

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
<b>Band:</b>	29 (1938)
<b>Heft:</b>	24
<b>Artikel:</b>	Elektrostatische Spannungsmess- und Synchronisier-Einrichtung mit Messwandlern
<b>Autor:</b>	Müller-Strobel, J.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-1059420">https://doi.org/10.5169/seals-1059420</a>

### **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>**

ren, das ist der Grill- und Spiessapparat. Er wiederholt die Form, wie man zuerst Fleisch durch Hitze zubereitet hat. Diese Bratweise hat sich lange erhalten. Und als man vom Holz- zum Kohlenfeuer überging, hat man auch mit Kohle gegrillt, später allerdings hauptsächlich mit Holzkohle. Als sich dann das Gas die Küche eroberte, hat man auch Gas zum Grillieren verwendet. Aber alle diese Methoden haben doch den grossen Fehler, dass sie alle Gerüche, manche sogar Rauch und Russ auf das Bratgut übertragen. Anders wurde das mit einem Schlag, als man den elektrisch glühend gemachten Heizkörper bekam. Er glüht ja nur aus sich heraus, ohne irgendwelche Verbrennungsgerzeugnisse von sich zu geben; allein seine Strahlhitze wirkt. Und da man diesen Glühkörper auch über dem Grillgut anbringen kann, so kann auch kein Fleischsaft und kein Fett in ihn tropfen und verbrennen. Wie überall hat sich auch hier die elektrische Beheizung als die hygienischste und die einzige ästhetisch befriedigende bewährt.

Die ungeahnte Anpassungsfähigkeit der elektrischen Beheizung erlaubt also, für jeden Zweck das passende Gerät unmittelbar zu entwickeln. Die Elektrowärmetechnik stellt der Gastronomie alles zur Verfügung, was und wie sie es braucht. Das Merkmal der modernen elektrischen Grossküche ist die Dezentralisation und das Spezialgerät, das, wie

wir bereits gesehen, viel leistungsfähiger und wirtschaftlicher ist als das Universale, wie es z. B. der Kohlenherd darstellt. Die aufgelockerte Ordnung der dezentralisierten elektrischen Küche erlaubt, ganz anders zu arbeiten. Um so mehr erfordert sie Ordnung und richtige Anwendung aller dieser Einrichtungen, damit der Fluss bei der Speisebereitung geregelt bleibt.

Blicken wir zurück, so bemerken wir, dass die anfangs formulierten Forderungen alle erfüllt sind. Das neue technische Mittel hat uns also nicht enttäuscht. Das Wichtigste, wie man sah, ist die richtige *Ordnung von Grund auf*. Es bedarf noch vieler Mühen und Arbeit, diese Kenntnisse weit genug zu verbreiten und immer wieder an Einzelbeispielen zu zeigen, wie es sein muss, wie es nicht sein darf, dass vieles Geschaffene gut, aber noch nicht ganz gut oder auch schlecht und falsch ist. Aber soviel scheint sicher, dass die Elektroküche am Anfang eines Siegeszuges durch die ganze Welt steht. Forderung ist allerdings, dass man gerade auf diesem Gebiet unbedingte Treue zu den einfachen und klaren Grundsätzen sauberer Planung, sauberer Konstruktion und peinlich sorgfältiger Betriebsführung, kurz dieselben Notwendigkeiten, Gesichtspunkte und Richtlinien innehält, die für zahlreiche, rein technische Betriebe schon lange gelten.

## 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. Hierdurch 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 beigelegt.*

*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 Ueber einstimmung von Diagramm und analytischer Rechnung zu beweisen, ist ein Rechenbeispiel angegliedert.*

### 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 Hochspannungsdurchführun-

*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 capacitatif 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.*

gen 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 Synchronisierungseinrichtung mit elektrostatischem Voltmeter und elektrostatischem Synchronoskop (System Sieber).

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

Ueber das unter 1. angeführte Verfahren und die zugehörigen Einrichtungen wurde bereits an anderer Stelle<sup>1)</sup> 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)  $\pm 1\%$ ; sie kann bei ungünstigen Verhältnissen bis auf  $\pm 5\%$  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.

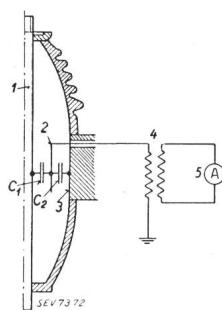
## II. Einrichtung für die Transformation des Verschiebungsstromes.

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

Fig. 1.

Durchführung als statischer Spannungsteiler, ausgebildet mit Messwandler für die Transformation des Verschiebungsstromes des Spannungsteilers auf die gewünschte Grösse.

- 1 Durchführungsbolzen.
- 2 Messbelag.
- 3 Geerdeter Flansch der Durchführung.
- 4 Messwandler.
- 5 Instrument.
- C<sub>1</sub> Kapazität zwischen den Durchführungsbolzen und dem Messbelag.
- C<sub>2</sub> Kapazität zwischen dem Messbelag u. dem geerdeten Flansch.



Um sekundärseitig am Messwandler ein oder mehrere elektrodynamische Instrumente mit normalem

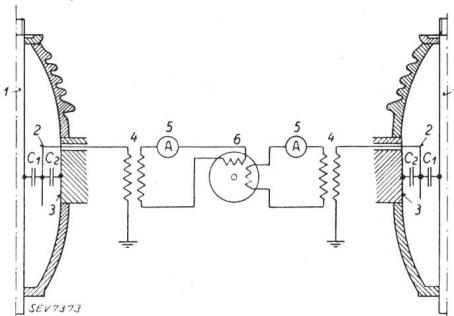


Fig. 2.

Aufbau einer Synchronisierungseinrichtung mit Durchführungen.

Bezeichnung 1—4 wie in Fig. 1.

5 Ampèremeter mit geeichter Voltmeterskala.

6 Synchronoskop.

<sup>1)</sup> S. Rump: Bull. SEV 1935, Nr. 11, S. 291.

A. Palm, S. Rump: Bull. SEV 1931, Nr. 6, S. 181.

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.

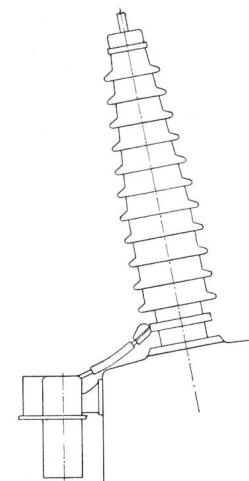


Fig. 3.

Schalter- oder Transformatordurchführung mit angebautem Messwandler und flexibler Zuleitung.

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

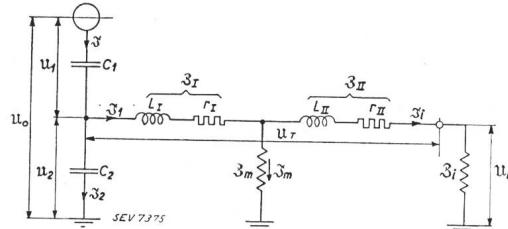


Fig. 4.

Ersatzbild der elektrostatischen Spannungs- und Synchronisierungseinrichtung.

- u<sub>0</sub> Spannung Netz — Erde.
- u<sub>1</sub> Teilspannung der Kapazität C<sub>1</sub> zwischen dem Durchführungsbolzen und dem Messbelag.
- u<sub>2</sub> Teilspannung der Kapazität C<sub>2</sub> zwischen dem Messbelag und dem geerdeten Flansch.
- u<sub>3</sub> Spannung an der Bürde.
- u<sub>4</sub> Spannungsabfall zwischen der Klemmenspannung des Messwandlers.
- z<sub>1</sub> Ladestrom für die Messvorrichtung.
- z<sub>2</sub> Strom der Kapazität C<sub>2</sub>.
- z<sub>1</sub> Primärstrom des Messwandlers.
- z<sub>m</sub> Magnetisierungsstrom des Messwandlers.
- z<sub>1</sub> Sekundärstrom des Messwandlers, der identisch dem Belastungsstrom der Bürde z<sub>1</sub> ist.
- z<sub>1</sub> Impedanz des Primärkreises des Messwandlers.
- z<sub>II</sub> Impedanz des Messwandler-Sekundärkreises.
- z<sub>1</sub> Impedanz der Bürde.

<sup>2)</sup> Im Ersatzschema Fig. 4 ist im Gegensatz zu den Fig. 1, 2 und 3 angenommen, der Bürdenstrom z<sub>1</sub> fließt zur Erde. z<sub>1</sub> sollte mit z<sub>m</sub> verbunden werden. Für die Berechnung ist diese Änderung vorteilhaft, während das physikalische Verhalten der Messeinrichtung keineswegs beeinflusst wird.

das Ersatzschema Fig 4<sup>1)</sup>, das adäquat demjenigen<sup>2)</sup> 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<sup>2)</sup>  $\mathfrak{Z}_I$  und  $\mathfrak{Z}_{II}$  eingeschlossen. Eine Unterteilung erfolgt später.

Die Phasenspannung  $U_0$  am Spannungsteiler setzt sich zusammen aus den Teilspannungen  $U_1$  und  $U_2$ . Diese sind wieder Funktionen der Kapazitäten  $C_1$ ,  $C_2$  und der Ströme  $\mathfrak{J}$  und  $\mathfrak{J}_2$

$$U_0 = U_1 + U_2 = \frac{\mathfrak{J}}{j \omega C_1} + \frac{\mathfrak{J}_2}{j \omega C_2} \quad (1)$$

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

$$U_0 = \frac{\mathfrak{J}}{j \omega C_1} + \mathfrak{J}_i \mathfrak{Z}_i + \mathfrak{J}_m \mathfrak{Z}_m \quad (2)$$

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

Die Summation der Ströme ergibt

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

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

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

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

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

Für die Berechnung der Spannung  $U_2$  an der sog. Messkapazität  $C_2$  ist die Kenntnis einer weiteren Beziehung mit der Kapazitanz  $1/\omega C_2$  nötig, nämlich

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

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

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

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)

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

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  $U_0$  zu schreiben

$$U_0 = \frac{\mathfrak{J}_i}{j \omega C_1} \left( 1 + \frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m} \right) + \mathfrak{J}_i \left[ \left( 1 + \frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m} \right) \mathfrak{Z}_I + \mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i \right] \cdot \frac{C_1}{C_2} + \mathfrak{J}_i \left[ \left( 1 + \frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m} \right) \mathfrak{Z}_I + \mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i \right] \quad (10)$$

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

$$U_0 = \mathfrak{J}_i \left[ \left( \mathfrak{Z}_I \left( 1 + \frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m} \right) + \mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i \right) \left( 1 + \frac{C_2}{C_1} \right) + \left( 1 + \frac{\mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i}{\mathfrak{Z}_m} \right) \frac{1}{j \omega C_1} \right] \quad (11)$$

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

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

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

$$U_0 = \mathfrak{J}_i \left[ \left( \mathfrak{Z}_I + \mathfrak{Z}_{II} + \mathfrak{Z}_i \right) \left( 1 + \frac{C_2}{C_1} \right) + \frac{1}{j \omega C_1} \right] \quad (13)$$

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:

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

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  $U_0 = U(\omega_0) + U(\omega_2) + \dots + U(\nu\omega_0)$

$$I_i = \frac{U_0 \omega C_1}{V[\omega(C_1 + C_2)(r_T + r'_i)]^2 + [\omega^2(C_1 + C_2)(L_T + L'_i) - 1]^2} \quad (13c)$$

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

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

Die übliche<sup>3)</sup><sup>4)</sup> 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  $\ddot{\nu}$  des Wandlers stellt Fig. 5, denjenigen des Totalwider-

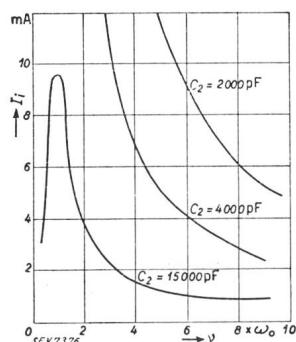


Fig. 5.  
Bürdenstrom  $\mathfrak{J}_1$  in Abhängigkeit von der Frequenz  
 $\omega = \nu \omega_0 \frac{\omega_0}{2\pi} = 50$  Hz und  
der Kapazität  $C_2$  des Spannungsteilers.  $|\mathfrak{J}_1| + |\mathfrak{J}_2| = 2,20 \cdot 10^5 \Omega$ ;  $\omega_0 L = 1,35 \cdot 10^5 \Omega$ ;  $C_1 = 200$  pF,  $U_0 = 150$  kV

standes  $\beta_T$  /  $+\beta_i$  auf den Büdenstrom  $I_i$  für verschiedene  $\nu w_0$  stellen die Kurven der Fig. 6 dar. Je grösser der Widerstand des Zwischenwandlers, um so geringer ist der *Oberwelleneinfluss*.

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

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

<sup>4)</sup> 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.

$$\mathfrak{U}_2 = \frac{\mathfrak{J}_2}{j\omega C_2} = \frac{\mathfrak{J}_i(\mathfrak{J}_I + \mathfrak{J}_H + \mathfrak{J}_i)j\omega C_2}{j\omega C_2} = \mathfrak{J}_i(\mathfrak{J}_T + \mathfrak{J}_i) \quad (13e)$$

Führt man wie bei Gl. (13d) den Frequenzfaktor  $\nu$  ein, so kann die Spannung  $U_2$  an der Teilkapazität  $C_2$  in Funktion der Frequenz für verschieden grosse Ohmwerte des Zwischenwandlers und der Stromaufnahme  $\Im_i$  der Bürde bei verschieden grossen Gesamtwiderständen  $r_T + r'_i$  und  $\omega_0(L_T + L'_i)$  folgendermassen geschrieben werden:

$$U_2 = I_i \omega_0 (L_T + L'_i) \sqrt{\frac{(r_T + r'_i)^2}{\omega_0 (L_T + L'_i)^2} + \nu^2} \quad (13f)$$

Für die in Fig. 5 angegebenen Daten besitzt die Klemmenspannung für verschiedene  $C_2$  und  $\varrho\omega_0$  ( $\omega_0 = 2\pi f = 2\pi \cdot 50$ ) den in Fig. 7 dargestellten Ver-

$$\left] - 2 \omega_0^2 (C_1 + C_2) (L_T + L_i') + \frac{1}{\nu^2} \right] \quad (13d)$$

lauf. Selbst für grosse  $r\omega_0$  steigt die Spannung bei einem  $\beta_T = 1M\Omega$  nicht mehr merklich an (flacher

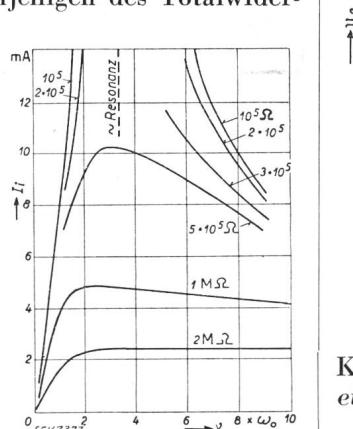


Fig. 6.  
**Bürdenstrom  $\mathfrak{J}_1 \equiv \mathfrak{J}_1$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $\omega = \nu \omega_0$  ( $\frac{\omega_0}{2\pi} = 50 \text{ Hz}$ ) und dem auf den Primärkreis reduzierten Totalwiderstand  $| \mathfrak{Z}_1 | + | \mathfrak{Z}_1 |$ .  
 $U_0 (\nu \omega_0) = 150 \text{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

lauf. Selbst für grosse  $r\omega_0$  steigt die Spannung bei einem  $\beta_T = 1M\Omega$  nicht mehr merklich an (flacher

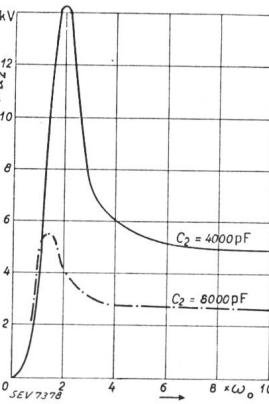


Fig. 7.

**Abhängigkeit der Spannung**  
**an am Messwandler von der**  
**Frequenz  $\omega = \gamma \omega_0 (2 \pi \cdot 50$**   
 $= \omega_0)$  und der Kapazität  
 $C_2$  des Spannungsteilers.

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  $U_0$  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  $U_0$  und  $U_i$  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  $U_0$  im Messkreis verlangt, was einem

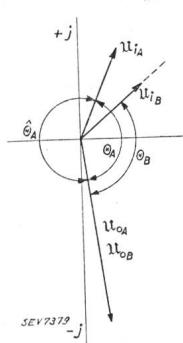
konstanten Uebersetzungsverhältnis  $\frac{|\mathfrak{U}_0|}{|\mathfrak{U}_i|}$  gleichkommt. Ein Fehler in der Phasenlage hat keinen Einfluss.

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.

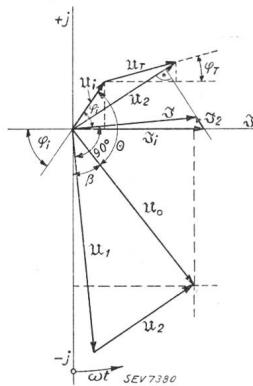
## V. Winkelübertragung.

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  $\mathfrak{J}_i$  mit der positiven Achse des Koordinatensystems zusammen. Kennt man die Grösse der Belastungswider-



Spannungsdiagramm.  
Fig. 8.

Generelles  
 $\mathfrak{U}_{0A}$   $\mathfrak{U}_{0B}$  Netzzspannung 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.



Strom-Spannungsdiagramm.  
 $\mathfrak{J}_i$  der Bürde fällt mit der + j-Achse zusammen.  
 $\varphi_i$  Phasenwinkel von  $\mathfrak{J}_i, \mathfrak{U}_i$ .  
 $\varphi_r$  Phasenwinkel von  $\mathfrak{U}_r$ .  
 $\omega t$  Winkel der rotierenden Drehaxe.  
 $\theta$  Winkel zwischen der Spannung  $\mathfrak{U}_i$  und  $\mathfrak{U}_r$ .

stände  $r_i, \omega L_i$  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  $\mathfrak{J}_2$ , deren Grösse aus  $\mathfrak{U}_2$  und  $\omega C_2$  zu berechnen ist. Die vektorielle Addition der Ströme  $\mathfrak{J}_1$  und  $\mathfrak{J}_2$  ergibt den sogenannten Ladestrom  $\mathfrak{J}$ , der durch die Kapazität  $C_1$  fliesst. Der Teilspannungsvektor  $\mathfrak{U}_1$  steht senkrecht auf dem Stromvektor  $\mathfrak{J}$ . Addiert man zu  $\mathfrak{U}_1$  den Vektor  $\mathfrak{U}_2$ , so ergibt sich als Resultierende der Spannungsvektor  $\mathfrak{U}_0$  der Spannung Netz-Erde.

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):

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\Theta \equiv \varphi_\Sigma - \varphi_i \quad (19)$$

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

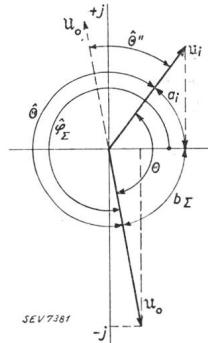


Fig. 10.

Winkel und Bogenzzeichnung 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

$$\widehat{\varphi_\Sigma} = 2\pi - b_\Sigma \quad (19a)$$

$$\widehat{\Theta} = 2\pi - b_\Sigma - a_i \quad (19b)$$

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

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

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

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  $\bar{\Theta}''$  stets gewahrt bleibt. Die Vieldeutigkeit der arc tg-Funktion ist hiedurch unterbunden.

Die Bogen  $a_i$  der Vektoren  $U_i$  und  $b_\Sigma$  von  $U_0$  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  $\bar{u}$  das Uebersetzungsverhältnis des Messwandlers, so gelten die Beziehungen

$$r_T = r_I + \bar{u}^2 r_H = r_I + r'_H \quad (20)$$

$$\omega L_T = \omega L_I + \bar{u}^2 \omega L_H = \omega L_H + \omega L'_H \quad (21)$$

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

$$b_\Sigma = \arctg u_\Sigma = \arctg \frac{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) \omega (L_T + L'_i) - \frac{1}{\omega C_1}}{(r_T + r'_i) \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)} \quad (22)$$

$u_\Sigma = \text{Argument}$

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

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

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

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

$(v_i = \text{Argument})$

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

$$\begin{aligned} \Theta = a_i + b_\Sigma &= \arctg u_\Sigma + \arctg v_i = \arctg \mathcal{A} \\ &= \arctg \left( \frac{u_\Sigma + v_i}{1 - u_\Sigma \cdot v_i} \right) \quad (25) \end{aligned}$$

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

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

mit

$$b_\Sigma = + \arctg u_\Sigma \quad (26b)$$

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

$$\Theta = \arctg \mathcal{A} = \arctg$$

$$\frac{\omega (L_T + L'_i) \omega (C_1 + C_2) r'_i - r'_i + \omega L'_i (r_T + r'_i) \omega (C_1 + C_2)}{r'_i (r_T + r'_i) \omega (C_1 + C_2) - \omega L'_i \omega (L_T + L'_i) \omega (C_1 + C_2) - \omega L'_i} \quad (27a)$$

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

$$\Theta = \arctg \mathcal{A} = \arctg$$

$$\frac{\nu^2 \omega_0^2 [r'_i (L_T + L'_i) (C_1 + C_2) + L'_i (r_T + r'_i) (C_1 + C_2)] - r'_i}{\omega_0 \nu [r'_i (r_T + r'_i) (C_1 + C_2) - L'_i] - \omega_0^3 \nu^3 L'_i (L_T + L'_i) (C_1 + C_2)} \quad (27b)$$

Man achte auf die Periodizität von  $\arctg \mathcal{A}$ .

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

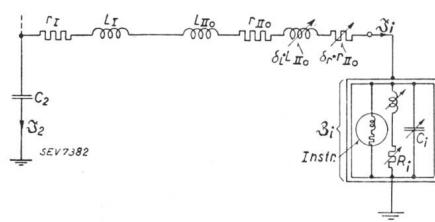


Fig. 11.

Ersatzschaltbild des Messwandlers ohne Berücksichtigung des Magnetisierungsstroms.

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

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

$$\omega L_H = \omega L_{H0} + \omega \delta_L L_{H0} \quad (28)$$

$$r_I = r_{I0} + \delta_r r_{H0} \quad (29)$$

Es bedeuten in obigen Gleichungen  $r_{H0}$  und  $\omega L_{H0}$  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 $\mathfrak{f}$ der Spannungen.

Das Uebersetzungsverhältnis  $\mathfrak{f}$  ist direkt aus Gl. (10) ableitbar. Es ist gleich dem Verhältnis der Absolutbeträge der Spannungen  $|U_0|$  und  $|U_i|$

$$|\mathfrak{f}| = \frac{|U_0|}{|U_i|} = \sqrt{\frac{(r_T + r'_i)^2 \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)^2 + \left[\omega (L_T + L'_i) \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) - \frac{1}{\omega C_1}\right]^2}{r'^2 + (\omega L'_i)^2}} \quad (29)$$

Den Wurzelausdruck mit Gl. (24), (25) und  $\omega = \nu \omega_0$  erweitert und quadriert, ergibt  $\frac{1}{\mathfrak{f}^2 \nu}$

$$\frac{(r_T + r'_i)^2 \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)^2 + \left[\omega_0 \nu (L_T + L_i) \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) - \frac{1}{\omega_0 \nu C_1}\right]^2}{r'^2 + \nu^2 (\omega_0 L_i)^2} \quad (30)$$

Gleich wie die Zwischenwinkel  $\Theta$  im vorigen Kapitel lassen sich die Uebersetzungsverhältnisse  $\frac{1}{\mathfrak{f}^2 \nu}$  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

$$\frac{\mathfrak{U}_0}{\mathfrak{J}_i \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)} = (\mathfrak{J}_I + \mathfrak{J}_N) + \mathfrak{J}_i + \frac{1}{j \omega (C_1 + C_2)} \quad (31a)$$

$$\mathfrak{J}_I + \mathfrak{J}_N = \mathfrak{J}_T \quad (31b)$$

Um die Variation der Bürde  $\mathfrak{J}_i$  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  $\mathfrak{J}_i$  ermitteln, wenn man die Gl. (31a) wie folgt umschreibt.

$$\frac{\mathfrak{U}_0}{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)} \cdot \frac{1}{\mathfrak{J}_0} = \frac{|\mathfrak{U}_0|}{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)} \mathfrak{J}_0^* = \mathfrak{J}_i \quad (32)$$

$\mathfrak{J}_i$  ist somit ein aus Skalar  $\frac{U_0}{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)}$  und inversem

Vektor, der Admittanz  $1/\mathfrak{J}_0 = \mathfrak{J}_0^*$  bestehendes Produkt. Der geometrische Ort der konstanten Le-

Die zu den Kurven  $P_1$  und  $P_2$  im System  $r_i$  und  $j \omega L_i$  gehörenden inversen Impedanzkurven  $\mathfrak{J}_0^*$  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 $\mathfrak{f}$ .

Die Uebersetzung  $\mathfrak{f}$  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  $\mathfrak{U}_i$

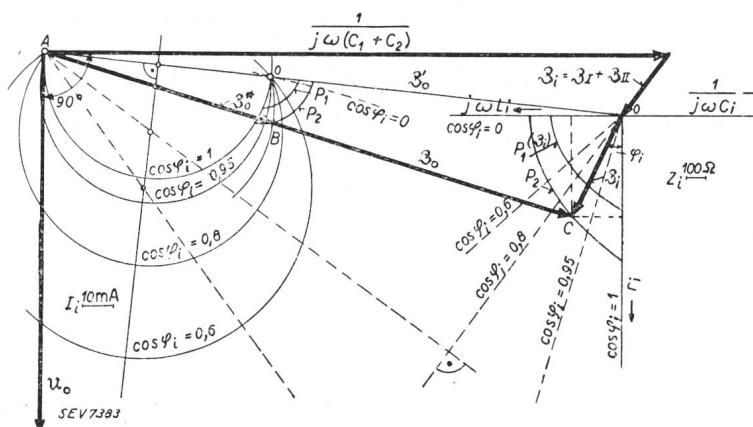
$$\mathfrak{f} = \frac{\mathfrak{U}_0}{\mathfrak{U}_i} =$$

$$\frac{\mathfrak{J}_i \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) \left(\mathfrak{J}_I + \mathfrak{J}_N + \mathfrak{J}_i + \frac{1}{j \omega (C_1 + C_2)}\right)}{\mathfrak{J}_i \mathfrak{J}_0} \quad (33)$$

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

$$\mathfrak{f} = \frac{\mathfrak{U}_0}{\mathfrak{U}_i} = \frac{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) \mathfrak{J}_i}{\mathfrak{J}_i} + \frac{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)}{\mathfrak{J}_i} \cdot \left(\mathfrak{J}_T + \frac{1}{j \omega (C_1 + C_2)}\right) \quad (34)$$

Die Division der beiden Impedanzen  $\mathfrak{J}_i$  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  $\mathfrak{J}_i = Z_i e^{j\varphi_i}$  [Gl. (17) und (18)], so nimmt Gl. (34) die Form an



stungsfaktoren  $\cos \varphi_i = \text{const.}$  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  $\cos \varphi_i$  der Bürde.  $P_1, P_2$  Scheinleistung in VA.

$\mathfrak{U}_0$  liegt in Ausgangsrichtung

$$\omega = \omega_0 = 2\pi \cdot 50$$

$$r_T = 2,7 \cdot 10^5 \Omega$$

$$|\mathfrak{U}_0| = 84 \text{ kV}$$

$$\omega L_T = 1,9 \cdot 10^5 \Omega$$

$$C_1 = 85 \text{ pF}$$

$$\mathfrak{J}_0' = \text{Impedanz für } \mathfrak{J}_i = 0$$

$$C_2 = 1095 \text{ pF}$$

$$\mathfrak{J}_T = 3,3 \cdot 10^5 \Omega$$

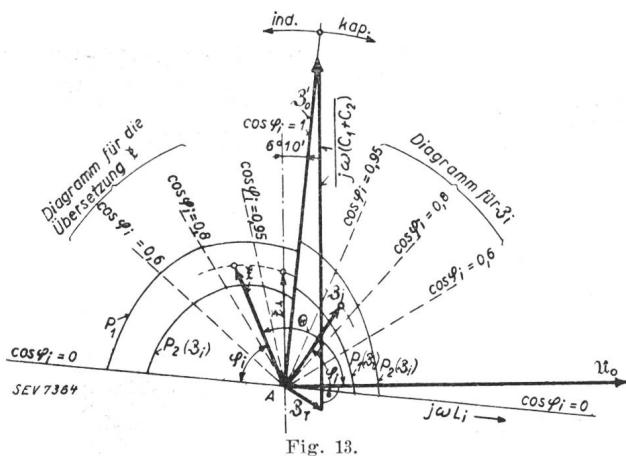
$$\dot{u} = 30$$

$$\frac{\mathfrak{U}_0}{\mathfrak{U}_i} = \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) \cdot [1]\mathfrak{U}_0 + \frac{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)}{Z_i} \left(\mathfrak{J}_I + \mathfrak{J}_N + \frac{1}{j \omega (C_1 + C_2)}\right) e^{-j\varphi_i} \quad (35)$$

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

$$\mathfrak{Z}_I + \mathfrak{Z}_H + \frac{1}{j \omega (C_1 + C_2)} = \mathfrak{Z}_T + \frac{1}{j \omega (C_1 + C_2)} = \mathfrak{Z}' \quad (36)$$

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-



### Diagramm des Uebersetzungsverhältnisses $\mathfrak{f}(\omega_0)$ .

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

Das bezeichnete «Diagramm für  $\mathfrak{Z}_1$ » ist identisch mit dem Korrdinatensystem  $r_1, j\omega L_1$  des Impedanzdiagrammes Fig. 9, bzw. dem Vektor  $\mathfrak{Z}_1$ .

$P_1, P_2$  Scheinleistung in VA.

- Vektor des Uebersetzungsverhältnisses mit dem Phasenwinkel  $\theta$  zwischen  $\mathbf{f}$  und  $\mathbf{u}_o$ .  $\mathbf{f}$  besitzt die gleiche Richtung wie die Spannung  $u_i$ .
- Uebersetzungsverhältnis  $\omega$  auf  $\omega$ .

$\mathbf{f}_1$  Uebersetzungsvektor  $\perp$  auf  $\mathfrak{u}_o$ .  
 $\angle 60^\circ 10'$  zwischen  $\mathbf{f}_1$  und  $\mathfrak{z}_1$  (berechnet und 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  $11_0$  so klein, dass er bedeutungslos wird. Erwähnenswert ist der Umstand, dass die Richtung des Vektors  $f$  für  $\cos \varphi_i = 1$  mit derjenigen der Impedanz  $3'_0$  [Gl. (36)] zusammenfällt.

## VIII. Diskussion der Gleichungen.

Es sei beispielsweise der eine Grenzfall gewählt, nämlich  $\Theta \sim 90^\circ$ . 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  $\Theta = 90^\circ$  induktiv gedreht wird. Es gilt für

$$\theta = 90^\circ; \Delta = \tan 90^\circ \rightarrow +\infty \quad (37)$$

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

$$(r_T + r'_i) r'_i \omega (C_1 + C_2) = \omega L'_i \omega (L_T + L'_i) \omega (C_1 + C_2) + \omega L'_i \quad (38)$$

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

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

Bei Zugrundelegung der gleichen elektrischen Daten wie für das Impedanz- und  $f$ -Diagramm (Fig. 12)

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

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  $\varphi_i = 6^\circ 10'$ . 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  $\Theta = \text{arc tg } A = \frac{90^\circ}{\pi}$ . 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 Netzzspannung um  $180^\circ$  elektr. dreht. Der Zähler der Gl. (27), (27a) wird Null gemacht. Es wird

$$r'_i \left[ 1 - \nu^2 \omega_0^2 (L_T + L'_i) (C_1 + C_2) \right] = \nu^2 \omega_0^2 L'_i (r_T + r'_i) (C_1 + C_2) \quad (40)$$

und

$$r'_i = \frac{\nu^2 \omega_0^2 L'_i (r_T + r_i) (C_1 + C_2)}{1 - \nu \omega_0^2 (L_T + L'_i) (C_1 + C_2)} \quad (41)$$

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 Berechnung wird ihnen den Vorzug geben.

Die nötige Regulierung des Uebersetzungsvorhältnisses und der Phasenlage bei der Spannungs-

messung oder Synchronisierung wird durch die ermittelten Beziehungen auch bei variablen Reaktanz-zen 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.

Die Ausstellung «La Ville Nouvelle» wurde von der «Internationalen Organisation für öffentliches Gesundheitswesen»

Augenschwäche verlangsamt und das Sehen trotz schwacher Augen erleichtert wird.

061.4 : 628.9(494)



Fig. 1.  
Gesamtansicht des Standes.

(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.

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 Metall-dampflampen 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 Augen anomalien, die mit dem Alter sich verkleinernde Pupille und die nötige Kompensation dieser Erscheinungen durch mehr Licht und bessere Beleuchtung erwähnt, wodurch die Zunahme der

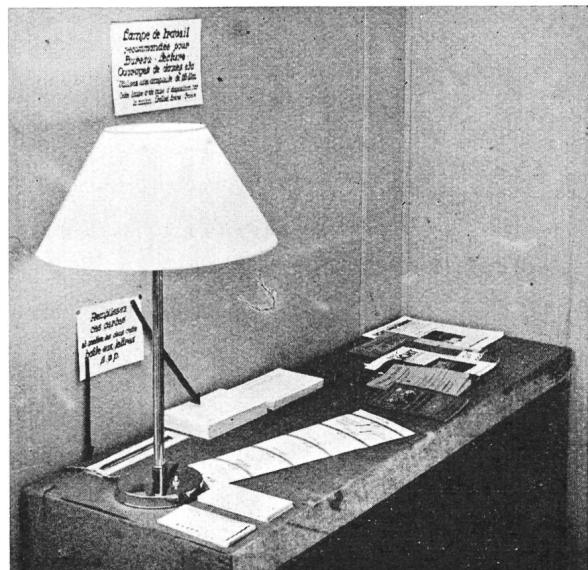


Fig. 3.  
Die «Arbeitslampe».