

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 46 (1955)
Heft: 10

Rubrik: Energie-Erzeugung und -Verteilung : die Seiten des VSE

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: 11.01.2026

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

Energie-Erzeugung und -Verteilung

Die Seiten des VSE

Neuzeitliche Probleme der Stromversorgung für die elektrische Zugförderung

Von C. Th. Kromer, Freiburg i. Br.

621.331

Herr Prof. Dr. Ing. C. Th. Kromer hielt am 9. Dezember 1954 an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich eine Gastvorlesung über «Neuzeitliche Probleme der Stromversorgung für die elektrische Zugförderung». Mit seinem Einverständnis veröffentlichen wir hier auszugsweise diese Gastvorlesung, die auch für unsere Leser von Interesse sein dürfte. Der vollständige Wortlaut ist bereits in der Elektrizitätsverwertung¹⁾ erschienen.

Es werden die verschiedenen Möglichkeiten der Energieversorgung für die elektrische Zugförderung miteinander verglichen; der Wirkungsgrad sowie der Preis der erzeugten Energie werden für einige Beispiele errechnet, dabei werden auch die Probleme des Bahnbetriebes mit Einphasenstrom 50 Hz erörtert.

Le 9 décembre 1954, Monsieur le professeur C. Th. Kromer fut l'hôte de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich. Il prononça à cette occasion une conférence sur les «Problèmes d'actualité posés par l'alimentation en énergie des réseaux de traction électrique». Avec son accord, nous publions ici une partie de cette conférence, qui est certainement d'un grand intérêt pour nos lecteurs; le texte complet a déjà paru dans l'Electrique¹⁾.

L'auteur compare entre elles les différentes possibilités d'alimentation en énergie des réseaux de traction électrique; il calcule le rendement et le prix de l'énergie produite pour quelques exemples; il traite aussi à cette occasion des problèmes posés par la traction électrique en courant monophasé à 50 Hz.

Aus dem umfangreichen Fachgebiet der Stromversorgung für die elektrische Zugförderung sollen im folgenden einige neuzeitliche Probleme erläutert werden. Da vielfach noch keine einheitliche Meinung besteht, sich aber die verschiedenen Lösungen in den einzelnen Ländern bewährten, kann die vorliegende Arbeit, ohne in Einzelheiten zu gehen, vielleicht zum weiteren Nachdenken über diese Probleme anregen und das gegenseitige Verstehen zwischen den Bahnfachleuten und den Experten der Elektrizitätsversorgung fördern.

Über die Wirtschaftlichkeit der elektrischen Zugförderung bestehen heute in den Ländern, welche über gute Wasserkräfte oder Kohlevorkommen verfügen, wohl keine Zweifel mehr. Ländern mit billigen Ölvorkommen bieten sich wirtschaftliche Möglichkeiten in der Zugförderung mit Diesellokomotiven.

Der thermo-dynamische Wirkungsgrad der Dampfmaschine einer Lokomotive beträgt etwa 8 % — demgegenüber erlaubt ein modernes Dampfkraftwerk, den Strom bis zur elektrischen Lokomotive mit einem Wirkungsgrad von etwa 28 % anzuliefern. Rechnet man für die Dampflokomotive und für die elektrische Lokomotive mit einem Wirkungsgrad für das Triebwerk von 75 %, so ergibt sich für die Dampflokomotive ein Wirkungsgrad von insgesamt 6 % gegenüber 21 % für die elektrische Lokomotive, die Strom aus Dampfkraftwerken bezieht. Dies in anderer Form ausgedrückt, bedeutet, dass man auf einer Dampflokomotive etwa drei- bis viermal so viel Kohle verbraucht als auf jener elektrischen Lokomotive.

In Westeuropa sind heute etwa 28 000 km Eisenbahnen elektrifiziert, die jährlich über 7500 GWh

verbrauchen oder 270 000 kWh je Fahrkilometer. Etwa die Hälfte wird mit Einphasenstrom 16²/₃ Hz betrieben, etwa 45 % fahren mit Gleichstrom und der Rest mit Einphasenstrom 50 Hz oder mit Drehstrom.

Die Frage des Stromsystems berührt sowohl die Bahnverwaltung als auch die Versorgungsunternehmen. Will man sich über diese Probleme unterhalten, sollte man an einige Fragen denken, die sich aus der Entwicklung und der Erfahrung im elektrischen Zugbetrieb ergeben.

Eine der wichtigsten Grundlagen für die Mechanik des Zugbetriebes ist die Ausnutzung des Adhäsionsgewichts und damit der Adhäsionskoeffizient zwischen Rad und Schiene. Dieses Verhältnis ist um so günstiger, je gleichförmiger das Drehmoment des Antriebsmotors der Lokomotive ist. Von den elektrischen Maschinen mit Reihenschluss-Charakteristik hat zweifelsohne der mit Gleichstrom betriebene Motor in dieser Hinsicht die besten Eigenschaften. Umformerlokomotiven, welche 50-Hz- oder 16²/₃-Hz-Strom aus dem Fahrdrabt nehmen und ihn in rotierenden Umformern in Gleichstrom wandeln, bieten dazu die stufenlose Reguliermöglichkeit und schaffen so das ideale Charakteristikum durch die Leonard-Schaltung. Diese beiden Eigenschaften sind sehr erwünscht, vor allem für schwere Güterzüge und im Gebirge.

Der Gleichstrommotor, zu Anfang des Jahrhunderts der einzige Motor für Bahnbetrieb, hat sich bis heute gehalten, und wir finden mit Gleichstrom betriebene, grosse Bahnstromnetze in Frankreich, Italien und den USA. Dort sind Spannungen von 1500 oder 3000 Volt üblich; doch die erheblichen Verluste im Fahrdrabt zwingen zu Speisepunkten auf kurze Entfernungen. Deren Stromversorgung er-

¹⁾ Elektr. Verwertg. Bd. 30(1955), Nr. 1—2, S. 1...11.

¹⁾ L'Electrique, t. 30(1955), n° 1—2, p. 1...11.

folgt in der Regel aus dem Landesnetz mit 50 Hz und Umformung in Bahnunterwerken über Gleichrichter in Gleichstrom der genannten Spannungen. Dies hat sich bewährt, und man weiss vorläufig nichts anderes, es sei, man erhöhe überall die Spannung von 1500 auf 3000 Volt. Der dann grösser werdende Abstand der Unterwerke spart Verluste.

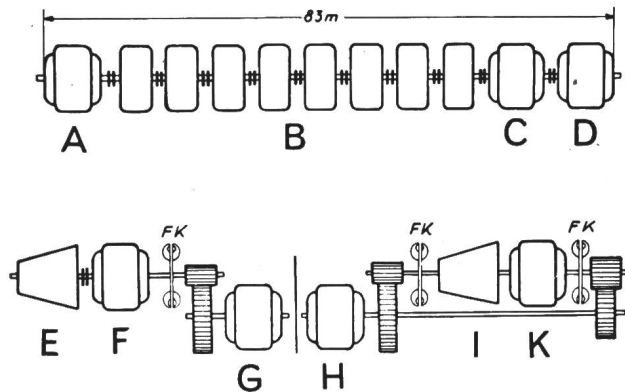


Fig. 1

Gemeinsame Erzeugung von Drehstrom 50 Hz und Einphasenstrom 16 $\frac{2}{3}$ Hz

Oben: Pfrombach — Unten: Marguerre

- A Drehstromgenerator 17,5 MVA
- B 8 Francis-Spezialturbinen zu je 3,5 MW, $n = 250$ U./m
- C Einphasengenerator 20 MVA
- D Drehstrommotor 17,5 MVA
- E Turbine 50 MW
- F Drehstromgenerator 35 MW
- G Einphasengenerator 12/15 MW
- H Einphasengenerator
- I Turbine
- K Drehstromgenerator

Eine neue, interessante Lokomotive für Gleichstrom ist die französische CC-Lokomotive, welche auf einer Versuchsfahrt zwischen Paris und Lyon die für den Bahnbetrieb ausserordentlich hohe Geschwindigkeit von 243 km pro Stunde erreichte.

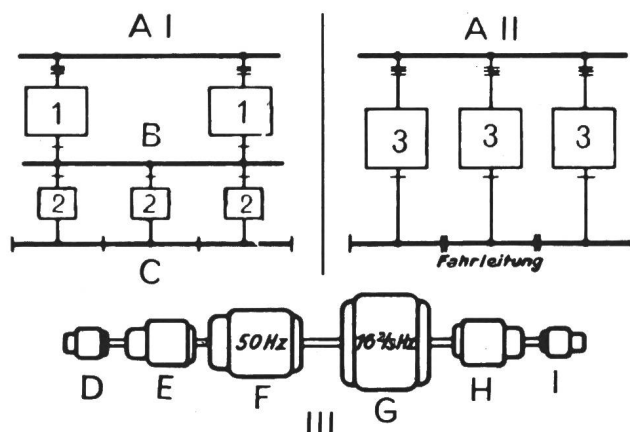


Fig. 2

Umformer 50 Hz/16 $\frac{2}{3}$ Hz

- I Zentrale Umformung
- II Dezentrale Umformung
- III Elastische Umformung
- A Landnetz 110 kV, 50 Hz
- B Netz 110 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz
- C Fahrleitung
- D Frequenzumformer
- E Hintermaschine
- F Motor 50 Hz
- G Generator 16 $\frac{2}{3}$ Hz
- H Haupterregter
- J Hilfsrerregter
- 1 Umformerwerk
- 2 Unterwerk
- 3 Umformerunterwerk

Andere europäische Länder, so die Schweiz, Deutschland, Österreich, Schweden und Norwegen, haben sich für den Bahnbetrieb zum Einphasen-

strom mit 16 $\frac{2}{3}$ Hz entschieden. Hierbei kommt man mit wesentlich weniger Unterwerken aus, weil die Fahrdrachtspannung 15 000 Volt beträgt. Vor allem wegen der Kommutierung entschloss man sich zu 16 $\frac{2}{3}$ Hz. Der hierfür entwickelte Einphasenmotor hat sich bewährt, und er ist in den genannten Ländern an der Zugförderung hervorragend beteiligt. Eine weitere interessante Ausführung, und zwar als Triebwagen, ist der neue Leichttriebwagen der Bern—Lötschberg—Simplon-Bahn, welcher für 16 $\frac{2}{3}$ Hz gebaut ist, aber jederzeit mit einer Einrichtung versehen werden kann, um auch auf Strecken mit Gleichstrom 1500 oder 3000 Volt fahren zu können.

Die Technik bei der Bahnversorgung mit Einphasenstrom 16 $\frac{2}{3}$ Hz ist recht verschieden. Die Fig. 1 und 2 zeigen einige Möglichkeiten. Man kann also mit Wasser- oder Dampfturbinen einen Einphasengenerator kuppeln, der auf das Bahnnetz arbeitet. Dabei kann man einen Drehstromgenerator ankuppeln, damit er zu bestimmten Zeiten als Motor an Stelle der Turbine den Einphasengenerator antreibt, gleichsam als Umformerbetrieb.

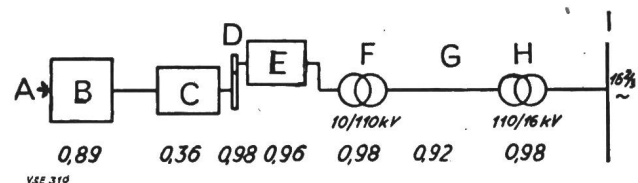


Fig. 3

Wirkungsgrade

bei thermischer Einphasenerzeugung 16 $\frac{2}{3}$ Hz

Kraftwerk-Wirkungsgrad:

$$\eta_k = 0,89 \cdot 0,36 \cdot 0,98 \cdot 0,96 = 0,30$$

Wirkungsgrad der Übertragung:

$$\eta_u = 0,92 \cdot 0,98 = 0,90$$

Gesamtwirkungsgrad (bei einem Betriebsfaktor von 0,90):

$$\eta_T = (0,90 \cdot 0,30) \cdot 0,90 = \eta_k' \cdot 0,90 = 0,27 \cdot 0,90$$

$$\eta_T = 0,24$$

- A Kohle
- B Kessel 70 at
- C Dampfturbine 25 MW
- D Getriebe
- E Einphasenstrom-Generator 16 $\frac{2}{3}$ Hz
- F Transformator 10/110 kV
- G Fernleitung
- H Transformator 110/16 kV
- I Fahrdracht (16 $\frac{2}{3}$ Hz)

Der normale Asynchron-Synchron-Umformer für 50 Hz auf 16 $\frac{2}{3}$ Hz, aufgestellt in der Nähe des Kraftwerkes oder in Unterwerken an der Bahn, lässt das 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnnetz aus dem 50-Hz-Landesnetz versorgen.

Für diese Möglichkeiten, 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Einphasenstrom bereitzustellen, sind für folgende Fälle die Wirkungsgrade von der Kohle bis zur Fahrleitung gegenübergestellt:

- a) Erzeugung von Einphasenstrom in Dampfkraftwerken (Fig. 3);
- b) Erzeugung von Einphasenstrom zusammen mit Drehstrom in Dampfkraftwerken in einem Aggregat (Fig. 4);

c) Erzeugung von Drehstrom in Dampfkraftwerken und Umformung in Einphasenstrom mit rotierenden Umformern (Fig. 5).

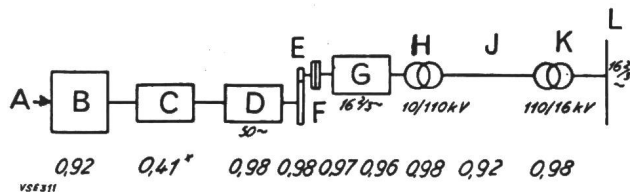


Fig. 4

Wirkungsgrade bei thermischer Erzeugung von Einphasenstrom 16 $\frac{2}{3}$ Hz zusammen mit Drehstrom 50 Hz in einem Aggregat

$$\begin{aligned}\eta_k &= 0,92 \cdot 0,41 \cdot 0,98 \cdot 0,97 \cdot 0,96 \cdot 0,98 = 0,34 \\ \eta_u &= 0,92 \cdot 0,98 = 0,90 \quad \text{Betriebsfaktor: } 0,90 \\ \eta_T &= (0,90 \cdot 0,34) \cdot 0,90 = \eta_k' \cdot 0,90 = 0,31 \cdot 0,90 \\ &\quad \eta_T = \mathbf{0,28}\end{aligned}$$

In der Zahl 0,41 ist die Vorschaltturbine berücksichtigt.

- | | |
|----------------------------|---------------------------|
| A Kohle | G Einphasenstrom- |
| B Kessel 115 at | Generator 16% Hz |
| C Dampfturbine 40 MW | H Transformator 10/110 kV |
| D Drehstromgenerator 50 Hz | J Fernleitung |
| E Getriebe | K Transformator 110/16 kV |
| F Kupplung | L Fährdraht (16% Hz) |

Da Gleiches mit Gleichem verglichen wird, ist es wohl statthaft, die verschiedenen Wirkungsgradarten einander gegenüber zu stellen, nämlich thermische, mechanische und elektrische. So seien die Wirkungsgrade in ihrem Endprodukt die energie-wirtschaftlichen Wirkungsgrade.

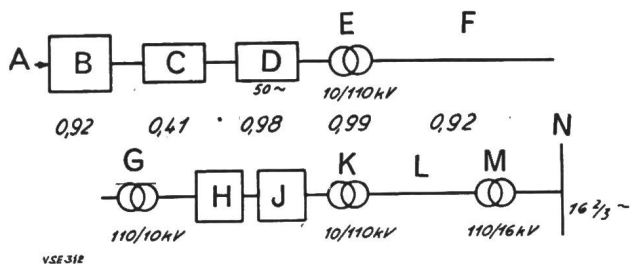


Fig. 5

Wirkungsgrade bei thermischer Erzeugung von Drehstrom und Umformung in Einphasenstrom mit rotierenden Umformern

$$\begin{aligned}\eta_k &= 0,92 \cdot 0,41 \cdot 0,98 \cdot 0,99 = 0,37 \\ \eta_u &= 0,92 \cdot 0,99 \cdot 0,93 \cdot 0,98 \cdot 0,92 \cdot 0,98 = 0,75 \\ \text{Betriebsfaktor: } &0,92 \\ \eta_T &= (0,37 \cdot 0,92) \cdot 0,75 = \eta_{k'} \cdot 0,75 = 0,34 \cdot 0,75 \\ &\eta_T = 0,26\end{aligned}$$

- | | | |
|----------------------------|---|-------------------------|
| A Kohle | H | Umformer 50 Hz/16 % Hz |
| B Kessel 115 at | J | |
| C Dampfturbine 60 MW | K | Transformator 10/110 kV |
| D Drehstromgenerator 50 Hz | L | Fernleitung |
| E Transformator 10/110 kV | M | Transformator 110/16 kV |
| F Fernleitung | N | Fahrdraht (16% Hz) |
| G Transformator 110/10 kV | | |

Das Ergebnis, bezogen auf die Fahrleitung, ist, dass die Erzeugung von Einphasenstrom in Dampfkraftwerken (Fig. 3) den schlechtesten Wirkungs-

grad hat. Die Ursache liegt vor allem in dem niedrigen Wirkungsgrad der Einphasen-Turbo-Aggregate, welche heute in der Grössenordnung von bis zu 25 MW gebaut werden und daher nicht so vorteilhaft sein können wie die viel grösseren Drehstrom-Aggregate moderner Dampfkraftwerke. Etwas günstiger ist es, Drehstrom zu erzeugen und den über rotierende Umformer bereitgestellten $16^{2/3}$ -Hz-Einphasenstrom über eine 100-kV-Leitung entlang der Bahnlinie zu verteilen (Fig. 5).

Den günstigsten Wirkungsgrad erreicht man durch Kupplung eines Drehstrom-Turbo-Aggregates mit Einphasengenerator (Fig. 4), eine Anordnung, die im Grosskraftwerk Mannheim durch Dr. Marguerre erstmals verwendet wurde. Bei dieser Lösung kommen die hohen Wirkungsgrade grosser Drehstrom-Turbo-Aggregate mit hohem Dampfzustand und Zwischenüberhitzung dem Einphasen-Generator zugute, der über ein Getriebe und eine hydraulische Kupplung mit jenem Turbo-Aggregat gekuppelt ist (Fig. 6).

Tabelle I

	Kosten der Energie (16 2/3 Hz) Pfg./kWh			
	110 kV am Unterwerk		16 kV am Fahrdrabt	
	4000 h	5000 h	4000 h	5000 h
Einphasen-Erzeugung 16 2/3 Hz	5,94	5,44	6,39	5,81
Einphasen-Erzeugung 16 2/3 Hz, Maschine mit Drehstromteil 50 Hz	5,43	4,96	5,87	5,32
Drehstrom-Erzeugung 50 Hz und Umformung 50 Hz/16 2/3 Hz	4,88	4,50	6,34 7,16	5,76 6,49

Ermittelt man ausser den Wirkungsgraden auch die effektiven Stromkosten in Pfg. je kWh (Tab. I) aus den Anlagekapitalien für Kraftwerk, Fernleitung, Unterwerk und Umformerwerk, so ergibt sich folgendes:

Die Stromkosten aus Einphasen-Generatoren (Fig. 3) betragen am Fahrdraht bei 4000 Benutzungsstunden etwa 6,39 Pfg., bei Einphasenerzeugung nach System Marguerre (Fig. 4) 5,87 Pfg. und bei Erzeugung von Drehstrom und Umformung in rotierenden Umformern 6,34 Pfg., dies wenn unmittelbar beim Umformerwerk in den Fahrdraht eingespeist wird; dagegen 7,16 Pfg., wenn der Strom auf 110-kV-Leitungen mit $16\frac{2}{3}$ Hz noch weiter

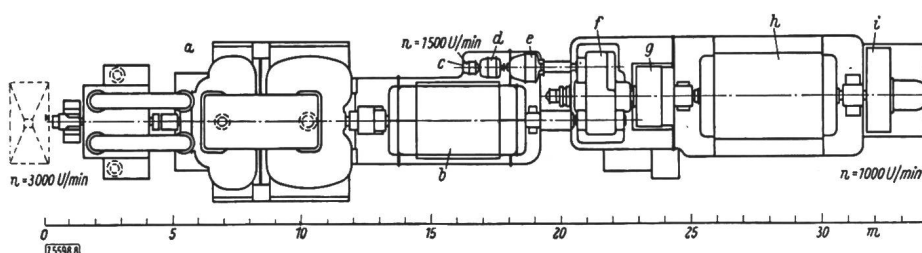


Fig. 6

Maschinengruppe zur Erzeugung von Einphasenstrom 16 $\frac{2}{3}$ Hz zusammen mit Drehstrom 50 Hz (System Marguerre)

- | | | | | | | | |
|---|---------------------------|---|--------------------|---|------------------------------|---|-----------------------------|
| a | Dampfturbine 40 MW | c | Hilfserregmaschine | f | Getriebe 3 : 1 | h | Einphasengenerator 16,3 MVA |
| b | Drehstromgenerator 40 MVA | d | Erregmaschine zu b | g | Voith-Marguerre-Netzkupplung | i | Ventilator für h |
| | | e | Erregmaschine zu h | | | n | Drehzahl |

transportiert werden muss (Fig. 5). Setzt man an Stelle der Stromkosten die Einphasenerzeugung nach Fig. 3 = 100 %, so ergibt sich für die Bereitstellung nach Fig. 4 nur 91 % und nach Fig. 5 etwa 99 % bzw. 110 %.

Man begründet diese Art im wesentlichen damit, dass der Drehstrom sehr billig zur Verfügung stünde. Man hat in Schweden kein gesondertes 110-kV-Bahnstromnetz, sondern speist über jene starren Umformer unmittelbar in das Fahrleitungsnetz.

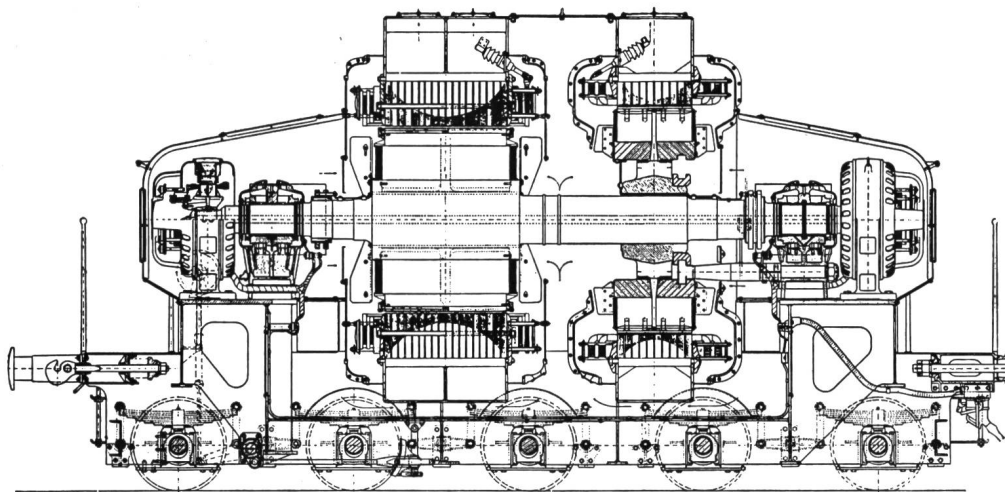


Fig. 7
Fahrbarer Synchron-Synchron-Umformer

Neben solchen Berechnungen sind auch betriebliche Überlegungen zu beachten. Hierzu gehört vor allem die Reservehaltung. Eine weitere Überlegung ist, dass in Ländern, wo auch Wasserkraftenergie vorhanden ist, die Stromerzeugung aus Dampfkraftwerken oft verbilligt werden kann besonders dann, wenn solche Wasserkraftenergie in den Sommermonaten zur Verfügung steht. Bei der Erzeugung von Einphasenstrom in besonderen Maschinen nach Fig. 3 und Fig. 4 ist die Reserve nicht so eindeutig. Es käme hier auf den einzelnen Fall an, also ob und inwieweit man für eine Reserve sorgen will. Länder wie die Schweiz und Österreich haben gute Erfahrungen gemacht mit der Erstellung eigener Bahnkraftwerke und mit Gemeinschaftswerken, in welchen Einphasenstrom und Drehstrom erzeugt wird.

Ein einfaches Beispiel für die Stromversorgung aus dem 50-Hz-Verbundnetz bietet Schweden¹⁾, wo der 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Einphasenstrom über kleine Synchron-Synchron-Umformer (Fig. 7) bereitgestellt wird.

Neuerdings wird in Österreich für die Strecke Wien—Salzburg ein grosser 25-MW-Asynchron-Synchron-Umformer in Wien aufgestellt, welcher aus dem Verbundnetz von 50 Hz auf 16 $\frac{2}{3}$ Hz umformt. Das Schaltbild eines solchen Umformers zeigt Fig. 8.

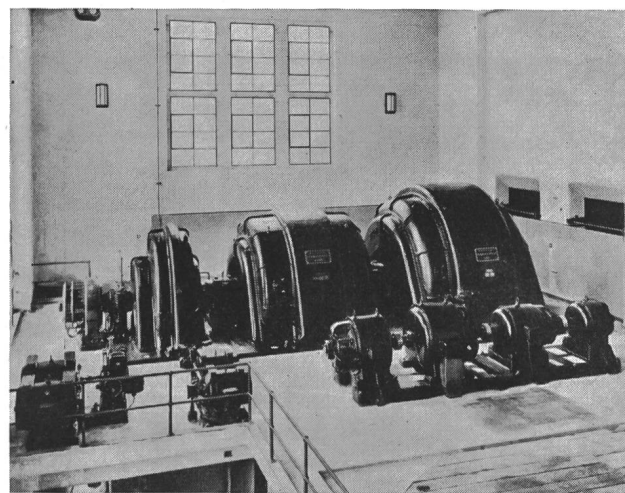


Fig. 9
Frequenzumformergruppe 50 Hz/16 $\frac{2}{3}$ Hz, 10 625 kVA

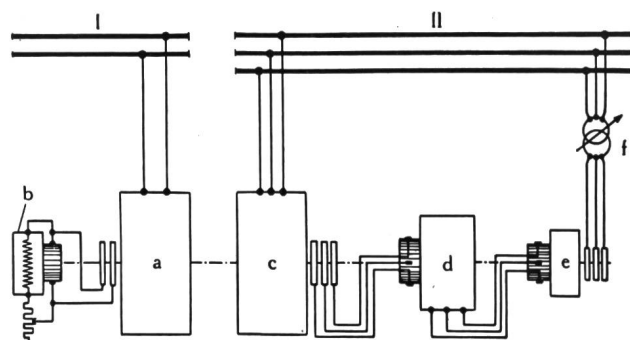


Fig. 8

Schaltbild einer elastischen Netzkupplungs-Umformergruppe

- | | |
|-------------------------------------|--|
| I Einphasennetz 16 $\frac{2}{3}$ Hz | d Scherbiusmaschine (Reguliermaschine zu c) |
| II Dreiphasennetz 50 Hz | e Frequenzwandler (Erregung der Scherbiusmaschine) |
| a Einphasen-Synchronmaschine | f Induktionsregler |
| b Erregermaschine zu a | |
| c Dreiphasen-Asynchronmaschine | |

Die Schweizerischen Bundesbahnen betreiben eigene Wasserkraftwerke mit Einphasenerzeugung. Gemeinsam mit den Elektrizitätswerken der allgemeinen Versorgung betreiben sie auch Gemeinschaftswerke wie Rapperswil-Auenstein und Etzelwerk, in denen für den Bahnbedarf getrennte Einphasen-Generatoren aufgestellt sind. Ausserdem wird aus dem öffentlichen Netz Drehstrom bezogen und in Asynchron-Synchron-Umformern (Fig. 9) oder Synchron-Synchron-Umformern in Einphasenstrom umgeformt.

¹⁾ Th. Thelander. Electrification of the Swedish State Railways in its Engineering and Economic Aspects.

Bei der Deutschen Bundesbahn erfolgt die Belieferung aus eigenen Wasserkraftgeneratoren, ferner aus bahneigenen Dampfkraftwerken mit Einphasen-Einheiten (Fig. 10) und aus Kraftwerken der öffentlichen Versorgung, in denen die Bundesbahn eigene Einphasen-Generatoren aufgestellt hat

Stromversorgung, ausserdem werden Asynchron-Synchron-Umformer aufgestellt. Den Aufbau eines Umformers für diese Art der Bahnstromversorgung zeigt Fig. 12.

Die Bahnverwaltungen legen oft Wert darauf, eigene Einphasen-Generatoren in öffentlichen Kraft-

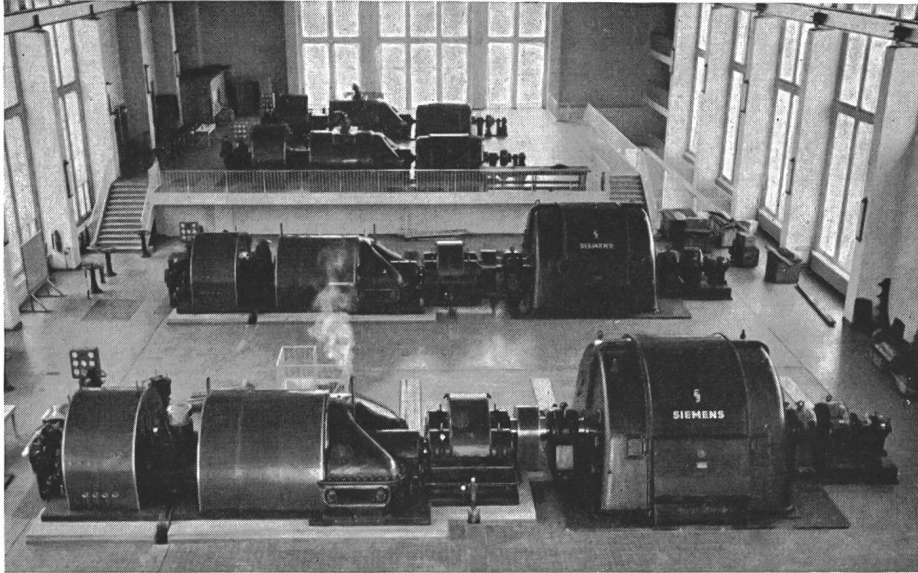


Fig. 10

Kraftwerk Penzberg der Deutschen Bundesbahn: 2 Bahnturbosätze 10/12,5 MW

(Fig. 11). Für die Belieferung der im Bau befindlichen Elektrifizierung der badischen Strecken stellt die Bundesbahn in Karlsruhe einen Asynchron-Synchron-Umformer auf, der Strom aus dem Netz des Badenwerkes mit 50 Hz erhält und Einphasenstrom

werken aufzustellen. Das mag in bestimmten Fällen möglich und auch richtig sein. Es gibt anderseits Fälle, wo sich ein Einphasen-Satz in die betriebliche Eigenart eines grossen Drehstrom-Kraftwerkes wenig anlehnend einfügen lässt. Dies trifft zu für

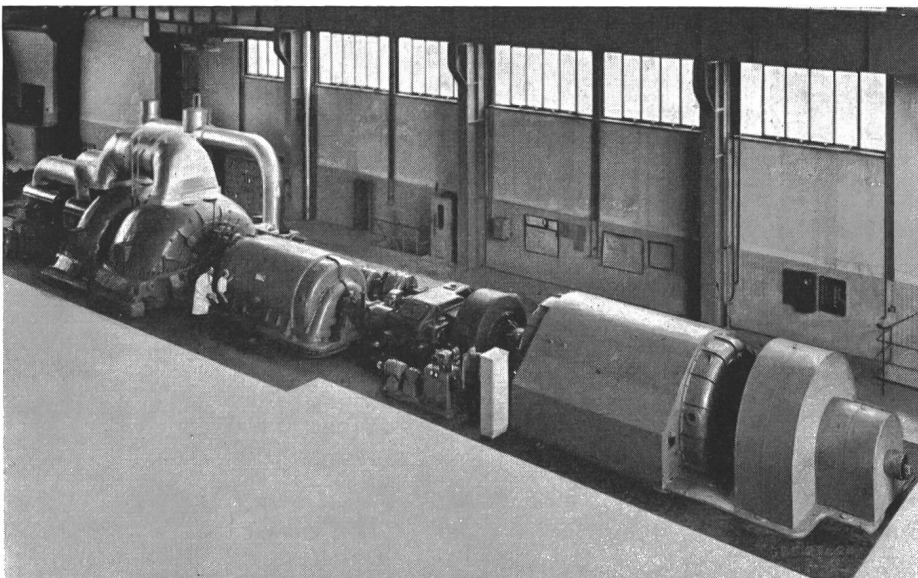


Fig. 11

Dreiphasen-Einphasen-Turbogruppe 40 MW

liefert. Die Aufstellung eines weiteren derartigen Umformers an der Strecke Basel-Karlsruhe ist vorgesehen. Bei der Bahnelektrifizierung im Ruhrgebiet bedient man sich zunächst eines Einphasen-Turbosatzes in einem Kraftwerk der öffentlichen

Kraftwerke in Blockbauweise. Dort pflegt man gleiche Kessel und gleiche Maschinen aufzustellen und sie blockweise zu betreiben. In einem solchen Kraftwerk würde beispielsweise die Einfügung eines Maschinensatzes System Marguerre oder eines Ein-

phasen-Satzes üblicher Bauweise die Gliederung des Kraftwerkes so wesentlich beeinflussen, dass Übersicht und Betrieb Not litten, abgesehen von der baulichen Unsymmetrie (Fig. 13).

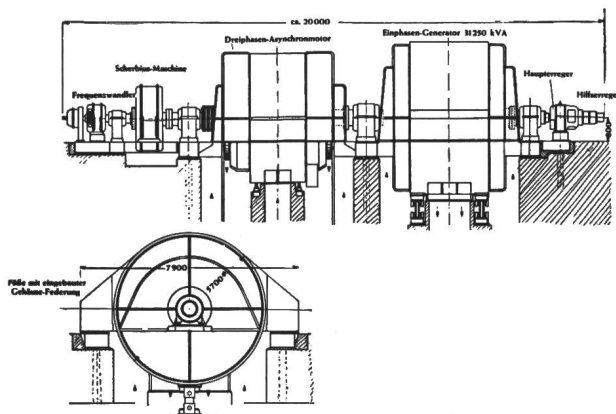


Fig. 12

Elastischer Netzkupplungsumformer 50 Hz/16⅔ Hz

Bei Laufwasserkraftwerken fügen sich Einphasen-Generatoren nicht in allen Fällen so in die Betriebsweise mit Drehstrom-Generatoren ein, dass die Dispositionsmöglichkeit in der Verteilung des nutzbaren Wassers nicht eingeengt würde. Dies gilt vor allem, wenn mehrere Drehstrom-Generatoren vorhanden sind und diese in einem Gemeinschaftswerk verschiedenen Partnern gehören. Besonders ein-

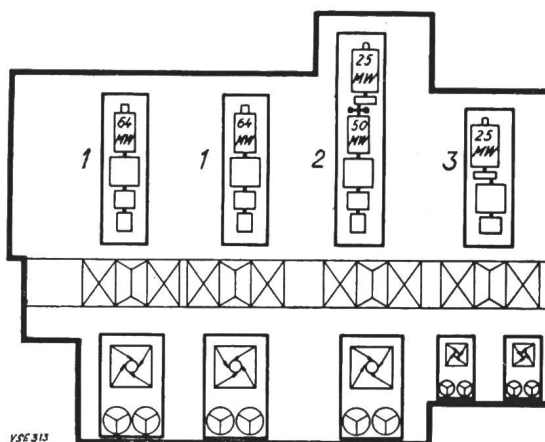


Fig. 13

Gemischte Aufstellung von Dreh- und Einphasenstromgeneratoren in einem Block-Kraftwerk

schränkend wäre es bei Grenzkraftwerken, wo die Verteilung der Energie und der Stromaustausch über die Grenze greifen und deshalb einheitliche Maschinenaggregate voraussetzen. Ein besonderes Hemmnis dieser Art entstünde bei schlechter Wasserführung, also dann, wenn nicht alle Maschinen beaufschlagt werden können.

Bei dem Vergleich der Stromversorgung mit Einphasenstrom kann man keine einheitliche Regel aufstellen. Länder mit Wasserkraft zeigen andere Verhältnisse als Länder, die sich nur der Dampfkraft für ihre Bahnstromversorgung bedienen können. Systeme, welche in Jahrzehnten entwickelt und

angewendet wurden, sind anders zu beurteilen als die Wünsche für die Elektrifizierung ausgedehnter neuer Bahnlinien. So kommt es, dass in solchen Ländern man unabhängig von den bekannten Systemen überlegen kann, wie man die Bahnelektrifizierung billiger gestalten könnte, und dies in enger Zusammenarbeit mit der bereits ausgebauten Landesversorgung. So möge auch einiges über die Stromversorgung von Bahnnetzen mit Einphasenstrom 50 Hz unmittelbar aus dem Landesnetz gesagt sein.

In Deutschland wurden die grundlegenden Versuche für den Bahnbetrieb mit Einphasenstrom 50 Hz auf der Höllentalbahn (Schwarzwald) gemacht²⁾. Die französischen Bahnen haben sie auf ihrer Strecke Aix-les-Bains—La Roche sur Foron erfolgreich fortgesetzt. Das günstige Ergebnis führte dazu, auch schwerbelastete Strecken nach diesem System auszubauen, z. B. die Strecke Valenciennes—Thionville.

Die Rückwirkung des 50-Hz-Bahnbetriebes auf die grossen Drehstromverbundnetze ist nach den gemachten Erfahrungen und nach Ansicht der Fachleute nicht schädlich. Die Netze sind in ihrer Kapazität so gross geworden, dass sich die einzelnen Leistungen, die auch zwischen verschiedene Phasen gelegt werden können, kaum oder unbedeutend auswirken. In den USA liegen bereits Erfahrungen vor über die Rückwirkung der Ignitron-Gleichrichter von Umformerlokomotiven auf die Landesnetze hinsichtlich Oberwellen. Für Europa fehlen solche Unterlagen. So werden Schaltungen auf solchen Umformerlokomotiven vorgeschlagen, welche zweifelsohne den Oberwellengehalt des Primärstromes dieser Gleichrichter vermeiden lassen. Es werden also Oberwellen in ihrer Rückwirkung auf das 50-Hz-Netz weit weniger ins Gewicht fallen, weil es sich nicht um so grosse Einheiten handelt, wie es die Gleichrichter der elektrochemischen Grossbetriebe darstellen, deren Rückwirkungen auf das Netz hinsichtlich ihrer Oberwelligkeit beherrscht werden können. Die Meinung der Elektrizitätswerke neigt also auch vom technischen Standpunkt aus durchaus zu dieser Art des Zugbetriebes.

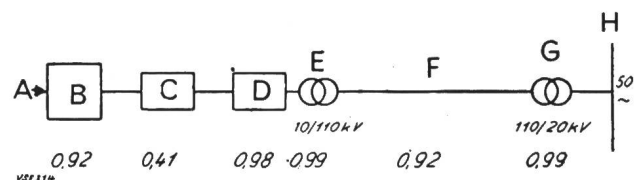


Fig. 14

Wirkungsgrade und Stromkosten bei 50-Hz-Bahnbetrieb (thermische Erzeugung)

$$\begin{aligned}\eta_k &= 0.92 \cdot 0.41 \cdot 0.98 \cdot 0.99 = 0.37 \\ \eta_u &= 0.92 \cdot 0.99 = 0.91 \\ \text{Betriebsfaktor: } 0.92 \\ \eta_T &= (0.92 \cdot 0.37) \cdot 0.91 = \eta_k \cdot 0.91 = 0.34 \cdot 0.91 \\ \eta_T &= 0.31\end{aligned}$$

Stromkosten:

5.23 Pfg./kWh bei einer Benützungsdauer von 4000 h	
4.79 Pfg./kWh bei einer Benützungsdauer von 5000 h	
A Kohle	E Transformator 10/110 kV
B Kessel 115 at	F Fernleitung
C Dampfturbine	G Transformator 110/20 kV
D Drehstromgenerator 50 Hz	H Fahrdrat (50 Hz)

²⁾ Vergl. auch Bull. SEV Bd. 46(1955), Nr. 1, S. 34...40

Die wirtschaftlichen Überlegungen für den Bahnbetrieb mit 50 Hz liegen für die Bereitstellung der elektrischen Energie in jedem Falle günstiger als die Versorgung mit Einphasenstrom von $16\frac{2}{3}$ Hz. Ähnlich wie bei unseren früheren Überlegungen für die Versorgung mit $16\frac{2}{3}$ Hz sind in Fig. 14 die Wirkungsgrade und die Strompreise für die Versorgung aus Drehstrom-Dampfkraftwerken aufgezeichnet. Der sich ergebende Gesamtwirkungsgrad ist günstiger und der Strompreis nur etwa 89 % der Aufwendungen bei der Belieferung von Einphasenstrom aus Einphasen-Dampf-Kraftwerken. Auch liegt dieser Preis unter der für die Einphasen-Versorgung günstigsten Möglichkeit nach System Marguerre.

Endlich gilt, dass bei der Versorgung aus dem Landesnetz alle Reservemöglichkeiten gegeben sind und die Kosten für ein bahneigenes Versorgungsnetz wegfallen.

Bei den vielen Problemen, welche heute bei der Stromversorgung elektrischer Bahnen auftreten, ist es unmöglich, alle Fragen ausreichend zu behandeln. Es wurde hier versucht, einige Gesichtspunkte aufzuzeigen, um den Überblick zu erleichtern. Ein gemeinsames Weiterforschen von seiten der Bahnen und der Elektrizitätsversorgung dürfte zur Lösung der Probleme beitragen.

Adresse des Autors:

Prof. Dr.-Ing. C. Th. Kromer, Gunterstalstr. 19, Freiburg i. Br.

Vorgehen und Anforderungen bei den Abnahmen von Schaltern, Relais, Messwandlern und Transformatoren, und Betriebserfahrungen mit solchen Apparaten (bis 50 kV)

Bemerkungen zu den Berichten über die VSE-Diskussionsversammlungen vom 29. April 1954 in Zürich und vom 11. Mai 1954 in Lausanne

[siehe Bulletin SEV Band 45(1954), Nr. 22, S. 933...947]

Von G. Courvoisier, Baden

061.3 : 061.2(494) VSE: 621.31

Aus Kreisen der Industrie ist nachfolgende Zuschrift eingegangen, die wir hier im Wortlaute wiedergeben in der Meinung, dass damit der Zusammenarbeit zwischen Elektrizitätswerk und Konstruktionsfirma gedient wird.

Nous venons de recevoir une communication provenant des milieux de l'industrie; nous la reproduisons textuellement ici, en estimant servir ainsi à la collaboration entre exploitants et constructeurs.

Einige Ausführungen der genannten Berichte haben auf Seite der Konstruktionsfirmen Anlass zu einem Widerspruch gegeben. Nachdem jedoch beide Seiten darin einig sind, dass — gemäss den Ausführungen in der Einleitung zu den Berichten — «eine aufrichtige Zusammenarbeit zwischen den Werken und den Konstruktionsfirmen» Voraussetzung dazu ist, um «die beiderseits erstrebten Ziele zu erreichen», und da eine Aussprache zwischen beiden Seiten über die grundsätzlichen Aspekte, welche die Berichte aufgeworfen haben, bereits stattgefunden hat, beschränken wir uns im Nachfolgenden auf einige technische Richtiggstellungen und Abklärungen.

Im deutschen Bericht über die Diskussionsversammlung in Lausanne ist unter «3. Diskussion — a) Netzschutz und Relais» infolge eines Versehens des Übersetzers der Satz zu lesen: «Im Netz eines grossen städtischen Werkes hat die Selektivschutzanlage mit Distanzrelais nie gut funktioniert.» Tatsächlich handelt es sich hier nicht um Distanzrelais, sondern um eine Erdschluss-Anzeige-Einrichtung mit Hilfe von Nulleistungs-Richtungsrelais. Dass es dabei nicht um prinzipielle Mängel der kritisierten Einrichtung geht, mag dem nachfolgenden Abschnitt jenes Berichtes entnommen werden; diese Anzeigeeinrichtungen werden dort allerdings mit «Selektivschutz» bezeichnet.

Zu einiger Unsicherheit könnte die Bemerkung im Bericht über die Diskussionsversammlung in Lausanne unter «1. Relais und Messwandler» führen, wenn dort erklärt wird, «dass in 75 % der 32 Fälle, in denen in den Jahren 1942–1947 ein Schnelldistanzschutzrelais ansprach, ein vollkom-

mener Selektivschutz gewährleistet war, was ein befriedigendes Resultat darstellt.» Wir wissen nicht, wie diese Zahl berechnet wurde; für unsere Begriffe ist dieser «Erfolg» ausgesprochen unbefriedigend. Um eine Vorstellung über den Schutzwert von Schnelldistanzschutz-Ausrüstungen zu vermitteln, geben wir im Nachfolgenden aus den «Störungsberichten», welche uns von verschiedenen grossen Werken in zuvorkommender Weise regelmässig zugestellt werden, als typisches Beispiel folgendes bekannt:

In einem grossen Schweizer Netz, das mit 184 Schnelldistanzrelais-Sätzen ausgerüstet ist, sind in der Periode 1953/54 301 Auslösungen durch Distanzrelais erfolgt; in 98 % dieser Fälle hat sich der Distanzschutz absolut einwandfrei verhalten; in zweien der restlichen 6 Fälle sind überzählige Schalterauslösungen vorgekommen; 4 Fälle konnten nicht eindeutig abgeklärt werden. Auslöseversager sind nie erfolgt.

Schliesslich muss noch bemerkt werden, dass die Hinweise auf gewisse Mängel, welche im Bericht über die Zürcher Diskussionsversammlung im 2. Kapitel «Hauptstromrelais und Schaltmechanismen» unter «Betriebserfahrungen» gegeben werden, sich auf Relaisstypen beziehen, welche vor mehr als 40 Jahren auf den Markt gebracht wurden, aber bei einigen Werken immer noch im Gebrauch sind, trotzdem sie vor gut 20 Jahren gerade wegen der erwähnten Mängel durch eine Neukonstruktion ersetzt worden sind, bei der diese Mängel ausgeräumt wurden.

Adresse des Autors:

G. Courvoisier, dipl. El. Ing. ETH, Brown, Boveri & Cie., Baden.

Störung an einem Freileitungsschalter

Von R. Wild, Zürich

621.316.542.8 - 742.004.8

Nach dem Erscheinen des Artikels von W. Jaggi «Störung an einem Freileitungsschalter» im Bull. SEV Bd. 46(1955), Nr. 8, S. 377...378 (Energie-Erzeugung und Verteilung) Bd. 2 (1955), Nr. 8, S. 93...94, teilte uns R. Wild die Erfahrungen mit, die diesbezüglich bei den Elektrizitätswerken des Kantons Zürich (EKZ) gemacht worden sind. Die Feststellungen von R. Wild anlässlich einer Störung im Netz der EKZ decken sich im wesentlichen mit denjenigen, die von W. Jaggi im erwähnten Artikel mitgeteilt werden. Es ist interessant zu erfahren, dass die von W. Jaggi beschriebene Störung keinen Einzelfall darstellt. Wir werden in diesen Spalten allfällige weitere Mitteilungen aus diesem Gebiet gerne veröffentlichen.

W. Jaggi teilt uns noch mit, dass die von ihm beschriebene Störung tatsächlich die erste dieser Art im Netz der Atel war, trotzdem bei dieser Gesellschaft stets Kupferhörner verwendet worden und mehrere Modelle von Freileitungsschaltern in Betrieb sind.

A la suite de la parution, dans le Bull. ASE vol. 46(1955), n° 8, p. 377...378 (Prod. et Distr. Energie vol. 2(1955), n° 8, p. 93...94) de l'article de W. Jaggi «Dérangement survenu à un interrupteur sur poteau», R. Wild nous a communiqué les expériences faites à ce sujet aux «Elektrizitätswerke des Kantons Zürich» (EKZ). Les constatations faites par R. Wild lors d'un dérangement survenu dans le réseau des EKZ sont très voisines de celles communiquées par W. Jaggi dans l'article mentionné ci-dessus. Il est intéressant d'apprendre que le dérangement décrit par W. Jaggi ne constitue pas un cas isolé; c'est avec plaisir que nous publierions ici d'autres contributions au même sujet.

W. Jaggi nous fait cependant remarquer que le dérangement qu'il a décrit est bien le premier survenu dans le réseau de l'Atel, bien que l'on n'y ait toujours employé que des cornes en cuivre et que plusieurs modèles d'interrupteurs sur poteau y soient en service.

Die von W. Jaggi geschilderte Störung an einem Freileitungsmastschalter ist tatsächlich auch schon im 8/16-kV-Netz der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ), die ein anderes Modell verwenden, eingetreten. Es scheint sich hier demnach um eine allen diesen Schaltern mit Funkenhörnern eigene Fehlerquelle zu handeln. Der Fall liegt schon einige Jahre zurück und wurde eingehend untersucht.

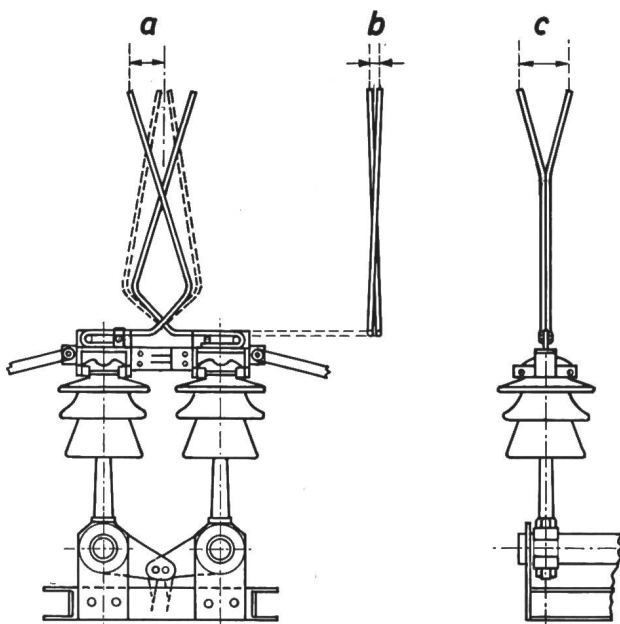
eine relativ grosse (Umfangs-) Geschwindigkeit. Die Gestaltung des Hornes aus einem gleichmässig dicken Kupferdraht bringt es nun mit sich, dass dieses einer starken Eigenschwingung fähig ist. Wenn rasch und mit einer ganz bestimmten Geschwindigkeit eingeschaltet wird, bleiben vorerst die aussenliegenden Teile des Hornes infolge seiner Elastizität und Masse zurück und schwingen dann vor allem wegen der sehr grossen Verzögerung nach dem Schliessen der Kontakte und wegen des Beharrungsvermögens über die Normallage hinaus. Sofern nun der Ausschlag gross genug ist, überlappen sich kurzzeitig die Enden der einander zugehörigen Hörner nicht mehr, und da sie zur Sicherstellung der gegenseitigen Berührung aufeinander drücken, fallen sie in diesem Moment übereinander. Die Hörner überkreuzen sich und verhängen sich beim Zurückschwingen. Dieser Zustand stellte sich anlässlich Versuchen ungefähr bei jeder zehnten rasanten Einschaltung ein.

Da die Ueberkreuzung vor dem Verhängen verhältnismässig klein ist, war die Bekämpfung dieser Störung einfach: Es genügte, die Enden der der gleichen Phase zugehörigen Hörner voneinander wegzubiegen (siehe Fig. 1). Nach dieser Abänderung gelang die Verhängung trotz zahlreicher Versuche nicht mehr, und die Praxis hat denn auch die Richtigkeit der Massnahme bestätigt, indem nun seit Jahren an einigen hundert Schaltern diese Störung nicht mehr vorgekommen ist.

Wenn W. Jaggi mitteilt, dass seit 50 Jahren dieser Fall zum erstenmal aufgetreten sei, dann ist hervorzuheben, dass auch bei den EKZ diese Störung sich erst einstellte, nachdem die bisherigen Eisenhörner durch solche aus Kupfer ersetzt worden sind. Auch dies ist ein Hinweis auf die ausschlaggebende Rolle, welche die Schwingfähigkeit der Hörner bei diesem Problem spielt.

Adresse des Autors:

Rudolf Wild, Elektrizitätswerke des Kantons Zürich, Zürich.



VSE 309

Fig. 1

Teilansicht eines 16-kV-Freileitungsschalters

- a maximale Ausschwingung der Hörner beim Schliessen des Schalters
- b Überkreuzung im Fall nicht abgebogener Enden
- c Distanzierung der Enden ($c > b$) als Abhilfsmassnahme

Die das Schaltmanöver ausführenden Isolatoren (siehe Fig. 1) sind mit einem einarmigen Hebel zu vergleichen; das Horn liegt am weitesten vom Drehpunkt entfernt und erhält daher beim Einschalten

Redaktion der «Seiten des VSE»: Sekretariat des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke, Seefeldstrasse 301, Zürich 8, Telefon (051) 34 12 12, Postcheckkonto VIII 4355, Telegrammadresse: Electrounion, Zürich.

Redaktor: Ch. Morel, Ingenieur.

Sonderabdrucke dieser Seiten können beim Sekretariat des VSE einzeln und im Abonnement bezogen werden.