die zeichnerische Darstellung der umgeformten symbolischen Gl. (12), die lautet

$$\frac{\mathfrak{U}_0}{\mathfrak{I}_i\left(1+\frac{C_2}{C_1}\right)} = (\mathfrak{Z}_I+\mathfrak{Z}_{II})+\mathfrak{Z}_i+\frac{1}{j\,\omega\,(C_1+C_2)} = \mathfrak{Z}_0 \qquad \text{(31a)};$$

$$\mathfrak{Z}_I+\mathfrak{Z}_{II} = \mathfrak{Z}_T \qquad \text{(31b)}$$

Um die Variation der Bürde $\mathfrak{Z}_i$ zu berücksichtigen, ist ein Koordinatensystem $r_i$ und $j\omega L_i$ bzw. $-j\frac{1}{\omega C_1}$ eingeführt. Aus dem gleichen Diagramm lässt sich der Strom $\mathfrak{I}_i$ ermitteln, wenn man die Gl. (31a) wie folgt umschreibt.

$$\frac{\mathfrak{U}_0}{\left(1+\frac{C_2}{C_1}\right)}\cdot\frac{1}{\mathfrak{Z}_0} = \frac{|\mathfrak{U}_0|}{\left(1+\frac{C_2}{C_1}\right)}\,\mathfrak{Z}_0^* = \mathfrak{I}_i \tag{32}$$

$\mathfrak{I}_i$ ist somit ein aus Skalar $\frac{U_0}{\left(1+\frac{C_2}{C_1}\right)}$ und inversem Vektor, der Admittanz $1/\mathfrak{Z}_0 = \mathfrak{Z}_0{}^*$ bestehendes Produkt. Der geometrische Ort der konstanten Leistungsfaktoren $\cos\varphi_i = \text{const.}$ im System $r_i$ und $j\omega L_i$ sind Gerade, ihre Inversion Kreise, so wie sie Fig. 12 darstellt. Die Konstruktion der Kreise ist aus dem Diagramm ersichtlich. Der Vollständigkeit halber sind die Kurven konstanter Verbraucherleistung eingetragen und mit $P_1$ und $P_2$ bezeichnet.

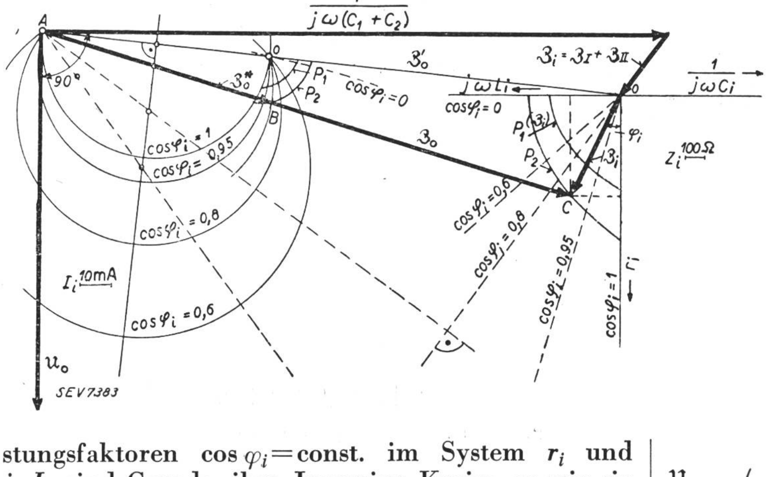



Fig. 12.

**Impedanzdiagramm.**

Graphische Darstellung der Gl. 31 für verschiedene Leistungsfaktoren $\cos S_i$ der Bürde. $P_1$, $P_2$ Scheinleistung in VA.

$\mathfrak{U}_0$ liegt in Ausgangsrichtung
$|\mathfrak{U}_0| = 84$ kV
$C_1 = 85$ pF
$C_2 = 1095$ pF
$\mathfrak{Z}_T = 3{,}3\cdot10^5\,\Omega$
$ü = 30$
$\omega = \omega_0 = 2\pi\cdot50$
$r_T = 2{,}7\cdot10^5\,\Omega$
$\omega L_T = 1{,}9\cdot10^5\,\Omega$
$\mathfrak{Z}_0'$ = Impedanz für $\mathfrak{Z}_i = 0$
$\mathfrak{Z}_0^* = \frac{1}{\mathfrak{Z}_0}$

Die zu den Kurven $P_1$ und $P_2$ im System $r_i$ und $j\omega L_i$ gehörenden inversen Impedanzkurven $\mathfrak{Z}_0{}^*$ sind in der Nähe des Punktes $B$ eingetragen.

Wie man sieht, bietet die Entwicklung des Impedanzdiagramms gar keine Schwierigkeiten. Auch der Einfluss einer Frequenzänderung lässt sich in dasselbe einfügen, wenn die entsprechenden Erweiterungen für variable $\omega$ vorgenommen werden. Meines Erachtens geben jedoch die Gl. (13 a—f) und Fig. 5, 6 und 7 weitgehend Aufschluss.

### *b) Diagramm des Uebersetzungsverhältnisses $\mathfrak{k}$.*

Die Uebersetzung $\mathfrak{k}$ ist ein Vektor und kann aus einem dem Impedanzdiagramm ähnlichen Diagramm ermittelt werden. Man dividiert den Spannungsvektor $\mathfrak{U}_0$ der Gl. (13) durch die Spannung $\mathfrak{U}_i$

$$\mathfrak{k} = \frac{\mathfrak{U}_0}{\mathfrak{U}_i} = \frac{\mathfrak{I}_i\left(1+\frac{C_2}{C_1}\right)\left(\mathfrak{Z}_I+\mathfrak{Z}_{II}+\mathfrak{Z}_i+\frac{1}{j\,\omega\,(C_1+C_2)}\right)}{\mathfrak{I}_i\,\mathfrak{Z}_i} \tag{33}$$

Obige Gl. (33) durch $\mathfrak{I}_i$ gekürzt, die einzelnen Glieder entwickelt und vor die Klammer gestellt, ergibt für das Uebersetzungsverhältnis $\mathfrak{k}$:

$$\mathfrak{k} = \frac{\mathfrak{U}_0}{\mathfrak{U}_i} = \frac{\left(1+\frac{C_2}{C_1}\right)\mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_i}+\frac{\left(1+\frac{C_2}{C_1}\right)}{\mathfrak{Z}_i}\cdot\left(\mathfrak{Z}_T+\frac{1}{j\,\omega\,(C_1+C_2)}\right) \tag{34}$$

Die Division der beiden Impedanzen $\mathfrak{Z}_i$ des ersten Gliedes führt auf den Einheitsvektor $[1]\mathfrak{U}_0$ der Ausgangsrichtung, welche mit der Richtung $\mathfrak{U}_0$ identisch ist. Schreibt man für $\mathfrak{Z}_i = Z_i e^{j\varphi_i}$ [Gl. (17) und (18)], so nimmt Gl. (34) die Form an

$$\frac{\mathfrak{U}_0}{\mathfrak{U}_i} = \left(1+\frac{C_2}{C_1}\right)\cdot[1]_{\mathfrak{U}_0}+\frac{\left(1+\frac{C_2}{C_1}\right)}{Z_i}\left(\mathfrak{Z}_I+\mathfrak{Z}_{II}+\frac{1}{j\,\omega\,(C_1+C_2)}\right)e^{-j\varphi_i} \tag{35}$$

Das Spannungsverhältnis setzt sich aus einem konstanten Skalar und einem bereits durch das Impedanzdiagramm bekanntgewordenen Vektor zusammen.

$$\mathfrak{Z}_I + \mathfrak{Z}_{II} + \frac{1}{j\,\omega\,(C_1 + C_2)} = \mathfrak{Z}_T + \frac{1}{j\,\omega\,(C_1 + C_2)} = \mathfrak{Z}_0' \qquad (36)$$

Der resultierende Vektor wird je nach der Grösse von $r_i$ und $\omega L_i$ durch die Drehfunktion $e^{j\varphi_i}$ gedreht. Gegenüber dem Impedanzdiagramm ist der Drehsinn geändert. Da die Grösse $Z_i$ aus dem Impedanzdiagramm bereits bekannt ist, oder wenn nicht, durch eine einfache Rechnung ermittelt werden kann, lässt sich der Vektor des Uebersetzungs-

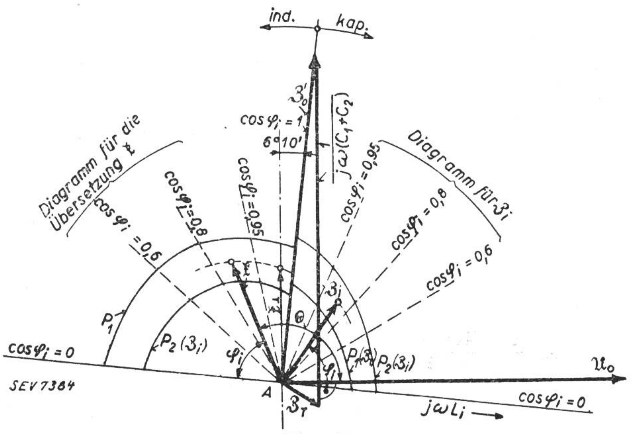



Fig. 13.

**Diagramm des Uebersetzungsverhältnisses $\mathfrak{t}$ ($\omega_0$).**

Graphische Darstellung der Gl. 34 bzw. 35 für verschiedene Leistungsfaktoren cos $\varphi_i$ der Bürde.

Das bezeichnete «Diagramm für $\mathfrak{Z}_i$» ist identisch mit dem Korrdinatensystem $r_i$, $j\omega L_i$ des Impedanzdiagrammes Fig. 9, bzw. dem Vektor $\mathfrak{Z}_i$.

$P_1$, $P_2$ Scheinleistung in VA.

$\mathfrak{t}$ Vektor des Uebersetzungsverhältnisses mit dem Phasenwinkel $\theta$ zwischen $\mathfrak{t}$ und $\mathfrak{U}_0$. $\mathfrak{t}$ besitzt die gleiche Richtung wie die Spannung $\mathfrak{U}_i$.

$\mathfrak{t}_\perp$ Uebersetzungsvektor $\perp$ auf $\mathfrak{U}_0$.

$\sphericalangle$ 6° 10′ zwischen $\mathfrak{t}_\perp$ und $\mathfrak{Z}_0'$ (berechnet unnd konstruiert).

verhältnisses aus dem sehr einfachen Diagramm Fig. 13 für beliebige cos $\varphi_i$ konstruieren. In den meisten praktisch vorkommenden Fällen ist der Skalar $\left(1+\frac{C_2}{C_1}\right)$ gegenüber $/\mathfrak{U}_0/$ so klein, dass er bedeutungslos wird. Erwähnenswert ist der Umstand, dass die Richtung des Vektors $\mathfrak{t}$ für cos $\varphi_i$ = 1 mit derjenigen der Impedanz $\mathfrak{Z}'_0$ [Gl. (36)] zusammenfällt.

## VIII. Diskussion der Gleichungen.

Es sei beispielsweise der eine Grenzfall gewählt, nämlich $\Theta \sim 90°$. Dieser Zustand tritt auf, wenn an Stelle eines Meßsystems $B$ in Fig. 2 ein Apparat tritt, bei dem die Phasenspannung des zu synchronisierenden Netzes um $\Theta = 90°$ induktiv gedreht wird. Es gilt für

$$\Theta = 90°;\ \Delta = \mathrm{tg}\,90° \rightarrow +\infty \qquad (37)$$

Diese Grenzbedingung ist erfüllt, wenn man den Nenner der Gl. (27a) Null setzt.

$$(r_T + r_i')\,r_i'\,\omega\,(C_1 + C_2) = \omega\,L_i'\,\omega\,(L_T + L_i')\,\omega\,(C_1 + C_2) + \omega\,L_i' \qquad (38)$$

Aufgelöst nach $\omega L_i$ entsteht eine quadratische Gleichung vom Typus

$$(\omega\,L_i)^2 + \left(\frac{\omega\,L_T}{\ddot{u}^2} + \frac{1}{\ddot{u}^2\,\omega\,(C_1 + C_2)}\right)\omega\,L_i - \left(r_i^2 + \frac{r_i\,r_T}{\ddot{u}^2}\right) = 0 \qquad (39)$$

Bei Zugrundelegung der gleichen elektrischen Daten wie für das Impedanz- und $\mathfrak{t}$-Diagramm (Fig. 12)

$$\begin{aligned} r_T &= 2{,}7 \cdot 10^5\,\Omega \\ \omega\,(C_1 + C_2) &= 3{,}7 \cdot 10^{-7}\,\Omega^{-1} \\ \omega\,L_T &= 1{,}9 \cdot 10^5\,\Omega \\ \ddot{u} &= 30 \\ \omega = \omega_0 &= 314 \quad (f = 50\ \mathrm{Hz}) \\ C_1 &= 85\ \mathrm{pF} \\ C_2 &= 1095\ \mathrm{pF} \end{aligned}$$

und einem Belastungswiderstand $r_i = 50\ \Omega$ wird der Blindwiderstand $\omega L_i$

$$\omega\,L_i = \frac{17250}{3220} = 5{,}3;\quad \frac{\omega\,L_i}{r_i} = 0{,}107$$

Hieraus berechnet sich der cos $\varphi_i$; er beträgt für obige Werte cos $\varphi_i = 0{,}994$, entsprechend einem Winkel von $\varphi_i = 6°\ 10'$. Die Nachkontrolle im $\mathfrak{t}$-Diagramm erfolgt durch das Einzeichnen eines Vektors $\mathfrak{t}$, der senkrecht auf $\mathfrak{U}_0$ steht. Der Phasenwinkel ist unmittelbar ablesbar und stimmt mit dem *berechneten sehr genau überein.* Um diesen Zustand im Verbraucherkreis zu erhalten, müsste die Blindleistung durch einen Parallelkondensator (Fig. 10) kompensiert werden.

Für den Fall, dass der Bogen $\Theta = \pi$ sein muss, gilt die Bedingung $\Theta = \operatorname{arc\,tg} \Delta = /^{\circ}_{\pi}$. Demzufolge ist der Zähler des Argumentes der Gl. (30) gleich Null zu setzen. Bedeutung erlangt dieser Betriebsfall, wenn an Stelle einer «C»-Messeinrichtung ein Spannungswandler geschaltet wird, der die Netzspannung um 180° elektr. dreht. Der Zähler der Gl. (27), (27a) wird Null gemacht. Es wird

$$r_i'\,\left[1 - \nu^2\,\omega_0^2\,(L_T + L_i')\,(C_1 + C_2)\right] = \nu^2\,\omega_0^2\,L_i'\,(r_T + r_i')\,(C_1 + C_2) \qquad (40)$$

und

$$r_i' = \frac{\nu^2\,\omega_0^2\,L_i'\,(r_T + r_i')\,(C_1 + C_2)}{1 - \nu\,\omega_0^2\,(L_T + L_i')\,(C_1 + C_2)} \qquad (41)$$

Für Kapazitätswerte, die der Gl. (39) zugrunde liegen, muss sich ein sehr kleiner Widerstand $r_i$ einstellen. Eine stark induktive Bürde ist anzuschalten. Dieses Ergebnis kann auch direkt aus dem Strom-Spannungsdiagramm (Fig. 9) entnommen werden.

### IX. Zusammenfassung.

Die Ableitung der Strom-Spannungsgleichungen ermöglicht eine klare Uebersicht über das Verhalten der ganzen Messeinrichtung. Ausserdem kann man dank der abgeleiteten Impedanzgleichungen die richtige und einfachste Konstruktion des Impedanz- und Spannungsübersetzungsdiagrammes entwickeln. Die Diagramme sind sehr einfach, und mancher Berechner wird ihnen den Vorzug geben.

Die nötige Regulierung des Uebersetzungsverhältnisses und der Phasenlage bei der Spannungsmessung oder Synchronisierung wird durch die ermittelten Beziehungen auch bei variablen Reaktanzen beherrscht.

Der Einfluss einer Frequenzänderung oder der Oberwellen auf die Spannungseinrichtung ist durch die Einführung des Frequenzfaktors $\nu$ erfasst. Die gebotene analytische Formulierung vervollständigt die Lösung und es kann durch sie eine Auswertung ohne Mühe vorgenommen werden.

Um die prinzipiellen Fragen in den Vordergrund zu stellen, ist auf eine erweiterte Auswertung verzichtet.

## Das Comité Suisse de l'Eclairage auf der Ausstellung „La ville nouvelle" in Genf.

061.4 : 628.9(494)

Die Ausstellung «La Ville Nouvelle» wurde von der «Internationalen Organisation für öffentliches Gesundheitswesen» (Sekretariat Genf) organisiert und brachte vor allem Modelle neuester oder kürzlich nach modernsten Prinzipien der Hygiene und des Geschmackes umgebauter Stadtteile. Beträchtliches Material aus einer Reihe von Staaten war vertreten.


Fig. 1.
Gesamtansicht des Standes.

Das Comité Suisse de l'Eclairage folgte einer Aufforderung und errichtete einen Stand über die Beziehung zwischen guter Beleuchtung und Hygiene. Der Stand, der in sehr verdankenswerter Weise von Genfer Mitgliedern des CSE entworfen und aufgebaut und von der Zentrale für Lichtwirtschaft z. T. finanziert wurde, setzte sich aus folgenden Einzelteilen zusammen: Dreiteilige Haupttafeln, Erklärung der «Arbeitslampe», Lichtdruckkasten von Osram, Zelle mit Metalldampflampen für Strassenbeleuchtung mit zugehörigen BAG-Armaturen. (Siehe Abbildungen.)

Die grundlegende Information enthielten die drei Tafeln. In der Mitte war eine Originalarbeitslampe mit aufgeschnittenem Schirm versenkt, ferner waren die wesentlichsten Ursachen für die häufigst vorkommenden Augenanomalien, die mit dem Alter sich verkleinernde Pupille und die nötige Kompensation dieser Erscheinungen durch mehr Licht und bessere Beleuchtung erwähnt, wodurch die Zunahme der Augenschwäche verlangsamt und das Sehen trotz schwacher Augen erleichtert wird.

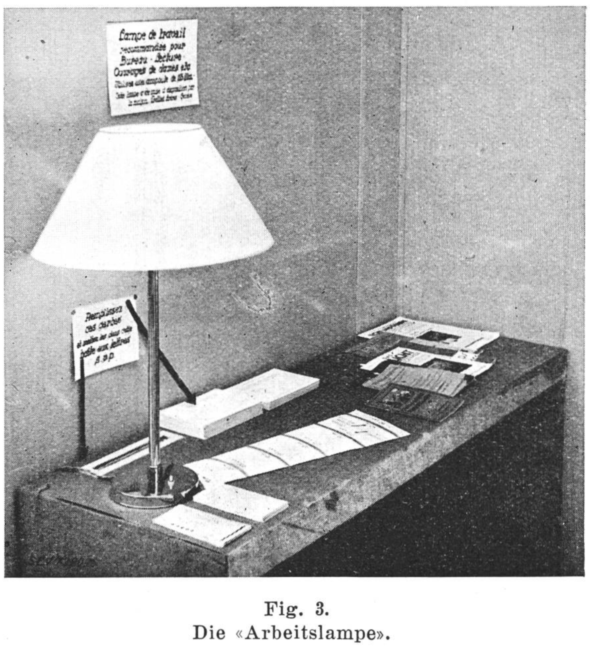


Fig. 3.
Die «Arbeitslampe».