

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 20 (1929)  
**Heft:** 19

**Artikel:** Simultanbetrieb von Dreiphasen- und Einphasenanlagen durch Stromüberlagerung (-Doppelfrequenzbetrieb) auf gemeinschaftlichen Linien  
**Autor:** Jacob, Ernst  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1056829>

### **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:** 21.02.2026

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

# SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

# BULLETIN

## ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des  
Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des  
Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke

REDAKTION  
Zürich 8, Seefeldstr. 301

Secrétariat général de  
l'Association Suisse des Electriciens et de  
l'Union de Centrales Suisses d'électricité

Verlag und Administration

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.  
Zürich 4, Stauffacherquai 36/38

Editeur et Administration

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der  
Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et  
sans indication des sources

XX. Jahrgang  
XX<sup>e</sup> Année

Bulletin No. 19

Oktober I 1929  
Octobre I 1929

### Simultanbetrieb von Dreiphasen- und Einphasenanlagen durch Stromüberlagerung (-Doppelfrequenzbetrieb) auf gemeinschaftlichen Linien.

Vortrag, gehalten an der Generalversammlung des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke  
in St. Moritz, am 6. Juli 1929

von Baurat Dr. ing. Ernst Jacob, Stuttgart.

621.319.12:621.331.431+621.3

*Es wird eine Schaltanordnung beschrieben, die gestattet, Drehstrom-Hochvoltleitungen zur Mitübertragung von  $16\frac{2}{3}$  periodigem Einphasen-Bahnstrom zu benutzen. Diese Schaltung wird als Vierleiterschaltung bezeichnet, die Betriebsart als Doppelfrequenzbetrieb. Schalt- und Bauelemente des Doppelfrequenzbetriebes werden beschrieben. Die bei Doppelfrequenzbetrieb über grössere Streckenlängen erzielbaren Ersparnisse an Baukosten gegenüber Betrieb mit getrennten Leitungen betragen ca. 25 %, ausserdem werden die Uebertragungsverluste kleiner.*

*L'auteur décrit un schéma permettant de superposer du courant monophasé de traction,  $16\frac{2}{3}$  périodes, au courant triphasé, 50 périodes, de lignes à haute tension. Ce «schéma à quatre conducteurs» permet donc une «exploitation sous fréquence double» dont l'auteur décrit la réalisation pratique. L'économie que ce système mixte permet de faire par rapport à l'exploitation sur lignes séparées, grâce à une diminution des frais de construction, atteint environ 25 % pour de grandes distances, sans compter la réduction des pertes par effet Joule.*

In allen Ländern, die für das Bahnstromsystem den Einphasen-Wechselstrom von  $16\frac{2}{3}$  Per/sec gewählt haben, wird es immer als ein fühlbarer Nachteil empfunden, dass die von der normalen Periodenzahl 50 abweichende Bahnfrequenz die Erstellung gemeinsamer Kraftwerke, Leitungen und Unterwerke für Landes- und Bahnversorgung zusammen zunächst unmöglich macht. Es wurden vielmehr in der Schweiz, in Deutschland und auch in den nordischen Ländern völlig getrennte Stromversorgungsnetze für Bahn- und Allgemeinbedarf entwickelt, die entsprechend hohe Sonderkosten insbesondere für die Bahnnetze mit sich bringen. Bestrebungen, die Bahnversorgung in geeigneter Weise in die allgemeine Landesversorgung einzugliedern mit dem Zweck der Ersparnis eines besonderen Bahn-Primärnetzes sind daher schon frühzeitig aufgetreten und zwar versuchte man zunächst das Problem durch rotierende Perioden-Umformer zu lösen. Die praktische Durchführung dieses Gedankens im grossen ist aber unterblieben, weil die Lösung einen sehr hohen Kostenaufwand für die rotierenden Umformer und vor allem viel zu hohe Jahresverluste für die Energieumformung mit sich bringt. Um diese Nachteile zu vermeiden, habe ich versucht, an die Stelle der Frequenzumformung die *Frequenzüberlagerung* treten zu lassen und habe auf diesem Gedanken folgendes Uebertragungssystem aufgebaut:

Der Drehstromschwingung von 50 Per/sec, die auf unseren normalen Drehstromleitungen besteht, wird die Bahnstromschwingung von  $16\frac{2}{3}$  Per/sec elektrisch „unterlagert“. Es ergeben sich dabei auf der Leitung selbst resultierende Schwingungszustände, wie sie durch die Fig. 1 und 2 in ihrem praktischen Verlauf anhand einiger Oszillogramme zu sehen sind. Das wesentliche Kennzeichen des Ueberlagerungsvorganges ist dabei: die Scheitelwerte addieren sich arithmetisch ( $E_{res} = E_I + E_{III}$ ), die Effektivwerte dagegen nach dem Pythagoras ( $I_{res} = \sqrt{I_I^2 + I_{III}^2}$ ). In bezug auf Spannungs- und Leistungsverluste sind beide Stromsysteme voneinander völlig unabhängig.

*Technisch* wird die Ueberlagerung der beiden Schwingungen auf folgendem Weg erreicht: Man denke sich in Fig. 3 die Drehstromsammelschiene des Unterwerkes links über eine normale Drehstromleitung mit der Drehstromsammelschiene des Unterwerkes rechts verbunden. Die Uebertragung des Drehstroms geht in bekannter Weise von dem Generator links über die Leitung zum sekundären Netz rechts vor sich. An das gleiche Drehstromsystem wird nun links und rechts an der Sammelschiene je eine als Nullpunkt wirkende dreiphasige Wicklung angeschlossen, die auf einen Eisenkern mit magnetischem Rückschluss aufgebracht ist. Die Sekundärwicklung auf diesem Eisenkern besteht ebenfalls aus drei Wicklungen, die aber hintereinander, also in Reihe geschaltet sind. Die Nullpunkte der Hochvoltwicklung sind durch einen vierten Leiter, der für die volle Betriebsspannung isoliert wird,

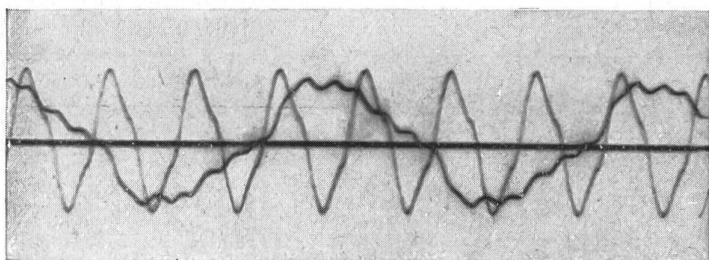


Fig. 1. (Cliché des Auteurs)  
Ein- und Dreiphasenschwingung.

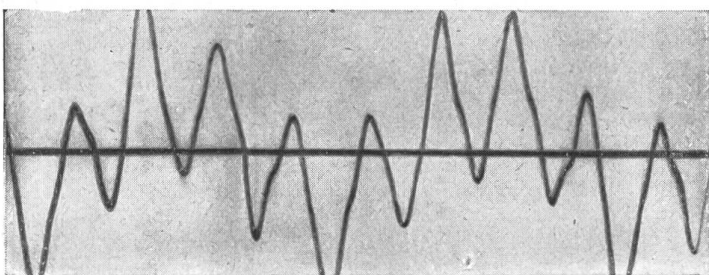


Fig. 2. (Cliché des Auteurs)  
Resultierende Schwingung der Komponenten der Fig. 1.

über das Leitungsgestänge miteinander verbunden. Diese Anordnung wirkt nun folgendermassen: Für den Drehstrom bildet die Dreiphasenwicklung einen künstlichen Nullpunkt, so dass im normalen Betrieb der vierte Leiter „O“ frei von Drehstromspannung bleibt. Die drei Komponenten des Dreiphasenflusses im Eisenkern des Transformators sind gegenseitig um  $120^\circ$  verschoben. Die drei sekundär erzeugten 50periodigen Teilspannungen bilden daher ein in sich geschlossenes gleichseitiges Dreieck, d. h. sie heben sich durch die Reihenschaltung der Niedervoltwicklungen auf. Der vom Einphasen-Generator links erzeugte Einphasenstrom magnetisiert dagegen jede der drei Transformatorwicklungen gleichphasig und transformiert daher seine Einphasen-EMK gleichsinnig auf alle Schenkel der Hochvoltseite; unter der Einwirkung dieser Einphasen-EMK kommt hochvoltseitig eine über- oder besser unterlagerte Einphasenschwingung zustande, die den vierten Leiter „O“ als Hinweg und die Drehstromleitung RST als Rückweg benutzt. Auf die Sekundärseite der normalen Drehstromtransformatoren kann die unterlagerte Einphasenspannung nicht gelangen, da alle drei Phasenleiter unter sich gleiches Potential haben und der Nullpunkt entweder isoliert oder über eine Petersenspule an Erde gelegt ist.

über das Leitungsgestänge miteinander verbunden. Diese Anordnung wirkt nun folgendermassen: Für den Drehstrom bildet die Dreiphasenwicklung einen künstlichen Nullpunkt, so dass im normalen Betrieb der vierte Leiter „O“ frei von Drehstromspannung bleibt. Die drei Komponenten des Dreiphasenflusses im Eisenkern des Transformators sind gegenseitig um  $120^\circ$  verschoben. Die drei sekundär erzeugten 50periodigen Teilspannungen bilden daher ein in sich geschlossenes gleichseitiges Dreieck, d. h. sie heben sich durch die Reihenschaltung der Niedervoltwicklungen auf. Der vom Einphasen-Generator links erzeugte Einphasenstrom magnetisiert dagegen jede der drei Transformatorwicklungen gleichphasig und transformiert daher seine Einphasen-EMK gleichsinnig auf alle Schenkel der Hochvoltseite; unter der Einwirkung dieser Einphasen-EMK kommt hochvoltseitig eine über- oder besser unterlagerte Einphasenschwingung zustande, die den vierten Leiter „O“ als Hinweg und die Drehstromleitung RST als Rückweg benutzt. Auf die Sekundärseite der normalen Drehstromtransformatoren kann die unterlagerte Einphasenspannung nicht gelangen, da alle drei Phasenleiter unter sich gleiches Potential haben und der Nullpunkt entweder isoliert oder über eine Petersenspule an Erde gelegt ist.

Das charakteristische dieser Schaltung, wegen des hierzu nötigen vierten Leiters *Vierleiterschaltung* genannt, ist nun die Spannungsverteilung, die sich bei dieser Anordnung einstellt. Setzen wir zunächst voraus, wir hätten ein Netz mit völlig

isoliertem Nullpunkt, also ohne Erdschlusspulen, dann verteilen sich die Spannungen auf den vier Leitern nach dem Verhältnis der Teilkapazitäten dieser Leiter. Die drei Drehstromphasen werden also zunächst einmal ihre gleich hohe Phasenspannung gegen Erde haben (z. B. 64 kV beim 110 kV-System) und der vierte Leiter wird keinerlei 50periodige Spannung führen, weil der Nullpunkt symmetrisch zum Drehstromsystem liegt. Die Einphasenspannung dagegen wird sich entsprechend dem Verhältnis der Teilkapazitäten der drei Drehstromleiter einerseits zum vierten Leiter andererseits zu  $\frac{3}{4}$  auf den vierten Leiter legen und nur zu  $\frac{1}{4}$  auf die Drehstromleiter, d. h. also: bei einer Bahnspannung von 60 kV überlagern sich im Drehstromsystem nur 15 kV, im vierten Leiter dagegen 45 kV. Das ist schon recht günstig, weil

die Isolationsbeanspruchung des Drehstromsystems durch die zusätzliche Bahnspannung dadurch in sehr geringen Grenzen bleibt. Hat das Drehstromsystem nun Erdschlusspulen, so wird die Spannungsverteilung noch günstiger, denn durch die Erdung des Drehstrom-Nullpunkts über die für  $16\frac{2}{3}$  Per/sec eine nur sehr geringe Reaktanz bildende Spule wird die Einphasenspannung völlig auf den vierten Leiter hinüberschoben, während die drei Drehstromleiter von zusätzlicher Einphasenspannung praktisch so gut wie frei bleiben. Diese Spannungsverteilung ist in den Fig. 4 bis 6 graphisch aufgetragen. In Fig. 4 sieht man, wie vom Nullpunkt aus die 50periodige Drehstromspannung bis zu den Wicklungsenden des Transformators ansteigt, in Höhe der Phasenspannung auf der Leitung liegen bleibt und in der Wicklung des Bahntransformators bis zu dessen Nullpunkt wieder den Wert 0 annimmt. Umgekehrt ist es

mit der  $16\frac{2}{3}$ -periodigen Einphasenspannung. Diese ist durch die Erdschlussspule innerhalb der Drehstromleitung auf dem Wert 0 festgehalten und steigt dann in der Wicklung des Bahntransformators bis auf den vollen Wert der verketteten Betriebsspannung (z. B. 60 kV) an, die dann auf dem vierten Leiter liegen bleibt. Wählt man also beispielsweise die verkettete Bahnspannung gleich der Drehstromphasenspannung, so haben im normalen Betrieb alle vier Leiter genau gleiches Potential gegenüber Erde. Man ersieht dies auch sehr deutlich aus Fig. 5, in welcher die Potentialverteilung bei 110 kV Drehstrom- und 66 kV Bahnstromspannung eingetragen ist. Die gleiche Figur veranschaulicht auch die Verhältnisse bei Erdschluss auf den einzelnen Leitern. Durch den Erdschluss wird die bei normalem Betrieb bestehende Symmetrie der Spannungsverteilung empfindlich gestört. Das ist schon bei der gewöhnlichen Drehstromübertragung so und naturgemäss erst recht bei Doppelfrequenzbetrieb. Wir unterscheiden zwei Fälle: Erdschluss auf einem Leiter des Drehstromsystems und Erdschluss des vierten Leiters. Im ersten Falle schwingt die Spannung der beiden gesunden Drehstromphasen wie üblich auf den verketteten Wert, die Spannung der erdgeschlossenen Phase geht auf Null herunter. Dagegen erhält jetzt der Nullpunkt der Dreiphasenwicklungen und damit auch der vierte Leiter eine 50periodige Vorspannung in Höhe der Drehstrom-Phasenspannung und darauf setzt sich die vorher schon bestehende Einphasen-Betriebsspannung, so dass die aus Fig. 5b ersichtlichen Spannungswerte resultierend zustande kommen. Im

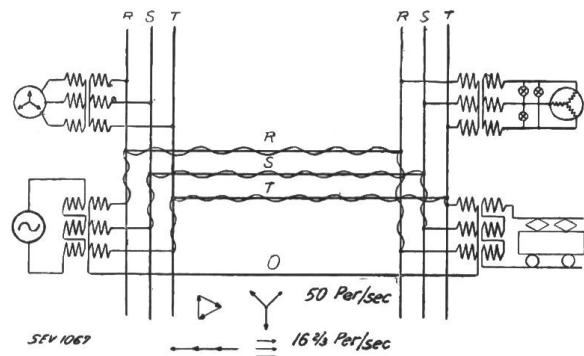


Fig. 3.  
Prinzip der Vierleiterschaltung.

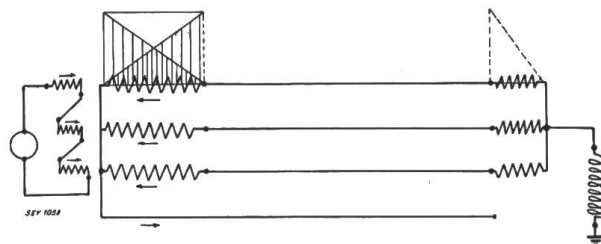


Fig. 4.  
Teilspannungen bei Doppelfrequenzbetrieb.

zweiten Fall geht die Spannung des erdgeschlossenen vierten Leiters auf Null herunter, die drei Drehstromleiter werden dadurch auf ihrer Drehstromphasenspannung festgehalten und hierauf setzt sich gleichphasig in allen drei Leitern die Einphasen-

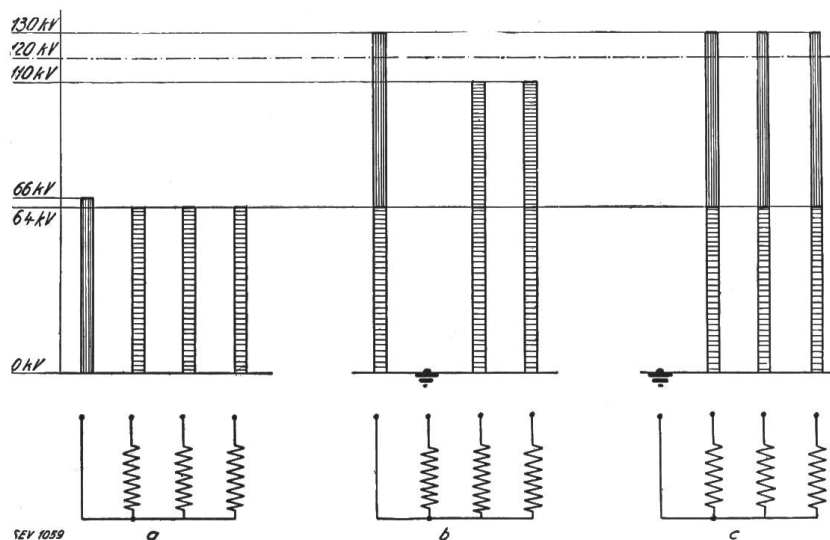


Fig. 5.

Potentialverteilung bei Doppelfrequenzbetrieb.

Betriebsspannung; Endwert siehe Fig. 5 c. In beiden Fällen überschreiten die höchsten auftretenden Spannungsbeanspruchungen nur um wenig die betriebsmässige Isolation, so dass in Anbetracht des Sicherheitsgrades der Isolation unserer Leitungen auch bei Erdschluss die resultierende Spannungsbeanspruchung ausgehalten werden kann. Für schweizerische Verhältnisse mit 60–66 kV Bahnspannung und 110–120 kV Drehstromspannung kann die Isolation der Drehstrom-

seite jedenfalls unverändert bleiben, während die Isolation der an die Simultanstrecke angeschlossenen Bahnunterwerke auf 120 kV bemessen werden muss.

Für deutsche Verhältnisse liegt die Sache etwas schwieriger, soweit die Bahnspannung von 110 kV beibehalten werden soll. Hierfür habe ich in jüngster Zeit folgende Variante entwickelt: In Fig. 6 ist eine Drehstromübertragung zwischen zwei mit Petersenspule versehenen Unterwerken dargestellt. Gleichzeitig wird auf der Drehstromleitung und über den hinzugefügten vierten Leiter Bahnstrom in der bisher geschilderten Weise übertragen. Die neuartige Ergänzung besteht darin, dass die drei Kesselölschalter der Bahntransformatoren beim Abschalten die drei freien Wicklungsenden der Bahntransformatoren an Erde, d. h. an das Erdseil der Leitung und möglichst zugleich auch an die Schienenerde des ganzen Bahnnetzes legen. Im normalen Betrieb sind die Bahntransformatoren also über die drei starken Kupferleiter der Drehstromleitung rückgeschlossen. Sobald jedoch im Drehstromnetz ein Erdschluss erfolgt, spricht ein Erdschlussrelais an und wirkt augenblicklich auf die drei Kesselölschalter der Bahntransformatoren dahin ein, dass diese jeden Bahntransformator vom Drehstromnetz trennen und einseitig an Erde legen. Solange die Drehstromphase an Erde liegt, wird automatisch auch das Bahnstromsystem einpolig an Erde gelegt, aber in einer Weise, die für diese Zeit eine Ueberlagerung des vierten Leiters mit der Drehstromphasenspannung ausschliesst, indem für die Dauer der Störung eine Abtrennung der beiden Netze voneinander stattfindet. Nach Beseitigung des Erdschlusses werden die Bahnstromtransformatoren wieder über die Drehstromleitung rückgeschlossen und die Erdseilverbindung aufgehoben. Erfolgt umgekehrt auf dem vierten Leiter ein Erdschluss, so wirken auch hier die dafür vorgesehenen Erdschlussrelais (abhängig von der  $16\frac{2}{3}$ -periodigen Spannung

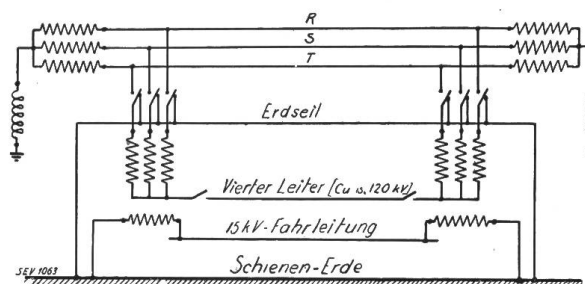


Fig. 6.

Prinzipschema der Mitübertragung von Bahnstrom beliebiger Spannung über Drehstromleitungen ohne Transformation des Bahnstromes am Anfang und Ende der mitbenutzten Leitung.



auf der Drehstromseite) auf die drei Kesselölschalter der Bahntransformatoren ein und legen die Bahntransformatoren auch auf der andern Seite an Erde unter Abtrennung vom Drehstromnetz. Hierdurch wird auf der erdschlussbehafteten Teilstrecke der Erdschluss zum Kurzschluss, und die betreffende Teilstrecke wird durch den normalen Ueberstromschutz selektiv abgeschaltet; auf den gesunden Leitungsteilen geht der Bahnstrombetrieb zunächst unter Rückschluss auf das Erdseil, dann wieder unter Rückschluss über die Drehstromleitung ungestört weiter.

Diese Anordnung gestattet vor allem die unmittelbare Mitübertragung von Bahnstrom beliebiger Spannung über Drehstromleitungen *ohne Transformation* des Bahnstroms am Anfang und Ende der mitbenutzten Leitung. Während des normalen Betriebes bieten sich dem Bahnstrom die grossen Kupferquerschnitte der Drehstromleitung, so dass wesentlich niedrigere Uebertragungsverluste entstehen; dagegen werden bei Störungen durch Erdschluss die unangenehmen Spannungserhöhungen einzelner Leiter auf die normalen verketteten Betriebsspannungen der einzelnen Systeme beschränkt, so dass keinerlei Ueberbeanspruchung der Isolation stattfindet bzw. keine höhere als die normale Isolation der Einzelsysteme nötig ist.

Die Fig. 7 bis 9 zeigen die einzelnen Bauelemente bei Doppelfrequenzbetrieb; Fig. 7 zeigt die Mastbilder, Fig. 8 die Transformatorschaltungen der Bahntransformatoren mit magnetischem Rückschluss.

Die Vereinigung von vier Transformatoren nebst Doppelsammelschiene zu einem Bahnunterwerk zeigt Fig. 9. Das Rückgrat dieses Unterwerks ist die Vierleiter-Doppelsammelschiene. Die zusammengehörenden 3+1 Leiter laufen je auf einem Querträger des Eisengerüsts. Symmetrisch in der Mitte laufen die beiden vierten Leiter. Von der Doppelsammelschiene laufen nach der einen Seite die Leitungsverbindungen, und zwar vier Seile als Einschleifung zu den Bahnstromleitern und zwei mal drei Seile als Rückführung des Bahnstroms zu den beiden Drehstromsystemen. Die Abtrennung der Leitungsverbindungen erfolgt in üblicher Weise über drei bzw. einen Kesselölschalter. Nach der andern Seite sind an die Doppelsammelschiene die Bahntransformatoren angeschlossen, jeder über einen einpoligen Oelschalter für den vierten Leiter und einen dreipoligen Oelschalter für die Rückführung zu den Drehstromleitern. Die 15 kV-Seite ist gegenüber der bisherigen Ausführung völlig unverändert.

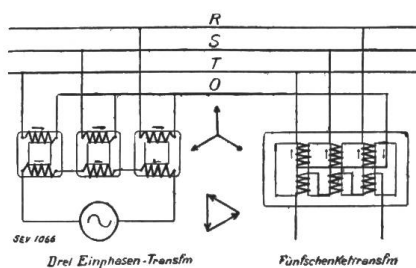


Fig. 8.  
Transformatorschaltungen.

tiert. Dabei zeigte sich, dass eine sehr übersichtliche und klare Gliederung von Sammelschiene, Transformatoren und Oelschaltern möglich ist, die hinter der eines gewöhnlichen Einphasen-Unterwerks nicht zurücksteht. Der Platzbedarf wird allerdings etwas grösser, nämlich 18000 m<sup>2</sup> gegenüber 16800 m<sup>2</sup> in gewöhnlicher Einphasenausführung. Die Kosten für den Hochvoltteil des Unterwerks betragen infolge der höheren Isolation der ganzen elektrischen Ausrüstung  $1,40 \times 10^6$  Mark gegenüber  $1,05 \times 10^6$  Mark bei gewöhnlicher Einphasenausführung bei 110 kV. Der *Hochvolt*teil des Unterwerks wird also um rund 33% teurer.

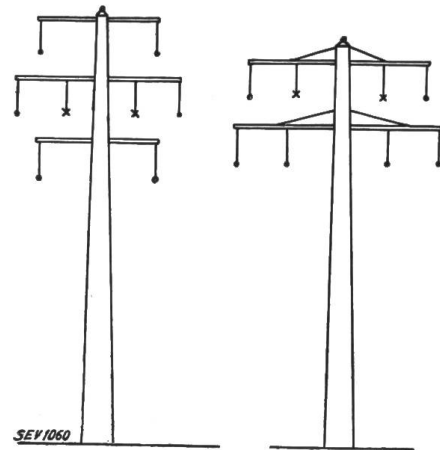


Fig. 7.  
Mastbilder bei Doppelfrequenzbetrieb.

Werden abwechselnd solche Bahnunterwerke in Vierleiterschaltung und normale Drehstrom-Umspannwerke an einen Leitungszug durch Einschleifung angeschlossen, so entsteht ein grösseres Doppelfrequenz-Uebertragungssystem, wie in Fig. 10 zu

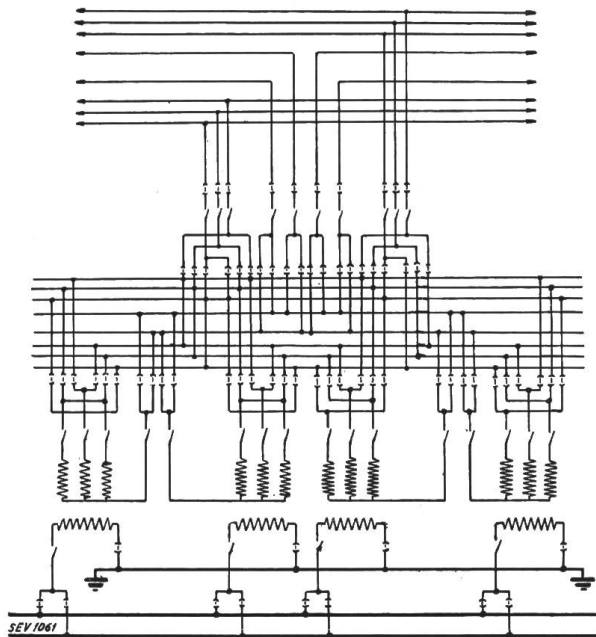


Fig. 9.

Generelles Schema eines Bahnunterwerkes 70 kV.

sehen ist. Auf diesem Bild ist zugleich dargestellt, wie der Bahnstrom eines normalen Zweileiter-Einphasensystems an geeigneter Stelle ohne Transformation über (für  $16\frac{2}{3}$  Per/sec reaktanzfreie) Nullpunktspeulen in das Drehstromsystem eingeführt werden kann. Dabei ist der oben besprochene Grundgedanke durchgeführt, dass im störungsfreien Betrieb das Drehstromsystem als Rückweg für den Einphasenstrom dient, während bei drehstromseitigem Erdschluss alle Bahntransformatoren und die Nullpunktspulen einpolig durch Relaisauslösung vom Drehstromsystem abgetrennt und an Erde gelegt werden; hierdurch entfallen bei Erdschluss alle zusätzlichen Potentialverschiebungen und es kann bei 110 kV-Isolation aller vier Leiter und angeschlossenen Apparate und Schalter 110 kV Drehstrom und 110 kV Bahnstrom übertragen werden. Verzichtet man auf die einpolige Abtrennung bei Erdschluss,

so kann die Bahnspannung nur auf 66–70 kV festgelegt werden, während die bahnseitige Isolation ca. 120 kV betragen muss. Das einpolige Schaltbild einer auf dieser Grundlage projektierten Doppelfrequenz-Uebertragung zeigt Fig. 11. Hier ist die von München her über Meitingen-Niederstotzingen-Stuttgart-Pforzheim nach Karlsruhe - Scheibenhart verlaufende Drehstrom-Doppelleitung nach Aufbringung zweier vierter Leiter zur Mitübertragung von Bahnstrom vorgesehen. An dieser Leitung hängen bereits sechs reine Drehstrom-Unterwerke; angeschlossen würden weitere vier Bahn-Unterwerke in Doppelfrequenz-Schaltung und ein Bahnkraftwerk, ausserdem eine Einführungsstelle für den teilweise aus dem bayerischen Einphasennetz zu beziehenden Bahnstrom. Die bisherigen Kostenberechnungen für dieses Projekt lassen folgendes erkennen:

Der Umbau einer bestehenden 110 kV-Leitung von sechs Leitern auf acht Leiter unter gleichzeitiger Verstärkung der Leitung gegen Torsion kostet pro km durchschnittlich ca. 12000 Mark bzw., wenn die Leitung schon verdrehungssicher ist, ca. 9000 Mark. Jedes Bahnunterwerk in Vierleiterschaltung kostet ca. 350000 Mark mehr als in normaler Zweileiteranordnung. Ausserdem müssen an der Anschaltstelle der Bahnunterwerke gewisse zusätzliche Leitungsbauten ausgeführt werden, je nach

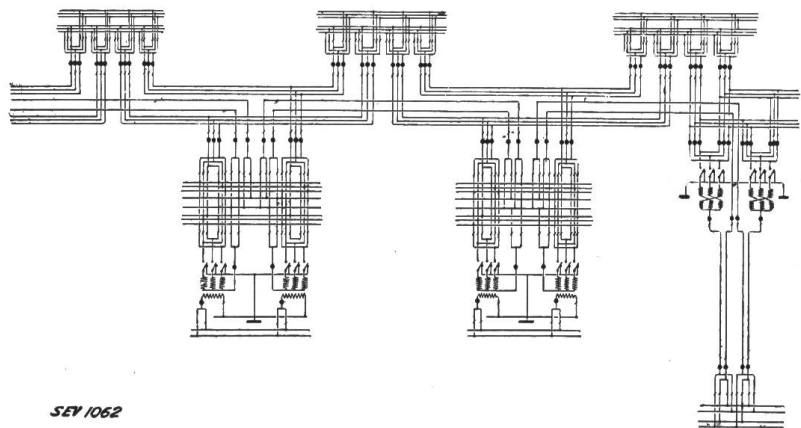


Fig. 10.

Vierleiterschaltung mit System-Trennung bei Erdschluss.  
Die grossen Punkte bedeuten Oelschalter, die schrägen Querstriche in den Leitern Trenner.

der geographischen Lage des Bahnunterwerks zur Drehstromleitung, die pro Unterwerk im Mittel mit ca. 60 000 Mark einzusetzen sind. Dafür kommt die besondere Einphasen-Doppelleitung mit ca. 25 000 Mark Baukosten pro km in Wegfall.

Der grundsätzliche Abgleich ergibt also für eine Netzlänge von beispielsweise 300 km mit vier Bahnunterwerken und einem Bahnkraftwerk

#### Mehrkosten :

Zwei weitere Lei-  
ter auf 300 km

$$\text{Länge} \quad . \quad . \quad . \quad 300 \cdot 12\,000 = 3,60 \cdot 10^6 \text{ M}$$

$$\text{Mehrkosten von} \\ 4 \text{ Unterwerken} \quad 4 \cdot 350\,000 = 1,40 \cdot 10^6 \text{ M}$$

$$\text{Mehrkosten für} \\ \text{Hochvoltteil des} \\ \text{Kraftwerks} \quad . \quad . \quad 1 \cdot 400\,000 = 0,40 \cdot 10^6 \text{ M}$$

$$\text{Mehrkosten für} \\ \text{vier zusätzliche} \\ \text{Einschleifungen} \quad 4 \cdot 60\,000 = 0,24 \cdot 10^6 \text{ M}$$

$$\underline{5,64 \cdot 10^6 \text{ M}}$$

#### Minderkosten :

Wegfall von 300  
km Doppellei-  
tung zu 25 000  
Mark . . . .

$$\underline{= 7,50 \cdot 10^6 \text{ M}}$$

#### Ersparnis :

Für 300 km Netz-  
länge . . . .

$$1,86 \cdot 10^6 \text{ M}$$

d. h. pro 100 km Netzlänge eine Ersparnis von 620 000 Mark = ca. 25% der Baukosten einer getrennten Einphasenleitung. Diese grundsätzlichen Ergebnisse gelten dann, wenn der Bahnstrom am Anfang und Ende der Doppelfrequenz-Betriebsstrecke entweder von einem in Vierleiterschaltung arbeitenden Bahnkraftwerk oder von einem getrennten Bahnnetz her ohne nochmalige Transformation eingeführt wird. Wird aus betrieblichen Gründen eine Aenderung der Spannung und daher eine Transformierung des Bahnstroms am Anfang oder Ende der Doppelfrequenzstrecke nötig, so bringt dies erhebliche zusätzliche Kosten, die in solchen Fällen keine grosse Ersparnis mehr übrig lassen.

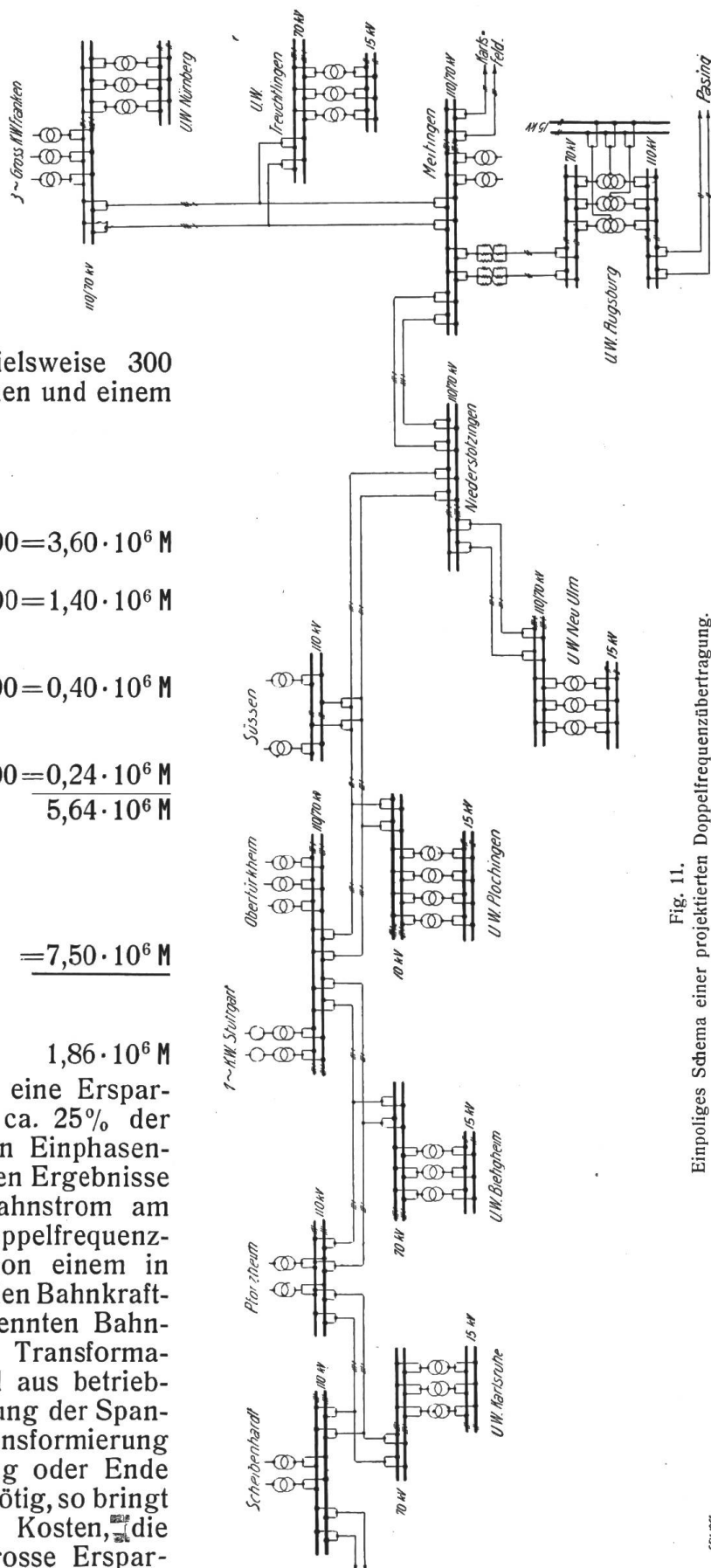


Fig. 11.  
Einpoliges Schema einer projektierten Doppelfrequenzübertragung.



Seine vollen wirtschaftlichen Vorteile entfaltet also der Doppelfrequenzbetrieb dort, wo Uebertragungen über grössere Streckenlängen mit einheitlicher Bahnbetriebsspannung vom Kraftwerk aus in Frage kommen; für kürzere Streckenlängen ist er wirtschaftlich nur dann günstig, wenn unter Benutzung der Abtrennung vom Drehstromnetz bei Erdschluss das Bahnstromsystem sich einpolig erden lässt, ohne dass eine elektrische Trennung der Simultan-Bahnstromstrecke von der normalen Einphasen-Leitungsstrecke verlangt wird.

## Statische Kondensatoren zur Verbesserung des Leistungsfaktors in ihrer Rückwirkung auf das Netz.

Von Max Hürbin, Ingenieur  
der Technischen Prüfanstalten des S. E. V., Zürich.

621.315+621.312(0065)

*Es wird gezeigt, dass die Kapazität eines an ein Verteilnetz angeschlossenen Kondensators mit der Induktivität des Netzes einen Schwingungskreis bildet, welcher durch Resonanzerscheinungen Anlass zu Verzerrungen der Strom- und Spannungskurve gibt. Die Grössenordnung der Induktivität eines Verteilnetzes ist aber derart, dass Resonanz nur mit Oberwellen zustande kommen kann. Anhand von theoretischen Ueberlegungen und Oszillogrammen wird untersucht, wie hoch in der Praxis derartige Resonanzüberspannungen werden können. Diese Ueberspannungen erreichen keine für die Isolation der Anlage gefährliche Höhe. Die Verzerrung der Spannungskurve ist im wesentlichen auf den Kondensator und die mit dessen Kapazität sich in Resonanz befindliche Induktivität, welche in der Hauptsache Streuinduktivität des direkt speisenden Transformators ist, beschränkt und tritt auf der Primärseite dieses Transformators nicht auf. Behandelt werden ferner Einschaltvorgänge und die zusätzlichen Verluste durch Oberströme. Zum Schlusse streift der Autor die Beeinflussung der Angaben der Messinstrumente durch verzerrte Strom- und Spannungskurven.*

*L'auteur montre que la capacité d'un condensateur branché sur un réseau de distribution constitue avec l'inductivité de celui-ci un circuit oscillant dont la résonance provoque la distorsion des courbes de courant et de tension. Mais l'ordre de grandeur de l'inductivité d'un réseau de distribution est tel que la résonance ne peut se produire qu'avec les harmoniques supérieurs. En partant de considérations théoriques et à l'aide d'oscillogrammes, l'auteur examine quelle amplitude peuvent atteindre dans la pratique des surtensions de résonance de ce genre. Ces surtensions ne sont pas dangereuses pour l'isolation de la ligne. La distorsion de la courbe de tension est localisée essentiellement au condensateur et à l'inductivité formant résonance avec lui, laquelle se compose principalement de l'inductivité par dispersion du transformateur d'alimentation directe; elle n'apparaît pas du côté primaire de ce transformateur. Cette étude traite ensuite des phénomènes d'enclenchement et des pertes additionnelles dues aux harmoniques. Pour finir l'auteur effleure l'influence de la distorsion des courbes de courant et de tension sur les indications des instruments de mesures.*

### Einleitung.

Statische Kondensatoren zur Verbesserung des Leistungsfaktors in Verteilnetzen gewinnen infolge ihrer Einfachheit in Bedienung und Aufbau und ihrer geringen Verluste in neuerer Zeit an Interesse. Auch die Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (E. K. Z.) haben dieser Kompensationsmethode ihre Aufmerksamkeit geschenkt und zur Abklärung derjenigen elektrischen Vorgänge, welche mit dem Anschluss von Kondensatoren verbunden sind, die Technischen Prüfanstalten des S. E. V. mit der Durchführung einer grösseren Anzahl oszillographischer Versuche beauftragt. Diese Untersuchungen wurden teils in den Unterwerken Thalwil und Aathal der E. K. Z., teils im Laboratorium der Technischen Prüfanstalten vorgenommen. Die vorliegende Arbeit soll nun die theoretischen Grundlagen zu den auf experimentellem Wege erhaltenen Ergebnissen liefern und zugleich die Schlussfolgerungen aus den sowohl durch Ueberlegung als durch Versuche gewonnenen Erkenntnisse ziehen.

### 1. Ursachen der Kurvenverzerrung.

Der sich aus dem Anschluss eines Kondensators an irgend einer Stelle eines Netzes ergebende Stromkreis kann immer durch das in Fig. 1 wiedergegebene Er-