Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 57 (1966)

Heft: 9

Artikel: Ein Verfahren für die Fernablesung von Zählern unter Verwendung des Starkstromnetzes

Autor: Spälti, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916593

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: 15.12.2025

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

Literatur

[1] *G. A. Korn:* The Impact of Hybrid Analog-Digital Techniques of the Analog-Computer Art. Proc. IRE 50(1962)5, S. 1077...1086.
[2] *W. Giloi:* Hybride Rechenanlagen — ein neues Konzept. Elektronische Rechenanlagen 5(1963)6, S. 262...269.
[3] *K.-J. Lesemann:* Ziffern-Integrieranlagen. In *Steinbuch:* Taschenbuch der Nachrichtenverarbeitung. Berlin, Springer 1962, S. 1241...1253.
[4] *A. W. Herzog:* Pulsed Analog Computer for Simulation of Aircraft. Proc. IRE 47(1959)5, S. 847...851.
[5] *B. Rall:* Ein Digitalvoltmeter hoher Genauigkeit mit Transistoren. Telefunken-Ztg. 33(1960)129, S. 211...215.
[6] *H. Schmid:* Linear-Segment Hybrid Function Generators. Proc. Combined Analog-Digital Computer Systems Symposium, 16...17 December 1960. Philadelphia 1960.
[7] *H. K. Skramstad:* A Combined Analog-Digital Differential Analyzer. Proc. Eastern Joint Computer Conference 16(1959), S. 94...101.
[8] *H. Schmid:* Combined Analog-Digital Computing Elements. Proc. Western Joint Computer Conference 19(1961), S. 353...361.
[9] *T. Brubaker* and *H. R. Eckes:* Digital Control Unit for a Repetitive Analog Computer. Proc. Western Joint Computer Conference 19(1961), S. 353...361.
[10] *W. S. Peel:* Some Aspects of Computer Linkage System Design. Proc. Combined Analog-Digital Computer Systems Symposium, 16...17 December 1960. Philadelphia 1960.
[11] *H. D. Huskev* and *G. A. Korn:* Computer Handbook, New York, McGraw-Hill 1962.
[12] *G. A. Korn* and *T. M. Korn:* Electronic Analog and Hybrid Computers. New York, McGraw-Hill, New York 1964.
[13] *J. M. Andrews:* The Dynamic Storage Analog Computer DYSTAC. Instruments and Control Systems 33(1960)9, S. 1540...1544.
[14] *M. C. Gilliland:* The Iterative Differential Analyzer. Instruments and Control Systems 34(1961)4, S. 674...679.
[15] *J. M. Andrews:* Mathematical Applications of the Dynamic Storage Analog Computer. Proc. Western Joint Computer Conference 18(1960), S. 119...132.
[16] *R. K. Stern: The Iterative Analog.* Low-Cost Speed for Information Processing. Control. Eng. 8(1961)7, S. 117...121.
[17] *A. L. De Winne:* On the Use of Memory Circuits in Analogue Computers. Ann. Association internationale pour le calcul analogique 4(1962)2, S. 93...105.
[18] *A. E. Rogers* and *T. W. Conolly:* Analog Computation in Engineering Design. New York, McGraw-Hill 1960.
[19] *M. C. Gilliland:* The Iterative Control System for the Electronic Differential Analyzer. IRE International Convention Record, Part 4, Electronic Computer, Information Theory 10(1962)–, S. 86...93.
[20] *A. Kley* und *G. Meyer-Brötz:* Analoge Rechenelemente als Abtaster, Speicher und Laufzeitglieder. Elektronische Rechenanlagen 3(1961)3, S. 119...122.
[21] *W. Brunner:* An Iteration Procedure for Parametric Model Building and Boundary Value Problems. Proc. Western Joint Computer Conference 19(1961), S. 513...533.
[22] *H. P. Whitacker:* Design Capabilities of Model Reference Adaptive Systems. Proc. National Electronics Conference USA 18(1962)–, S. 241...249.
[23] *R. Vichnevetsky* and *J. P. Waha:* Dynamic Programming and Hybrid Computation. Simulation 3(1964)5, S. 34...43.
[24] *G. A. Korn:* Simple Hybrid Analog-Digital Computer Teaching Aids or Courses in Statistics and Random Process Theory. ACL MEMO Nr. 47, University of Arizona, 1962.

Adresse der Autoren:
A. Kley, dipl. Ingenieur, und Dr.-Ing. *G. Meyer-Brötz*, Forschungsinstitut der Telefunken AG, Söflingerstrasse 100, D-79 Ulm (Donau) (Deutschland).

Ein Verfahren für die Fernablesung von Zählern unter Verwendung des Starkstromnetzes [1])

Von *A. Spälti*, Zug

621.317.785.083.7

Den Ausgangspunkt bilden die Erfahrungen der Netzkommando-(Rundsteuer-)technik, bei der von einem zentralen Sender aus Tonfrequenzimpulse über das Starkstromnetz gesendet werden, die von Empfängern, die im Netz verteilt sind, ausgewertet werden. Es wird untersucht, unter welchen Voraussetzungen es möglich ist, Informationen, welche die im Netz verteilten Punkte betreffen, über das Netz an eine Zentrale zurückzuleiten und dort automatisch auszuwerten. Es wird dargelegt, dass eine solche Übermittlung von Informationen innerhalb leistungsmässig begrenzter Netzbezirke nicht nur technisch möglich, sondern auch mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand realisierbar ist. Es werden die von derartigen Sende- und Empfangsausrüstungen zu erfüllenden Anforderungen definiert und diesen Definitionen entsprechende Apparate erläutert. Das beschriebene System und die vorgeführten Apparate eignen sich für die automatisch auswertbare Fernablesung von Zählern, seien es Elektrizitäts-, Gas- oder Wasserzähler.

Les expériences faites en matière de télécommande centralisée ont servi de point de départ pour la réalisation d'un système de relevé à distance des compteurs. En télécommande, on transmet des impulsions sur le réseau de distribution à partir d'un émetteur central; ces impulsions sont traduites en ordres par des récepteurs répartis dans le réseau. La présente étude pose les premières bases d'un système de transmission d'informations partant de divers points du réseau vers un centre où elles seront traitées automatiquement. On démontre que cette transmission d'informations est possible non seulement au point de vue technique, mais que les moyens mis en œuvre peuvent être justifiés économiquement lorsqu'on se limite à des secteurs du réseau ne dépassant pas une certaine puissance. L'étude définit les conditions à réaliser par les équipements d'émission et de réception et décrit les appareils qui en découlent. Le système présenté et les appareils démontrés se prêtent à la lecture à distance des compteurs d'électricité, de gaz et d'eau et permettent une introduction des données dans une calculatrice.

1. Einleitung

Im Hinblick auf die gewaltigen Fortschritte, welche in den letzten Jahren auf dem Gebiet der Datenerfassung, -übermittlung und -verarbeitung erzielt worden sind, ist es nicht selbstverständlich, dass die Erfassung der Daten über den Verbrauch von Elektrizität, Gas oder Wasser nach wie vor durch Methoden erfolgt, die jahrzehntealt sind. Gewiss sind, insbesondere in den USA, viele und grosszügige Versuche zur Automatisierung der Datenübermittlung unternommen worden. Technisch gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, den Informationsinhalt, wie er durch ein Zählwerk dargestellt wird, an eine zentrale Stelle zu übermitteln. Die Schwierigkeit liegt auf der wirtschaftlichen Seite, denn ein automatisches System sollte grundsätzlich ökonomischer sein als das heutige manuelle Verfahren. Die Wahl eines geeigneten Informationskanals zwischen Zähler und Zentrale bestimmt nun die Wirtschaftlichkeit in einem entscheidenden Ausmass. Während bei den amerikanischen Versuchen vorwiegend entweder spezielle Leitungen oder das Telephonnetz zur Informationsübermittlung benutzt wurden, hat sich Landis & Gyr — nach Versuchen in der gleichen Richtung — darauf konzentriert, das Starkstromnetz selbst mindestens teilweise hierfür einzusetzen. Es bietet gegenüber allen bisher in Erwägung gezogenen Alternativen entscheidende Vorteile sowohl betrieblicher als auch vor allem wirtschaftlicher Art.

2. Die Verwendung des Niederspannungsnetzes zur Informationsübertragung

Die Verwendung des Starkstromnetzes zur Informationsübermittlung ist an sich nichts Neues. Viele Elektrizitätswerke verwenden seit Jahren Netzkommandoanlagen zur Schaltung der Strassenbeleuchtung, der Warmwasserspeicher, Tarifapparate und vielem anderen von einer zentralen Stelle aus. Es seien deshalb vorerst die wesentlichen Kriterien, welche für die technischen Eigenschaften der Netzkommandotechnik bestimmend sind, beleuchtet und hierauf jene Gegebenheiten diskutiert, welche bei der Lösung des Problems der Zählerfernablesung zu berücksichtigen sind.

[1]) Vortrag, gehalten am 24. Februar 1966, im Kolloquium des Institutes für Fernmeldetechnik der ETH in Zürich.

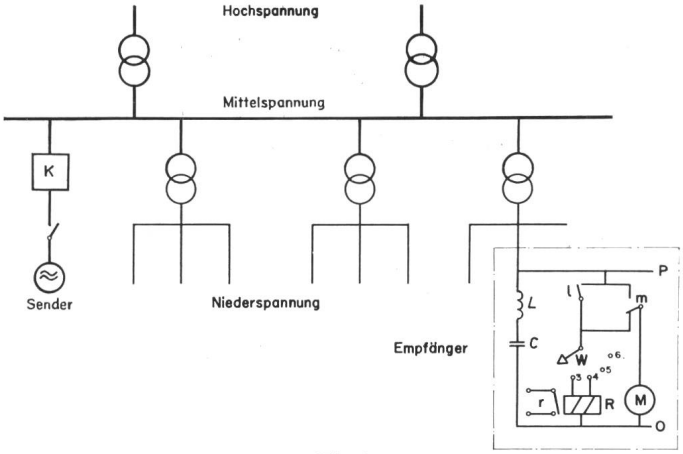


Fig. 1
Netzkommandoanlage mit dreiphasiger Einspeisung in das Mittelspannungsnetz
K Kopplungsschaltung; *0* Nulleiter; *P* Phase; *C* Kondensator; *L* Induktivität (Relais); *M* Synchronmotor; *R* Relais; *l, m, r* Schalter; *W* Wähler

2.1 Die konventionelle Netzkommandoanlage

Die Arbeitsweise einer Netzkommandoanlage zeigt Fig. 1.

Ein Tonfrequenzsender wird über einen Schalter und ein Kopplungsglied *K* impulsweise an das Mittel- oder Hochspannungsnetz angeschaltet und überlagert diesem dadurch tonfrequente Spannung. Im Empfänger ist der Kreis *LC* auf diese Tonfrequenz abgestimmt. Bei genügender zeitlicher Dauer des Tonfrequenzimpulses schliesst der Kontakt *l*, wodurch der Synchronmotor *M* gestartet wird, welcher sich anschliessend über den Kontakt *m* während eines Sendezyklus selbst an Spannung hält. Der Synchronmotor betätigt einen Wähler *W*. Erfolgt nun durch erneutes Schliessen des Sendesehalters die Sendung eines weiteren Impulses gerade zum Zeitpunkt, in welchem der Wähler *W* den Kontakt *3* erreicht hat, so wird das Relais *R* erregt, wodurch über einen Kontakt *r* der verlangte Schaltvorgang ausgelöst wird. Der Informationsinhalt liegt also im zeitlichen Abstand zwischen den beiden Tonfrequenzimpulsen. Es handelt sich damit um ein Impuls-Intervallverfahren.

Typisch ist bei solchen Anlagen immer, dass es sich um eine Informationsübermittlung von einer Zentrale an viele Aussenstellen handelt, was nur einen Sender bedingt, der seinerseits eine Vielzahl von Empfängern aktivieren kann. Demzufolge darf der Aufwand für den Sender erheblich sein, während der einzelne Empfänger billig sein muss.

Bei der Wahl der Tonfrequenz ist vorerst zu bedenken, dass das Starkstromnetz zur optimalen Übertragung einer Spannung von 50 Hz konzipiert worden ist. Die bei Rundsteueranlagen zur Anwendung gelangenden Tonfrequenzspannungen haben in der Praxis Frequenzen zwischen 175 und 1600 Hz. Die tieferen bieten in übertragungstechnischer Hinsicht kaum Probleme. Ihr Nachteil liegt in den teureren Bauelementen für Sender und Empfänger. Höhere Frequenzen führen zu billigeren Bauelementen, dafür ergeben sich ungünstigere Ausbreitungsverhältnisse, indem die Transformator- und Leitungsinduktivitäten zusammen mit kapazitiven Belastungen zu Resonanzerscheinungen führen und deshalb eine tonfrequente Sperrung solcher Lasten erfordern.

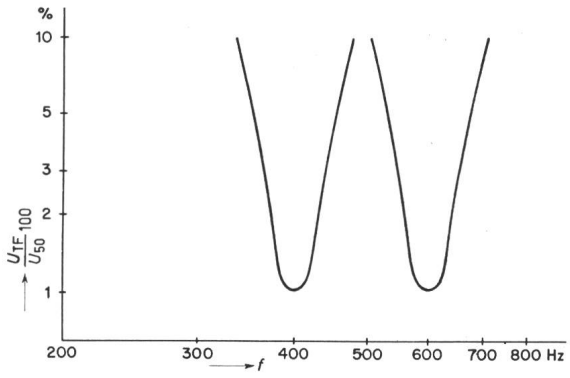


Fig. 2
Ansprechkurven von Netzkommandoempfängern
U_{TF} tonfrequente Spannung; U_{50} 50-Hz-Spannung; *f* Frequenz

Bei jeder Übertragungsaufgabe stellen sich grundsätzlich die beiden folgenden Probleme:

a) Die Signalenergie muss empfangsseitig mit Sicherheit von der Störenergie unterschieden werden können:
Das Problem der Selektivität

b) Die Signalenergie muss genügend gross sein, um das Empfangsorgan zu betätigen:
Das Problem der Verstärkung oder Energiespeicherung.

Im Tonfrequenzbereich sind es insbesondere Harmonische der Netzfrequenz, welche vom Empfänger als Störenergie empfangen werden können. Aus Kostengründen verwendet man nur ein- oder zweikreisige Filter, deren Selektivitätskurve Fig.2 zeigt.

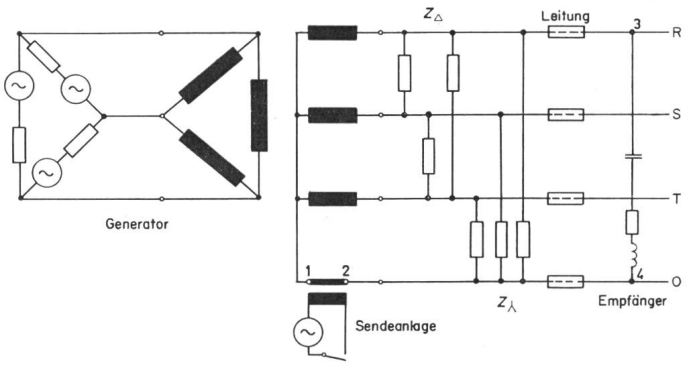


Fig. 3
Netzkommandoanlage mit einphasiger Einspeisung auf der Niederspannungsseite
$Z_\triangle$ Last Phase-Phase; $Z_\curlywedge$ Last Phase-Nulleiter; *1, 2* Sender-Ausgangsklemmen; *3, 4* Empfänger-Eingangsklemmen

Infolge der beschränkten Selektivität zeigte es sich, dass die Tonfrequenzspannung auf der Sendeseite ca. 3 % der Netzspannung betragen muss, um ein Fehlansprechen der Empfänger zu vermeiden. Bei diesem Pegel ist nun die verfügbare Energie empfangsseitig so gross, dass ein Empfangsrelais direkt betätigt werden kann. Dies bedeutet, dass eine zeitlich genau definierte Schaltung möglich ist. Die Einspeisung der tonfrequenten Spannung erfolgt in der Regel in Parallelankopplung (Fig. 1), oder auch in Serieankopplung, wobei die tonfrequente Spannung zwischen die speisende 50-Hz-Leitung und das verbrauchende Netz geschaltet wird.

Für die folgenden Leistungsbetrachtungen sollen nicht diese beiden Normalfälle, sondern der Sonderfall der Niederspannungs-Einspeisung zugrunde liegen. Gemäss Fig. 3 bedienen solche Anlagen nur das Versorgungsgebiet eines Verteiltransformators, in dem die tonfrequente Spannung in Serie zu dessen Nulleiter eingespeist wird. Man darf sich deshalb auf diesen Fall beschränken, weil Untersuchungen ergeben haben, dass die Signalübertragung in der dem Energiefluss entgegengesetzten Richtung, wie sie für die Zählerfernablesung be-

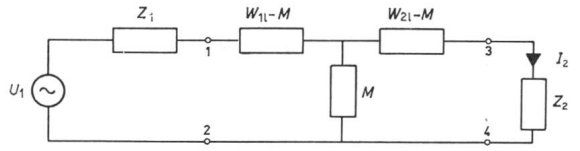


Fig. 4
Ersatzschaltung als Verbindung zwischen Sender und Empfänger
Bezeichnungen siehe im Text

nötigt wird, nur in leistungsmässig beschränkten Netzbezirken von der ungefähren Grösse eines Verteiltransformators möglich ist.

Der Vierpol, welcher zwischen den Sendeklemmen *1—2* und den Empfängerklemmen *3—4* liegt, lässt sich bekanntlich durch die unsymmetrische T-Schaltung vollständig darstellen (Fig. 4).

In diesem Vierpol bedeuten:

U_1 sekundärseitige Sendespannung
Z_1 sekundärseitige Sendeimpedanz (wird aus Gründen des Wirkungsgrades klein gehalten)
Z_2 Empfängerimpedanz.

Setzt man der Einfachheit halber symmetrische Last voraus, so entsprechen näherungsweise:

$W_{1l}—M$ Transformator-Kurzschlussreaktanz plus transformierte Generator- und Leitungsimpedanzen
M Parallelschaltung der drei Sternimpedanzen $L_\perp$
$W_{2l}—M$ Leitungsimpedanz zwischen Phase und Nulleiter

Die Beträge dieser Impedanzen haben etwa folgende relative Grössen:

$$Z_1 \approx W_{1l}-M < W_{2l}-M < M < Z_2 \tag{1}$$

Der Ausgangsstrom I_2 berechnet sich nach den Regeln der Vierpoltheorie:

$$I_2 = U_1 \frac{M}{(W_{1l}+Z_1)(W_{2l}+Z_2)-M^2} \tag{2}$$

Unter Anwendung der Ungleichung (1) führt dies näherungsweise zu:

$$I_{2N} \approx \frac{U_{1N}}{Z_2} \tag{3}$$

Durch den Index N wird angedeutet, dass es sich um ein Nutzsignal handelt.

Durch nichtlineare Belastung des Netzes sowie durch Ein- und Ausschaltvorgänge entstehen Störströme I_{2s}, welche man in der Ersatzschaltung als durch eine am Eingang liegende Störspannungsquelle U_{1s} hervorgerufen denken kann. Von den tatsächlich im Netz auftretenden Störspannungen tragen natürlich nur diejenigen zur Bildung von U_{1s} bei, die entsprechend der Selektivitätskurve des Empfängers frequenzmässig in Betracht fallen.

$$I_{2s} = \frac{U_{1s}}{Z_2} \tag{4}$$

Das Verhältnis

$$\frac{I_{2N}}{I_{2s}} = \frac{U_{1N}}{U_{1s}} = p_{12} \tag{5}$$

darf aus Gründen der Übertragungssicherheit eine bestimmte Grösse nicht unterschreiten.

Die vom Sender aufzubringende Leistung ist:

$$P_1 \approx \frac{U_{1N}^2}{M} = \frac{p_{12}^2\, U_{1s}^2}{M} \tag{6}$$

2.2 Der Übertragungsfall: Aussenstelle zur Zentrale

Die Betrachtungen auf Grund von Fig. 4 haben keinerlei Einschränkungen vorausgesetzt. Wenn man deshalb gemäss Fig. 5 die Sendespannung U_{2N} in Serie zu Z_2 denkt und nach dem Strom I_1 durch Z_1 fragt, welche jetzt einen Empfänger darstellt, so kann man den Umkehrungssatz der Vierpoltheorie anwenden und in Gl. (2) die Ein- und Ausgangsgrössen vertauschen:

$$I_{1N} = U_{2N} \frac{M}{(W_{1l}+Z_1)(W_{2l}+Z_2)-M^2} \tag{7}$$

Mit den gleichen, wie für Gl. (3) angewendeten Näherungen wird:

$$I_{1N} \approx \frac{U_{2N}}{Z_2} \tag{8}$$

Durch die Impedanz Z_1 fliesst aber auch ein Störstrom I_{1s}, den man wiederum durch eine zwischen Sternpunkt und Nulleiter liegende Störspannung U'_{1s} hervorgerufen denken kann. U'_{1s} wird vom früheren U_{1s} nach Gl. (4) verschieden sein, wenn der Empfänger Z_1 andere Selektivitätseigenschaften aufweist als der Empfänger Z_2.

$$I_{1s} \approx \frac{U'_{1s}}{M} \tag{9}$$

Wiederum bedeutet p den Störabstand:

$$p_{21} = \frac{I_{1N}}{I_{1s}} = \frac{U_{2N}\, M}{Z_2\, U'_{1s}} \tag{10}$$

und die vom Sender U_{2N} aufzubringende Leistung ist näherungsweise:

$$P_2 \approx \frac{U_{2N}^2}{Z_2}$$

oder

$$P_2 \approx \frac{p_{21}^2\, U'^2_{1s}\, Z_2}{M^2} \tag{11}$$

2.3 Vergleich der beiden Übertragungsfälle

Aus Gl. (11) und (6) folgt für das Verhältnis der Sendeleistungen:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{p_{21}^2\, U'^2_{1s}\, Z_2}{p_{12}^2\, U_{1s}^2\, M} \tag{12}$$

Bedeutet U_{50} die Spannung zwischen Phase und Nulleiter und P_{50} die Leistung, welche zwischen diesen Leitern verbraucht wird, so ist:

$$M = \frac{U_{50}^2}{P_{50}}$$

und Gl. (12) wird zu:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{p_{21}^2\, U'^2_{1s}\, Z_2\, P_{50}}{p_{12}^2\, U_{1s}^2\, U_{50}^2} \tag{13}$$

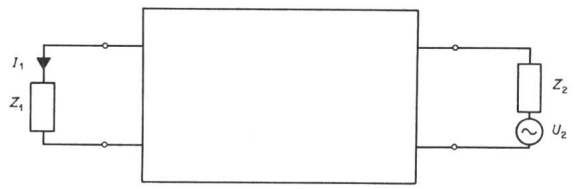


Fig. 5
Übertragungsfall: Aussenstelle zur Zentrale

I_1 Empfangsstrom;
Z_1 Empfängerimpedanz (identisch mit Senderimpedanz Z_1 in Fig. 4);
Z_2 Senderimpedanz (identisch mit Empfängerimpedanz Z_2 in Fig. 4);
U_2 Sendespannung

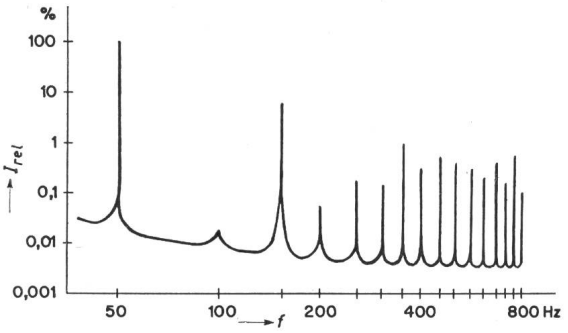


Fig. 6
Relativer Strom I_{rel} im Nulleiter in Funktion der Frequenz f

Würde man für beide Übertragungsrichtungen gleiche Sicherheiten ($p_{12} = p_{21}$) und Apparate gleicher Selektivität ($U_{1s} = U'_{1s}$) voraussetzen, dann wäre das Leistungsverhältnis:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{Z_2 P_{50}}{U_{50}^2}$$

Mit den Werten aus der Praxis:

Z_2	$= 50\ \Omega$	Impedanz des Netzkommandoempfängers bzw. Aussenstellensenders
P_{50}	$= 250$ kVA	Leistung zwischen Phasen und Nulleiter
U_{50}	$= 220$ V	Netzspannung
U_{1N}	$= 0{,}03\ U_{50}$	Sendespannung der Netzkommandoanlage

ergibt sich für die Sendeleistung

$$P_1 = 0{,}03^2\, P_{50} \approx 10^{-3}\, P_{50} = 250 \text{ VA} \qquad (14)$$

und für $P_2/P_1 = 250$, also als Aussenstellen-Sendeleistung: $P_2 = 62{,}5$ kW.

Es ist also ausgeschlossen, mit konventionellen Mitteln eine Übertragung von der Aussenstelle her zur Zentrale zu bewerkstelligen.

Gl. (13), welche dieses Resultat vermittelte, gibt aber auch die Mittel an, welche zu einem wesentlich besseren Ergebnis führen können. Vorerst sei auf irgendwelche Einbusse an Übertragungssicherheit gegenüber den heutigen Verhältnissen in der Netzkommandosteuerung verzichtet und $p_{12} = p_{21}$ gesetzt. Die Möglichkeiten der einzusetzenden Werte für die Störspannungen U_{1s} und U'_{1s} sind hingegen von grösster Bedeutung. Wenn man z. B. im Nulleiter eines voll belasteten Verteiltransformators mit einem Empfänger von 1 Hz Bandbreite das Frequenzspektrum misst, so führt dies zu einem Diagramm nach Fig. 6. Ein Empfänger mit den Selektionseigenschaften eines Netzkommandoempfängers (Fig. 2) ist also in erster Linie durch die Netzharmonischen gefährdet, indem ein auf 600 Hz abgestimmter Apparat bereits durch wenige Prozent Oberwellen bei 550 Hz und 650 Hz ausgelöst wird. Praktisch dürften diese Frequenzen kaum mit einer Amplitude von mehr als 1 % der Grundwelle auftreten, weshalb man setzen kann:

$$U_{1s} = 10^{-2}\, U_{50} \qquad (15)$$

Wenn es gelingen würde, einen Empfänger mit sehr hoher Selektivität und nur ca. 1 Hz Bandbreite zu bauen, so könnte nach Fig. 6 bei einer Empfangsfrequenz zwischen zwei Netzharmonischen mit einer Störspannung von

$$U_{1s}' \approx 2 \cdot 10^{-5}\, U_{50} \qquad (16)$$

gerechnet werden.

Nach Gl. (13) ist im Interesse einer geringen Sendeleistung P_2 auch die Impedanz Z_2 klein zu halten. Nach Fig. 7 wird Z_2 durch den eigentlichen Aussenstellensender und das Kopplungselement gebildet. Das letztere soll den Sendestrom möglichst ungehindert passieren lassen und anderseits den 50-Hz-Strom durch Schalter und Generator möglichst klein halten. Das einfachste Element, das dieser Forderung entspricht, ist ein auf die Sendefrequenz abgestimmter Seriekreis.

Es gibt nun verschiedene Gründe, warum man diesen LC-Kreis nicht beliebig niederohmig wählen kann. Z. B. kann dessen Resonanzfrequenz durch die Leitungsinduktivität verstimmt werden, oder der 50-Hz-Strom, der mit sinkendem Z_2 zunimmt, kann den Schalter durch Ausgleichsströme unzulässig belasten usw. Für das Frequenzgebiet von 500 Hz haben wir mit $\sqrt{L/C} = 250\ \Omega$ einen optimalen Wert gefunden. Mit einer Kreisgüte von $Q = 25$, wie sie in dieser Frequenzlage auch mit billigen Komponenten erreichbar ist, ergibt sich ein Verlustwiderstand von:

$$R_2 = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{Q} = 10\ \Omega \qquad (17)$$

Setzt man nun die Werte der Gl. (14), (15), (16) und (17) in Gl. (13) ein, so ergibt sich:

$$P_2 \approx 10^{-6}\, P_{50}^2 \text{ kVA} \qquad (18)$$

Bei einer Transformatorenleistung von z. B. 300 kVA (wobei immer nur der Anteil zwischen Phasen und Nulleiter zu verstehen ist) führt dies also zu einer Aussenstellensendeleistung von ca. 0,1 W, was für eine ökonomische Realisierung mehr Aussicht bietet.

Dieses Ergebnis bildet die Basis für den Aufbau eines Zähler-Fernablesungssystems. Es sind damit zwei wichtige Punkte verbunden:

a) Wegen der geringen Bandbreite von ca. 1 Hz liegen die möglichen Telegraphiergeschwindigkeiten unter 1 bit/s. Will man lange Übermittlungszeiten vermeiden, ist es notwendig, die zu übermittelnden Informationen auf ein Minimum zu reduzieren.

b) Einerseits steigt die erforderliche Aussenstellensendeleistung an mit dem Quadrat der 50-Hz-Leistung des zu versorgenden Netzes. Anderseits wird man die verfügbare Aussenstellensendeleistung aus wirtschaftlichen Gründen tief halten wollen, so dass man auf eine Unterteilung des Netzes in kleinere Netzbezirke angewiesen ist. Dabei zeigt es sich, dass das Versorgungsgebiet eines Verteiltransformators von 200...500 kVA eine geeignete Netzunterteilung darstellt.

Da heute in zunehmendem Masse wesentlich kleinere Transformatoren-Einheiten eingesetzt werden, ist es wichtig zu wissen, dass es leistungsmässig auch möglich ist, eine Gruppe von Transformatoren zu einem Ablesebezirk zusammenzufassen. Bei diesen Gruppen, wie beim Niederspannungsnetz selbst, wird allerdings immer vorausgesetzt, dass sie nur an einer Stelle mit dem übrigen Netz zusammenhängen. Dies ist bei sternförmigem Netzaufbau immer der Fall, wogegen die Verhältnisse bei vermaschten Netzen komplizierter sind.

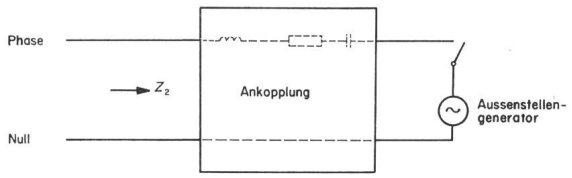


Fig. 7
Komponenten des Aussenstellensenders: Ankopplung, Schalter, Generator
Z_2 Senderimpedanz

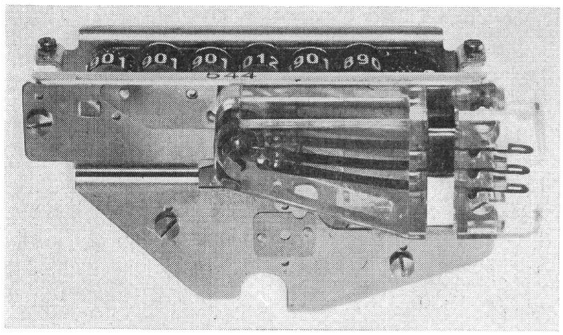


Fig. 8
Trommelzählwerk mit Festmengen-Umschaltkontakt

3. Aufbau der Apparate

3.1 Informationserfassung im Elektrizitätszähler

Will man einen 6-stelligen Zählwerkstand binär verschlüsseln, werden hierfür mindestens 20 bit benötigt. Damit wäre nicht nur ein grosser Aufwand für die Verschlüsselung verbunden, sondern es ergäbe sich auch eine zu grosse Menge von zu übermittelnder Informationen. In diesem Zusammenhang erwies sich die Überlegung als wertvoll, nicht den Zählwerkstand in absoluten Werten als Kriterium für die Erfassung des Verbrauches zu verwenden, sondern nur die Tatsache, ob seit der letzten Befragung oder Ablesung eine vorgegebene Festmenge von Energie verbraucht worden sei oder nicht. Das ermöglicht es, sich mit einer Ja/Nein-Antwort zu begnügen, d. h. einer Information von 1 bit.

Die einfachste technische Realisierung für die Darstellung einer Ja/Nein-Antwort führt zu einem Kontakt, welcher nach einer bestimmten Energiemenge schliesst und nach einer weiteren wieder öffnet. Da sich aber ein geöffneter Kontakt und eine Störung in Form eines Leitungsunterbruchs elektrisch nicht unterscheiden lassen, erweist es sich als zweckmässig, diesen Kontakt als Umschaltkontakt auszuführen, wodurch sich die Möglichkeit einer Kontrolle ergibt (Fig. 8). Um die Ein-/Aus-Stellung der beiden Aussenkontakte des Umschaltkontakts zu übermitteln, sind aber 2 bit erforderlich.

Der feste Energiebetrag ist dabei so zu wählen, dass es als ausgeschlossen gelten kann, dass im Zeitraum zwischen zwei Ablesungen mehr als diese Festmenge verbraucht wird, da sich der Umschaltkontakt sonst bei beiden Ablesungen in der gleichen Stellung befinden könnte. Müsste mit dieser Möglichkeit trotzdem gerechnet werden, liesse sich eine Sicherung gegen dieses Überspringen von «Normal-Festmengen» dadurch erreichen, dass man sich vom Zähler zusätzlich eine weitere, grössere «Grob-Festmenge» übertragen lässt, die z. B. schon aus Gründen der Absicherung nicht überschritten werden kann. Bei der Auswertung würde automatisch festgestellt, ob während der Grob-Festmenge die vorgegebene Anzahl von Normal-Festmengen gemeldet worden ist.

3.2 Sender

Die Forderung nach minimalem Aufwand für die in grosser Zahl benötigten Sender scheint besonders schwer erfüllbar im Hinblick auf die hohe Frequenzkonstanz, welche durch die schmale Empfängerbandbreite von ca. 1 Hz benötigt wird. Zu einer Lösung führt das grundsätzliche Konzept nach Fig. 9, wonach symbolisch angedeutet ist, dass sowohl die Sendefrequenz wie die Abstimmfrequenz des Empfängers durch die Netzfrequenz bestimmt wird.

Die Hauptfunktionen des Senders sind bereits in Fig. 7 angedeutet:

a) Fernhaltung der 50-Hz-Spannung vom Generator durch das Ankopplungsglied;
b) Auftrennung des Sendekreises in den Sendepausen durch einen Schalter, welcher bezweckt, ein Abfliessen eines Signalstroms durch die in grosser Zahl vorhandenen, parallel zum Netz liegenden Sender zu verhindern.
c) Erzeugung der Sendeleistung durch einen Generator, dessen Frequenz mit der Netzfrequenz in einer festen Beziehung stehen soll.

Im Hinblick auf das Störstromspektrum nach Fig. 6 wird diese Sendefrequenz zweckmässigerweise zwischen zwei Netzharmonische gelegt. Versuchsanlagen arbeiten z. B. mit 575 Hz.

Während der Seriekreis und der Schalter kaum einen weiteren Kommentar erfordern, stellt sich die Hauptfrage nach der Ausbildung des Generators.

Durch die Tatsache, dass über dem offenen Schalter in der Regel eine durch die Netzspannung bedingte Potentialdifferenz besteht und dass deshalb beim Schliessen des Schalters ein gedämpfter Ausgleichsstrom entsteht mit der Resonanzfrequenz des Seriekreises als Eigenfrequenz, ist die Basis für einen sehr einfachen Sender gegeben. (Genau genommen ist der in Fig. 7 gezeichnete Generator gar nicht in explizierter Form aufzubringen.) Erfolgt nun das Schliessen und Öffnen des Schalters in einem solchen Rhythmus, dass immer homologe Momentanwerte der Netzspannung geschaltet werden, so entsteht bei jedem Schliessen eine solche gedämpfte Tonfrequenzschwingung.

Die vorerst naheliegende Schlussfolgerung, dass die erzeugten Tonfrequenzströme in ihrer Frequenz durch die Eigenresonanz des Seriekreises bestimmt sind, trifft aus folgenden Gründen nicht zu: Da es sich um eine streng periodische Tastung handelt, berechnet sich das Frequenzspektrum am einfachsten durch Fourierzerlegung der an den Kreis gelegten Spannung, welche in Fig. 10 durch Diagramm *d* dargestellt ist. Diese ergibt:

$$U_n = \frac{U_0}{\pi n} \tag{19}$$

U_n Amplitude der Tonfrequenzspannung
U_0 Durch den Schalter angelegter Spannungssprung
$n = \frac{f_T}{f_n}$ = Tonfrequenz/Tastfrequenz

Wenn man den Schaltrhythmus entsprechend Fig. 10 festlegt, wird:

$$U_0 = 2\sqrt{2}\ U_{50} = 620\ \text{V}$$

Die Tastfrequenz beträgt 25 Hz, und damit folgt aus Gl. (19):

$$U_n = \frac{620 \cdot 25}{\pi\, 575} = 8{,}6\ \text{V}$$

und mit Gl. (17) der effektive Sendestrom:

$$I_n = \frac{8{,}6}{10\sqrt{2}} = 0{,}6\ \text{A}$$

welcher während der Sendung kontinuierlich fliesst.

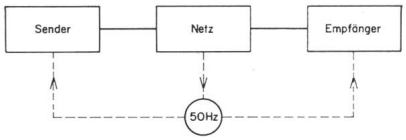


Fig. 9
Herleitung der Sendefrequenz und Empfängerabstimmung aus der Netzfrequenz

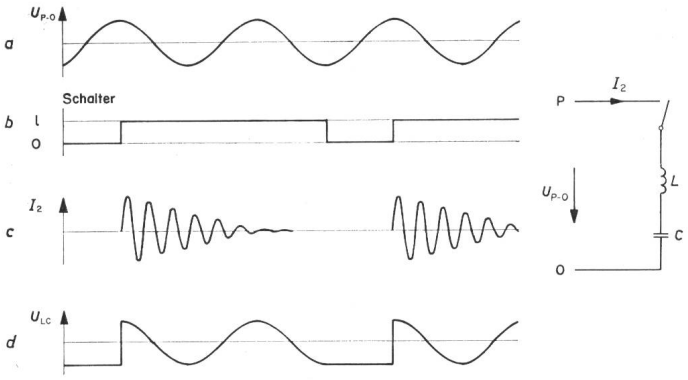


Fig. 10
Entstehung gedämpfter Tonfrequenzschwingungen durch das Anschalten eines Seriekreises an das Netz
Zeitdiagramme: *a* Netzspannung U_{P-O}; *b* Schalterstellung; *c* tonfrequenter Einschaltstrom; *d* Spannung am Seriekreis U_{LC}

Das bedeutungsvolle Ergebnis liegt nun darin, dass die Frequenz dieses Stroms eine Harmonische der Tastfrequenz ist. Die Tastung kann durch einen Synchronschalter zwangsläufig in ein festes Verhältnis zur Netzfrequenz gebracht werden, womit die Forderung nach Verkopplung von Ton- und Netzfrequenz erfüllt ist.

Eine einfache und zuverlässige Ausführung eines solchen Synchronschalters zeigt Fig. 11.

Ein auf eine Frequenz von 25 Hz grob abgestimmtes Schwingsystem betätigt direkt den Schalter. Die Erregung erfolgt durch ein Magnetfeld mit einer Netzfrequenz von 50 Hz. Die starke Nichtlinearität zwischen Auslenkung des Schwingsystems und Anziehungskraft des Elektromagneten hat zur Folge, dass das Schwingsystem auf einer Subharmonischen der Netzfrequenz schwingen kann.

3.3 Empfänger

Wie man im Abschnitt 4 sehen wird, benötigt man pro Verteiltransformator *einen* Empfänger, weshalb der Aufwand nicht sehr ins Gewicht fällt. Es kann ein konventioneller Überlagerungsempfänger verwendet werden. Vorerst handelt es sich aber darum, beim Verteiltransformator im Nulleiter die Signalströme auszukoppeln. Geht man zu Fig. 3 zurück, so muss man sich vorstellen, dass die Stelle des Netzkommandosenders hier nun vom Empfänger der von den Aussenstellensendern übermittelten Informationen eingenommen wird. Diese Auskopplung geschieht gemäss Fig. 12 mit einem Aufsteckstromwandler und einem Filter Z_1Z_2. Der Parallelkreis Z_1 bewirkt, dass die Bürde des Wandlers für 50 Hz genügend klein gehalten wird, und Z_2 hat zur Folge, dass die Impedanz dieses Filters neben der Übertragungsfrequenz von den Ausgangsklemmen her gesehen hoch ist. Dadurch wird eine Mehrfachausnutzung der Verbindungsleitung zwischen Ankopplung und Empfänger ermöglicht, welcher an einer zentralen Stelle des Ortsnetzes untergebracht sein kann. Den Aufbau des eigentlichen Empfängers zeigt Fig. 13.

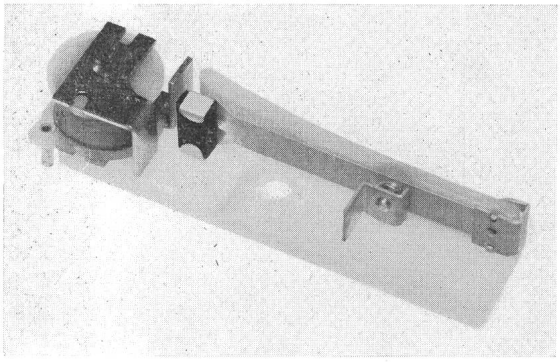


Fig. 11
Synchronschalter für eine Frequenz von 25 Hz

Die Funktionsweise ist folgende: Die Signale werden über ein Bandfilter F_1, welches eingangsseitig aus Impedanzgründen ein T-Glied aufweist, der Mischstufe M zugeführt. Dieses Filter ist in seiner Bandmitte z. B. auf 575 Hz abgestimmt und weist bei den Frequenzen 550 und 600 Hz bereits eine erhebliche Dämpfung auf. Der Oszillator liefert eine Spannung von 500 Hz, welche mit der Netzfrequenz synchronisiert ist. Die Ausgangsspannung der Mischstufe wird an ein weiteres Bandfilter F_2 mit einer Abstimmfrequenz von 75 Hz und ca. 1 Hz Bandbreite gelegt. Wegen der Einschwingzeit dieses Filters muss die zeitliche Dauer eines Bit gross sein; die Versuchsanlage arbeitet z. B. mit 3 s. Die Ausgangsspannung dieses Bandfilters wird in *Gl* gleichgerichtet und anschliessend an einen Schwellwertschalter *SS* gelegt. Dieser schaltet im eingeschalteten Zustand einen Generator konstanten Stromes *I* auf das Integrationsglied *C*. Im Rhythmus der Bitsendungen, also im 3-s-Rhythmus schliesst der durch den Synchronmotor *M* betätigte Schalter *m* kurzzeitig und führt die Ladung von *C* auf das Relais *R*. Je nachdem, ob während der verflossenen Bit-Zeit genügend Ladung in *C* gespeichert werden konnte, wird das Relais *R* ansprechen oder nicht. Mit einer nicht gezeichneten Selbsthalteschaltung hält es sich während des folgenden Bit, so dass während dieser Zeit an *r* die Information 0 oder *L* gespeichert bleibt.

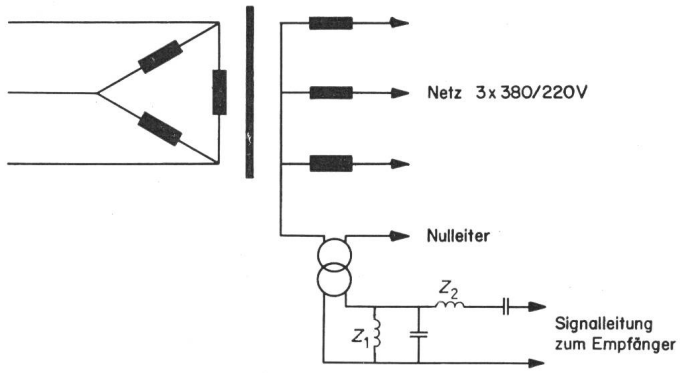


Fig. 12
Auskopplung des Signals aus dem Nulleiter mit Aufsteckstromwandler und Filter
Z_1, Z_2 auf Signalfrequenz abgestimmte Schwingkreise

Die erwünschte Unabhängigkeit von Störungen wird dadurch erreicht, dass man den Schwellenschalter *SS* so auslegt, dass er bei der kleinsten zu erwartenden Signalstromstärke

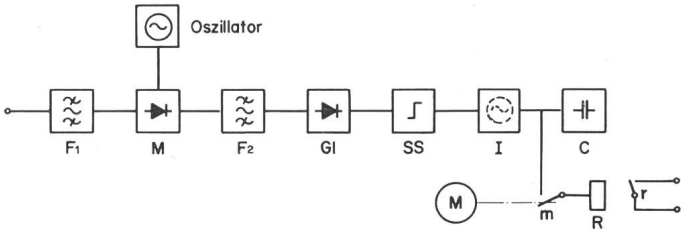


Fig. 13
Blockschema des Empfängers
F_1 Bandfilter Δf ca. 20 Hz; F_2 Bandfilter Δf ca. 1 Hz; *M* Mischstufe; *Gl* Gleichrichter; *SS* Schwellenschalter; *I* Stromgenerator; *C* Kondensator; *R* Relais mit Kontakt *r*

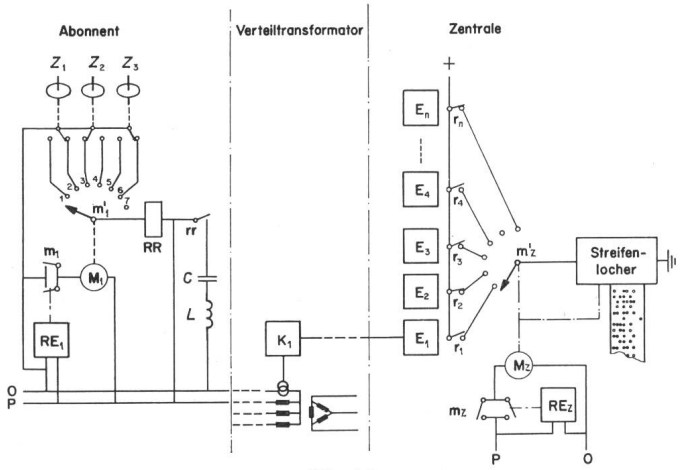


Fig. 14
Blockschaltbild eines Zählerfernablesesystems

$Z_1...Z_3$ Zähler, ausgerüstet mit Ablesekontakten;
RE_1 Netzkommandoempfänger, abonnentenseitig;
RE_z Netzkommandoempfänger, zentralenseitig;
M_1 Synchronmotor, betätigt Selbsthaltekontakt m_1 und Wählerkontakte m_1';
M_z Synchronmotor, betätigt Selbsthaltekontakt m_z und Wählerkontakte m_z';
RR Resonanzrelais (Synchronschalter) mit Kontakt rr;
K Auskopplungsschaltung;
$E_1...E_n$ Empfänger mit Ausgangskontakten $r_1...r_n$

gerade noch schaltet. Überdies muss dieser Schalter während des grössten Teils einer Bitdauer geschlossen bleiben, damit die in C aufgespeicherte Ladung das Relais R anziehen kann. Hat während eines Null-Bit der Schalter SS infolge von Störungen nur kurzzeitig geschlossen, wird die entsprechend geringe Ladung auf C durch m periodisch abgeleitet, jedoch das Relais R nicht zum Ansprechen gebracht. Die Störspannungen werden also bezüglich ihrer Frequenzlage, ihrer Amplitude und ihrer zeitlichen Dauer beurteilt.

4. Schaltungsmässiger Aufbau des Zähler-Fernablesungssystems

Nachdem die Apparate sowie die Eigenschaften des Übertragungskanals von einer Aussenstelle des Netzes an eine Zentrale dargestellt worden sind, bleibt noch die Beschreibung des Systems als Ganzes. Wie können in einem grösseren Netz eine Vielzahl von Zähler-Ablesekontakten gemäss Fig. 8 in einer Zentralstelle registriert werden? Als erster Punkt ist festzuhalten, dass das Eintreffen dieser Informationen nicht dem Zufall überlassen werden darf, sondern dass allein schon aus Gründen der Registrierung und Identifikation eine Ordnung in diese Informationen gebracht werden muss. Das bedeutet, dass die Stellung der Ablesekontakte in einem geordneten Zyklus abgefragt werden muss.

Der ganze Ablauf soll Fig. 14 erläutern. Auf ein spezielles Netzkommando hin sprechen alle Netzkommandoempfänger RE_1 der Abonnenten und RE_z in der Zentrale an und starten die Synchronmotoren M_1 und M_z, welche sich anschliessend bis zum Schluss des Abfragezyklus selbst an Spannung halten mit den Kontakten m_1 bzw. m_z. Die Motoren M_1 betätigen nun die Wählerkontakte m_1', indem sie den Wählerarm im 3-s-Rhythmus weiterschalten. Von den 400 möglichen Positionen des Wählerarmes sind in Fig. 14 aus Gründen der Übersichtlichkeit nur deren 7 gezeichnet. In Wirklichkeit hat die Kontaktbahn des Wählers 20 Ausgänge, und der Wählerarm führt während einem Abfragezyklus 20 Durchläufe aus, von denen durch einen nicht gezeichneten Gruppenkontakt in Serie zum Wählerarm aber nur einer aktiviert wird. Wenn der Wählerarm z. B. den Kontakt *2* erreicht, wird während 3 s die Spule RR erregt und betätigt durch ihr Magnetfeld den Kontakt rr im Rhythmus 30 ms EIN, 10 ms AUS (Fig. 10). (In einem anderen Zeitpunkt hätte der Zähler Z_1 seinen Kontakt in Stellung *1* gebracht und hätte damit die Sendung 3 s früher ausgelöst.) Da mehrere Kontakte verfügbar sind, kann mit einem Sender eine Mehrzahl von Zählern abgelesen werden, was kostenmässig von grosser Bedeutung ist. Die Tonfrequenzströme fliessen nun über LC und den Nulleiter zum Verteiltransformator. Dort werden sie mit dem Filter K_1 ausgekoppelt und über eine spezielle Leitung in die Zentrale geleitet, wo sie im Empfänger E_1 empfangen werden. Wird ein Signal als solches erkannt, so wird der Kontakt r_1 geschlossen und bleibt während 3 s in dieser Stellung. Während dieser 3 s werden nun alle Kontakte $r_1...r_n$ der anderen Verstärker bzw. Verteiltransformatoren abgetastet. Der 3-s-Rhythmus wird durch den Synchronmotor M_z bestimmt. Mit dem synchronlaufenden Streifenlocher wird die Stellung dieser Kontakte durch Perforation festgehalten. Die Position der Perforation nach einem mit dem Start erfolgten Markierzeichen identifiziert den Abonnenten. Bei der Auswertung der Lochstreifen wird festgestellt, wie oft im Verlauf einer Verrechnungsperiode, die eine grosse Anzahl von Abfrageperioden umfasst, die korrespondierende Abonnenten-Perforation ihre Position gewechselt hat. Die Bewertung mit der betreffenden Energiemenge und den entsprechenden Energiekosten ist eine für einen Computer bestimmte Aufgabe, der die automatische Auswertung bis zur Rechnungsstellung übernimmt. Es wäre auch denkbar, die Zwischenschaltung dieses Streifenlochers zu vermeiden und die Informationen direkt einem Computer im «on line»-Betrieb zuzuführen.

5. Schlussbetrachtungen und Ausblick

Diese Darlegungen bedeuten, dass es möglich ist, unter Verwendung des Starkstromnetzes binäre Informationen vom Konsumenten elektrischer Energie über das Niederspannungsverteilnetz zu einer Zentrale zu übertragen, ohne dass damit ein prohibitiver Aufwand verbunden wäre, wie das bei Verwendung besonderer Leitungen (pilot wire) der Fall ist.

Was sind nun die praktischen Möglichkeiten dieses Informationssystems?

Bereits bei einer Befragungshäufigkeit von einmal pro Tag kann die Festmenge so festgelegt werden, dass die Ungenauigkeit einer Monatsablesung eine Grösse hat, welche die Beibehaltung von Blocktarifen ohne weiteres zulässt. Verluste entstehen dabei weder für den Energielieferanten noch für den Abnehmer, da Restmengen automatisch auf die folgende Verrechnungsperiode übertragen werden.

Durch Zuteilung eines besonderen Ablesekontaktes zu jeder Wertigkeit der konsumierten Energie kann auch ein Doppel-, ein Dreifachtarif oder ein Überverbrauchtarif in der bisherigen Form beibehalten und in einfacher Weise fernabgelesen werden.

Für den Maximumtarif wäre abonnentenseitig eine Codiervorrichtung nötig, und die Übertragung der codierten Information würde eine grössere Zahl von Bit benötigen.

Aus Gründen der Tradition oder aber aus gesetzlichen Gründen ist vorerst damit zu rechnen, dass die Verrechnung des Energieverbrauchs weiterhin nach den traditionellen Tarifen erfolgen müsste.

Auf lange Sicht bieten sich aber ganz neue Möglichkeiten:

Während die heutigen Tarifierungssysteme darauf aufgebaut sind, die Information über die konsumierte elektrische Energie höchstens monatlich, in manchen Fällen sogar nur halbjährlich durch den Zählerableser zu übertragen, ist es mit dem neuen System möglich, in kurzen Zeitabständen festzustellen, ob ein gewisses Quantum elektrischer Energie konsumiert wurde; das gleiche gilt für den Konsum von Wasser oder Gas. Rechnet man mit 200 Abonnenten pro Niederspannungstransformator und einer Übertragungskapazität des Informationskanals von 1/3 bit/s, so werden für einen vollständigen Ablesezyklus 20 min benötigt. Das neue System erlaubt somit die Befragung über den Konsum einer Festmenge relativ häufig, z. B. halbstündlich, durchzuführen. Damit sind aber die Voraussetzungen geschaffen, die Aufteilung der konsumierten Energie auf die verschiedenen Tarifwerte nicht mehr beim Abonnenten, sondern zentral vorzunehmen. Dies führt nicht nur zu einer wesentlichen Verbilligung der Zählwerke und der Übertragungsmittel bei komplizierten Tarifen, sondern auch zu einer sehr viel weitergehenden Flexibilität in der Tarifgestaltung, und der Anpassung der Tarife an die Dynamik der Entwicklung der Versorgungsunternehmen.

Dabei ist erwähnenswert, dass in jedem beliebigen Zeitpunkt die Information über die konsumierte Energie jedes Abnehmers auf eine Festmenge genau greifbar ist, so dass z. B. bei Wohnungswechsel die Abschlussrechnung ohne manuelle Zwischenablesung erstellt werden kann.

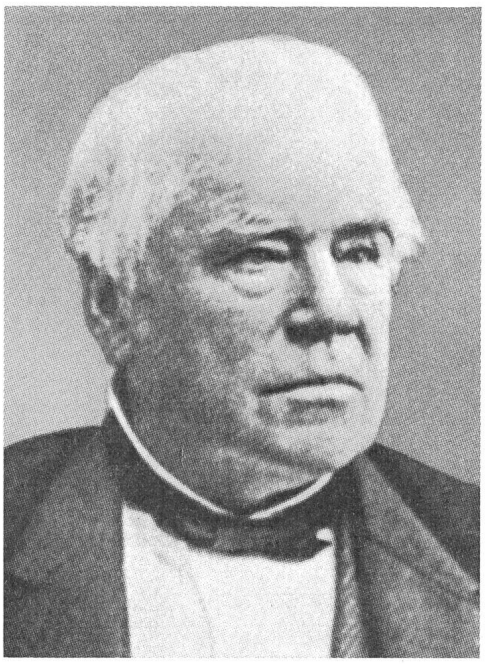
Ausser der Verwendung zu Verrechnungszwecken schafft der Einsatz dieses Informationsmittels ganz neue Möglichkeiten der statistischen Untersuchung des Energieverbrauches, da in kleinen Zeitabständen über jeden Abonnenten Information über dessen Konsum anfällt. Damit können für die Betriebsführung wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden.

Bis dieser neue Informationsweg geöffnet ist, muss allerdings noch sehr viel Arbeit geleistet werden. Ob, wie weit und wie schnell die potentiell vorhandenen Möglichkeiten ausgenützt werden, wird dabei nicht zuletzt von einer möglichst engen Zusammenarbeit mit den Energieversorgungs-Unternehmen abhängen. Sollte eine solche Zusammenarbeit, wie zu hoffen ist, zustande kommen, dürfte es sich zeigen, dass mit diesem System ein technisches Mittel zur Verfügung steht, welches für die zukünftige Tarifpolitik der Versorgungsunternehmen von wesentlicher Bedeutung sein kann, und im Interesse der Elektrizitätswerke und ihrer Abonnenten liegt.

Adresse des Autors:
Dr. *A. Spälti,* Direktor der Landis & Gyr AG, 6301 Zug.

JAMES BICHENO FRANCIS

1815—1892



Was eine Francis-Turbine ist, weiss wohl jeder Techniker, aber wer war Francis, ihr Erfinder?

James Bicheno Francis wurde am 18. Mai 1815 in Southleigh in der englischen Grafschaft Oxfordshire geboren. Als James 10 Jahre alt war, wurde die erste Eisenbahn von Stockton nach Darlington in Betrieb genommen. Überall entstanden kürzere Bahnstrecken. James' Vater hatte bei einer Bahn in Südwales die Stelle eines Aufsehers angenommen. Mit 14 Jahren half James bereits in den Werkstätten der Bahn und 2 Jahre später hatte er dort schon eine Stelle angetreten.

Beseelt vom Wunsch, in der Neuen Welt der Technik zu dienen, reiste er nach New York, wo er am 11. April 1833 an Land ging. Rasch fand er eine Stelle bei einem Bahnbau. Noch im gleichen Jahr wurde sein Chef in die «Schleusen- und Kanalgesellschaft» in Lowell, einer kleinen Stadt am Merrimack-Fluss, etwa 60 km nordwestlich von Boston, als Chef-Ingenieur berufen. Francis ging mit ihm und wurde in der der Gesellschaft gehörenden Maschinenfabrik als Zeichner und Konstrukteur beschäftigt. Man wollte Lokomotiven bauen und Francis hatte als erstes eine aus England herübergebrachte Stephenson-Lokomotive auseinanderzunehmen und Pläne anzufertigen, damit die Maschine nachfabriziert werden konnte.

Im Alter von 22 Jahren wurde Francis zum Nachfolger seines zurücktretenden Chefs bestimmt. Jetzt musste der Jüngling seine fehlende Schulbildung nachholen. Eben verheiratet, machte er sich mit viel Energie und bestem Erfolg ans Studium von Mathematik und Naturwissenschaften. Mit 30 Jahren wurde er General Manager der Unternehmung und blieb es bis 1885.

Um 1845 wurden in der Fabrik nach den Ideen von *Boyden* Wasserräder gebaut. Francis führte Versuche damit durch und konnte entscheidende Verbesserungen anbringen. Die 10jährige Entwicklungsarbeit fasste er im «Lowells Hydraulic Experiments» betitelten Bericht zusammen, der 1855 erschien.

Francis interessierte sich auch für andere Fachgebiete, so für Holzimprägnierung und für Festigkeitsprobleme von Holz- und Eisenkonstruktionen. Er war Gründer, Mitglied und zeitweiliger Präsident der «American Society of Civil Engineers», und wirkte auch massgeblich mit bei der Gründung des «Massachusetts Institute of Technology», einer der besten technischen Hochschulen in den Vereinigten Staaten. Er ist ein hervoragendes Beispiel eines Selfmademan, der auch auf dem Gebiet der exakten Wissenschaften und der Technik Bestes leistete.

H. Wüger