

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 49 (1958)

Heft: 21

Artikel: Der Einfluss von Kondensatoren auf die Ausbreitung tonfrequenter Signale in Netzkommandoanlagen

Autor: Koenig, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059745>

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: 23.02.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN
 DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND
 DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Der Einfluss von Kondensatoren auf die Ausbreitung tonfrequenter Signale in Netzkommandoanlagen¹⁾

Von W. Koenig, Luzern

621.398 : 621.316.1 : 621.319.4

Den Ausgangspunkt der Untersuchung bilden gewisse Schwierigkeiten, die sich der gleichzeitigen Anwendung von Kondensatoren für die Blindstromkompensation und von Tonfrequenz-Netzkommandoanlagen entgegenstellen. Der Verfasser beschreibt zunächst die äusseren Erscheinungsformen des Einflusses von Kondensatoren auf die Netzkommandoanlagen nach ihren positiven und negativen Aspekten. Der Anschlussort der Kondensatoren, die verschiedenen Arten von Netzkommandoanlagen und das Verhalten der Netzelemente gegenüber der Tonfrequenz werden als mitbestimmende Umstände dieses Einflusses einzeln betrachtet. Die Resultate der Untersuchung werden in einer Übersicht über die Einflussfaktoren zusammengefasst. Als Schlussfolgerung werden verschiedene Massnahmen zur Vermeidung oder Milderung unerwünschter Einflüsse empfohlen.

Le point de départ de l'étude consiste dans certaines difficultés qui s'opposent à la mise en service simultanée de batteries de condensateurs pour la compensation de la charge réactive et d'installations de télécommande à fréquence audible. L'auteur présente d'abord l'aspect des avantages et des désavantages de l'influence des condensateurs sur les installations de télécommande. L'endroit choisi pour le raccordement des condensateurs, les divers genres de télécommande et le comportement des différents éléments qui constituent un réseau, sont autant de circonstances prises en considération séparément et déterminant cette influence. Les résultats de cette enquête sont exposés dans un résumé des facteurs d'influence. En conclusion, des recommandations sont faites pour éviter ces influences, ou du moins en diminuer l'effet.

1. Gegenstand, Ausgangslage und Zielsetzung

Unter Netzkommandoanlagen versteht man Anlagen zur selektiven Ausführung verschiedener Steuerbefehle an einer Vielzahl von im Starkstromnetz verteilten Empfangsstellen von einer zentralen Sendestelle aus. Sie werden auch als Zentralsteueranlagen, Netzfernsteueranlagen, Tonfrequenz-Fernsteueranlagen, Tonfrequenz-Rundsteueranlagen («TRA») bezeichnet. Zum Begriff der Netzkommandoanlage gehört auch die Benutzung des Starkstromnetzes für die Übertragung der tonfrequenten Signalströme von der zentralen Sendestelle zu den vielen Empfangsstellen. Ferngesteuert werden z. B. Heisswasserspeicher, Tarifapparate, Strassenlampen u. a. m. Die Technik der Zentralsteuerung wird in den Grundzügen als bekannt vorausgesetzt [1] ²⁾.

Es ist naheliegend, dass Kondensatoren, die zur Blindstromkompensation an das überlagerte Netz angeschlossen werden, eine der höheren Frequenz entsprechend starke Ableitung von tonfrequentem Signalstrom zur Folge haben. Da die Netze auch induktive Elemente enthalten, so bringt der Anschluss von Kondensatoren ferner die Möglichkeit von tonfrequenten Resonanzen mit sich. Schwierigkeiten infolge von Kondensatoren sind tatsächlich vorgekommen.

Mittel zur Sperrung der Kondensatoren gegenüber tonfrequenten Signalströmen sind bekannt und werden auch angewendet [2; 3]. Ihre Anschaffung und Installation bedeuten jedoch zusätzliche Umtreibe und eine Verteuerung des Einsatzes von Kondensatoren. Es erhebt sich also die Frage, ob zwei wertvolle, moderne Hilfsmittel der Verteilung von elektrischer Energie, die Netzkommandoanlagen einerseits und die statischen Kondensatoren für die Blindstromkompensation anderseits, sich in zunehmendem Masse gegenseitig im Wege stehen werden.

Die vorliegende Arbeit ist die gekürzte Fassung einer weiter ausholenden Untersuchung über den Einfluss von Kondensatoren auf die Ausbreitung der tonfrequenten Signalströme. Der Auszug beschränkt sich zum Teil auf andeutungsweise Begründungen und verzichtet ganz auf die Wiedergabe von Ableitungen.

2. Verschiedene Aspekte des Einflusses von Kondensatoren

Die Wirkung der Kondensatoren äussert sich zunächst in einer Beeinflussung der Empfangsspannung, d. h. der Signalspannung an den Empfangsstellen. Als Folge davon wird auch die erforderliche Sendeleistung beeinflusst.

2.1 Senkung der Empfangsspannung

Im Netzsektor, in dem Kondensatoren für Blindstromkompensation installiert sind, kann eine unerwünschte Senkung der Empfangsspannung eintre-

¹⁾ Dieser Aufsatz ist ein Auszug aus einer Arbeit, die der Denzler-Stiftung auf Grund des im Bull. SEV Bd. 47(1956), Nr. 3, S. 107...108 veröffentlichten 8. Wettbewerbes (13. Preisauflage) eingereicht wurde. Die preisgekrönte Originalarbeit wird Interessenten auf Wunsch durch den SEV leihweise zur Verfügung gestellt.

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

ten, wenn in den Längsimpedanzen zwischen der Sendestelle und den Empfangsstellen durch die zusätzliche Steuerstromaufnahme der Kondensatoren ein zusätzlicher Spannungsabfall auftritt. Wenn diese Senkung der Empfangsspannung nicht durch entsprechende Erhöhung der Sendespannung ausgeglichen wird, so wird die Funktion der Empfänger in Frage gestellt oder doch die Sicherheitsreserve, d. h. der minimale Überschuss der Empfangsspannung über die Funktionsspannung herabgesetzt.

2.2 Erhöhung der Empfangsspannung

Die Längsimpedanzen zwischen der Sendestelle und den Empfangsstellen haben bei der Steuerfrequenz meistens ausgesprochen induktiven Charakter (Streuinduktivitäten von Transformatoren, Leitungsindektivität). Im Gegensatz zur Spannungs senkung (s. 2.1) kann deshalb der Anschluss von Kondensatoren ebensogut eine Erhöhung der Empfangsspannung zur Folge haben. Ob die Kondensatoren eine Senkung oder eine Erhöhung der Empfangsspannung bewirken, hängt von der Grösse der Längsindektivitäten, der Summe der Kapazitäten aller im betreffenden Netzteil angeschlossenen Kondensatoren und von der Steuerfrequenz ab. Bei besonders ungünstigen Daten tritt Serieresonanz der Längsindektivitäten und der Gesamtkapazität der angeschlossenen Kondensatoren auf. Bei schwacher Netzlast kann dabei die Spannung an den Kondensatoren, d. h. die Empfangsspannung, ein Mehrfaches der Sendespannung annehmen.

Erhöhungen der Empfangsspannung durch Kondensatoren sind in beschränktem Ausmass harmlos im Vergleich mit Spannungs senkungen. Denn die Funktionssicherheit der Empfänger wird durch eine Erhöhung der Empfangsspannung nicht beeinträchtigt, und Schäden an Verbrauchsapparaten oder an den Kondensatoren sind angesichts der kurzen Dauer der Signalempulse nicht zu befürchten.

Bei starkem Ausmass dagegen sind Spannungs erhöhungen doch unerwünscht. Übermässige Empfangsspannungen können lästige Geräusche von Empfangsgeräten, Transformatoren, Elektrizitäts zählern, Rundfunkempfängern und gewissen Elektrizitätsverbrauchern zur Folge haben. Ferner muss eine störende Beeinflussung von Schwachstromanlagen durch hohe Signalspannungen von Netzkommandoanlagen infolge induktiver oder kapazitiver Kopplung vermieden werden. Tonfrequente Signalspannungen auf Starkstromnetzen verhalten sich hinsichtlich akustischer Störwirkungen wie Oberwellen der Netzspannung, die gemäss Art. 5 der eidg. Starkstromverordnung auch nicht Werte annehmen dürfen, die zu störenden Fernwirkungen auf Schwachstromanlagen führen. Wegen der stärkeren Übertragung tonfrequenter Störspannungen durch induktive und kapazitive Leitungskopplung bei höheren Frequenzen und wegen der ebenfalls frequenzabhängigen Empfindlichkeit des Ohres (maximales Störgewicht bei etwa 1000 Hz) variieren die zulässigen Grenzwerte der tonfrequenten Signal spannungen stark mit der Steuerfrequenz. Als allgemeingültige Richtlinien können die Vorschriften der PTT zugrunde gelegt werden. Zwischen 460 und

3500 Hz nehmen die von der PTT in Niederspannungsnetzen zugelassenen Höchstwerte der Tonfrequenzspannung stetig ab. Bei 460 Hz und darunter werden 20 V, bei 3500 Hz und darüber nur noch 1,2 V Tonfrequenzspannung zugelassen [4].

2.3 Erhöhung des Bedarfs an Sendeleistung

Wird in einem Netzteil die Empfangsspannung durch Kondensatoren erhöht (s. 2.2), so steigt die tonfrequente Leistungsaufnahme dieses Netzteils im ungefähr quadratischen Verhältnis der Spannungs erhöhung.

Besonders ungünstig liegen die Verhältnisse, wenn die Empfangsspannung durch Kondensatoren in einzelnen Netzteilen gesenkt und in anderen erhöht wird. Um die zu tiefe Empfangsspannung einzelner Netzteile auf den Sollwert zu bringen, muss die Sendespannung höher eingestellt werden, als wenn die Kondensatoren nicht vorhanden wären. In den anderen Partien des Netzes mit ohnehin schon erhöhter Empfangsspannung erfährt diese eine zusätzliche Steigerung. Je nach der relativen Ausdehnung und Belastung dieser Partien kann dann die Sendeleistung verhältnismässig stark in die Höhe getrieben werden.

2.4 Senkung des Bedarfs an Sendeleistung

Es kann gelegentlich vorkommen, dass vereinzelte Punkte eines Netzes eine ungenügende Empfangsspannung aufweisen, während diese im übrigen Netz normal ist. Dieser Fall kann z. B. eintreten, wenn eine lange Freileitung eines ländlichen Niederspannungsnetzes ein abgelegenes Gehöft versorgt. Es ist dann vornehmlich die Leitungsreaktanz, die einen beträchtlichen Spannungsabfall bei Tonfrequenz hervorruft, insbesondere bei Belastung der Leitung durch Motoren. In einem solchen Fall kann eine mässige Kapazität an passender Stelle die Empfangsspannung auf oder über den erforderlichen Nennwert heben. Von einer allgemeinen Erhöhung der Sendespannung im Sinne des vorigen Unterabschnittes kann dann Abstand genommen und eine entsprechende Erhöhung der Sendeleistung vermieden werden. Eine solche Korrektur vereinzelter schwacher Punkte des allgemeinen Empfangsniveaus kann bewusst vorgenommen werden oder das zufällige Ergebnis des Einsatzes von Kondensatoren zur Verbesserung des Leistungsfaktors sein.

Die Sendeleistung kann gelegentlich auch direkt im günstigen Sinn beeinflusst werden. Dies ist dann der Fall, wenn eine tonfrequente Blindbelastung der Sendemittel durch Transformatoren, Generatoren, Motoren usw. eine völlige oder teilweise Kompen sation durch Kondensatoren erfährt.

2.5 Zusammenfassung

Der Einfluss von Kondensatoren auf die Netzkommandoanlagen kann sich negativ in der Form von Senkungen oder Erhöhungen der Empfangsspannung und als Folge davon oder unmittelbar in einer erhöhten Belastung der Sendemittel äussern. Gelegentlich kann durch Kondensatoren umgekehrt als positive Nebenwirkung in einem Netzteil mit schwacher Signalspannung eine erwünschte Spannungsstützung eintreten. Dadurch werden indirekt

die Sendemittel entlastet. Auch durch direkte Entlastung der Sendemittel von tonfrequentem Blindstrom können sich Kondensatoren gelegentlich günstig auswirken.

3. Anschlussort der Kondensatoren

Der eigentliche Beweggrund für die Installation von Kondensatoren besteht darin, dass sie die Generatoren, Transformatoren und Leitungen von

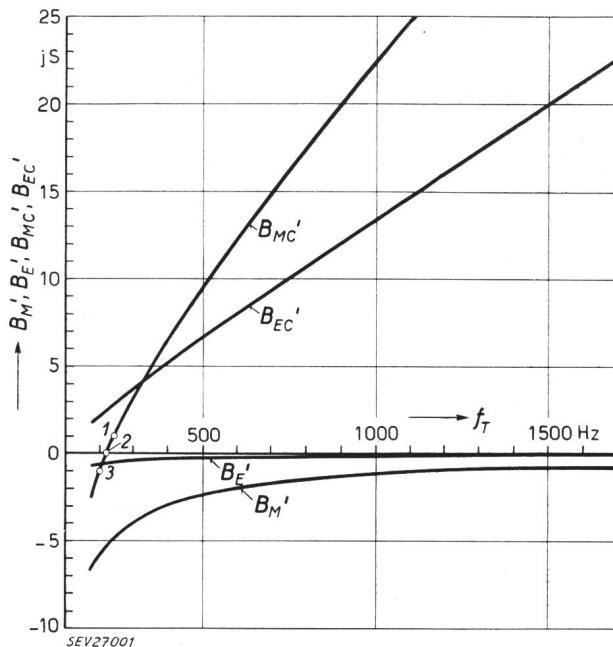


Fig. 1

Blindleitwerte in jS pro 0,144 MW Wirkbelastung in Funktion der Tonfrequenz f_T , bezogen auf 0,38 kV

$$B_M' = 23,3 \frac{f_N}{f_T} \quad \text{Blindleitwert von unkompenzierten Motoren}$$

$$B_E' = 2,3 \frac{f_N}{f_T} \quad \text{Blindleitwert von unkompenzierten Entladungslampen und Schweissapparaten}$$

$$B_{MC}' = 1,17 \frac{f_T}{f_N} - 23,3 \frac{f_N}{f_T} \quad \text{Blindleitwert von kompensierten Motoren}$$

$$B_{EC}' = 0,67 \frac{f_T}{f_N} - 2,3 \frac{f_N}{f_T} \quad \text{Blindleitwert von parallelkompensierten Entladungslampen und Schweissapparaten}$$

f_N Netzfrequenz

Punkt 1 liegt bei $+j1S$, 240 Hz, Punkt 2 bei $0S$, 223 Hz und

Punkt 3 bei $-j1S$, 200 Hz

ausgenützt werden. Zu diesem wirtschaftlichen Gesichtspunkt kommt noch der technisch-qualitative, dass die Blindstromentlastung der Netzanlagen die Spannungshaltung verbessert.

Eine ideale Erfüllung dieser Zielsetzungen würde bedingen, dass Kondensatoren als Blindstromerzeuger dort angeschlossen werden, wo Blindstrom benötigt wird, also vor allem unmittelbar bei den Verbrauchern mit induktivem Charakter, wie Motoren, Schweißtransformatoren, Gasentladungslampen mit ihren Stabilisierungsdrosselpulsen u. dgl. Anderseits kann eine gewisse Zentralisierung der Blindstromdeckung durch grössere Kondensatoren ökonomischer und praktischer sein als die Aufstellung von vielen, zum Teil ganz kleinen Kondensatoren bei den einzelnen Blindstromkonsumenten. Dazu kommt noch der Umstand, dass die Abfassung von Vorschriften und Energielieferungsverträgen naturgemäß der technischen Entwicklung meistens nacheilt. Eine Menge einzelner Energiekonsumenten kann deshalb vielfach nicht nachträglich zum Einbau von Kondensatoren verpflichtet werden. Neben der Einzel- und Gruppenkompensation der Blindstromaufnahme von Energieverbrauchern trifft man deshalb oft auch grössere Kondensatoreneinheiten oder Batterien, die ganze Niederspannungsnetze oder Netzteile mit Blindstrom beliefern.

Noch leistungsfähigere Kondensatorenbatterien werden in wachsendem Ausmass auch in Mittel- und Hochspannungsnetzen installiert. Dabei lassen sich zwar Spannungsabfälle und Verluste nicht vermeiden, die durch den Blindstromtransport über Leitungen und Transformatoren zwischen den Aufstellungsorten der Kondensatoren und den Verbrauchern auftreten. Anderseits sind grössere Hochspannungskondensatoren und die zugehörigen Schaltgeräte eher billiger als Niederspannungskondensatoren gleicher Leistung mit Zubehör. Ferner konsumieren auch die Netzanlagen (Transformatoren und Leitungen) Blindleistung. Der Schwerpunkt dieses Blindleistungskonsums liegt mehr im Mittel- und Hochspannungs- als im Niederspannungsnetz. Mehr und mehr wird man deshalb Niederspannungskondensatoren (für Netz-, Gruppen- und Einzel-

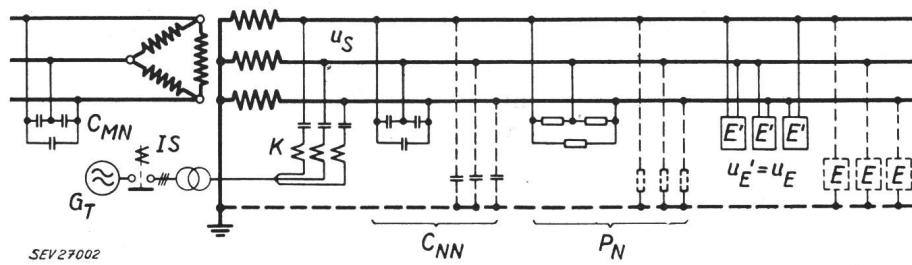


Fig. 2

Parallelankopplung dreiphasiger Signalströme an das Niederspannungsnetz

(Wenn kein Nulleiter vorhanden ist, fallen die gestrichelt gezeichneten Partien weg)

G_T Tonfrequenzgenerator; IS Impulsschütz; K Kopplungsmittel; E Empfangsgeräte, Anschluss Phase/Null; E' Empfangsgeräte, Anschluss Phase/Phase; P_N Netzelastung (Wirkkomponente); C_{NN} Kondensatoren im Niederspannungsnetz; C_{MN} Kondensatoren im Mittelspannungsnetz; u_S relative Sendespannung; u_E relative Empfangsspannung Phase/Null; u_E' relative Empfangsspannung Phase/Phase; u_S, u_E, u_E' pro Volt der Netzspannung

Blindleitwerte entlasten sollen. Dadurch können die Netzanlagen ohne Erhöhung der Verluste besser für die Erzeugung und Übertragung von Wirkleistungen

kompensation), Mittelspannungs- und Hochspannungskondensatoren alternativ oder in bunter Mischung vorfinden (Fig. 2...7).

Die vorliegenden Ausführungen befassen sich in erster Linie mit den in der Schweiz bisher so gut wie ausschliesslich verwendeten Kondensatoren, die im Nieder-, Mittel- oder Hochspannungsnetz quer zur Leitung, also parallel zur Netzlage geschaltet und deshalb auch etwa als Shunt-Kondensatoren bezeichnet werden. Wo ohne nähere Bezeichnung schlechthin von Kondensatoren die Rede ist, sind deshalb entsprechend der landesüblichen Gepflogenheit immer Parallelkondensatoren gemeint. Einzig der Unterabschnitt 7.8 geht noch kurz auf die Frage der Seriekondensatoren ein, denen insbesondere bei langen Freileitungen von Höchstspannungsübertragungsanlagen, Überlandnetzen und ländlichen Verteilnetzen eine zunehmende Bedeutung kommt.

ins Mittelspannungsnetz zu verhindern. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass Tonfrequenzleistung nur von denjenigen Verbraucherapparaten absorbiert wird, die zwischen den Phasenleitern und dem Nullleiter angeschlossen sind. Dies gilt auch für Kondensatoren, die ja meist in Dreieck geschaltet, d. h. nur mit den Phasenleitern verbunden sind und deshalb keinen homopolaren Signalstrom aufnehmen. Andererseits haben homopolare Signalströme etwa viermal so grossen Spannungsabfall pro km Leitungslänge als dreiphasige.

In Ausnahmefällen finden einphasige Signalströme auch im Mittelspannungsnetz Verwendung. Selbst im Hochspannungsnetz stände dem technisch nichts im Wege. Damit Transformatoren überschritten werden, kommen jedoch nicht homopolare, son-

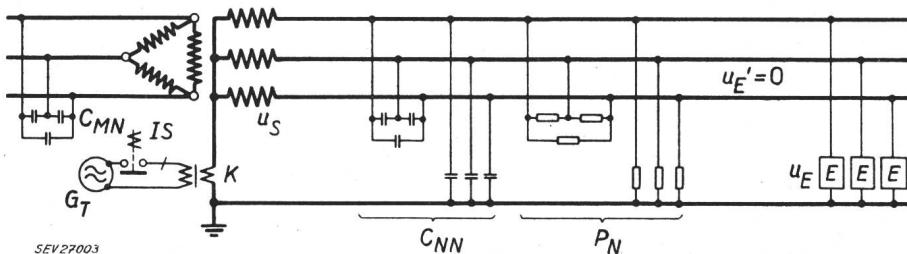


Fig. 3
Serieankopplung homopolarer
Signalströme an das
Niederspannungsnetz
Bezeichnungen siehe Fig. 2

4. Arten von Netzkommandoanlagen

Auch die Art der Netzkommandoanlagen ist im Hinblick auf den Einfluss der Kondensatoren in Betracht zu ziehen. Im folgenden wird deshalb eine Übersicht über Merkmale heute üblicher Netzkommandoanlagen gegeben, von denen der Einfluss der Kondensatoren abhängen kann.

4.1 Stromkreis und Phasenzahl der Signalströme

Die weiteste Verbreitung, insbesondere in grösseren Drehstromnetzen, kommt den *dreiphasigen Signalströmen* zu. Diese werden von den Netztransformatoren in gleicher Weise wie die netzfrequenten Betriebsströme übertragen. Abgesehen von den frequenzabhängigen Reaktanzen der meisten Netzelemente erfolgt die Ausbreitung dreiphasiger Signalströme deshalb durchaus wie bei den dreiphasigen Betriebsströmen. Gleiche Phasenzahl der Signal- und der Netzströme ergibt somit die übersichtlichsten Verhältnisse. Wo nichts anderes beigefügt ist, sind im folgenden immer dreiphasige Signalströme gemeint.

In Drehstromnetzen mit Nulleiter, also in Niederspannungsnetzen, kommen häufig auch einphasige, sog. *homopolare Signalströme* zur Anwendung. Die drei Phasenleiter dienen gemeinsam zur Hinleitung und der Nulleiter zur Rückleitung der Signalströme. Der Nulleiter kann geerdet oder isoliert sein (Fig. 3). Die homopolaren Signalströme sind insofern symmetrisch, als alle drei Phasen gegenüber dem Nullleiter gleiche Tonfrequenzspannung aufweisen. Von Phasenleiter zu Phasenleiter dagegen ist keine tonfrequente Spannung vorhanden.

Die homopolaren Signalströme haben den Vorteil, dass unabhängig von der Steuerfrequenz keine Sperren erforderlich sind, um eine Abwanderung der Signalströme vom lokalen Niederspannungsnetz

dern nur *einphasig asymmetrische Signalströme* in Frage. Fig. 6 zeigt ein Beispiel mit einem Niederspannungstransformator in Dreieck-Stern-Schaltung.

Bei dieser Signalstromart können die Empfängergeräte nicht an beliebige Phasenleiter angeschlossen werden, weil diese nicht gegenüber dem Nullleiter oder unter sich dieselbe Tonfrequenzspannung aufweisen. Im Beispiel nach Fig. 6 haben zwei von den drei Phasen dieselbe relative Empfangsspannung u_E gegenüber dem Nulleiter, die dritte dagegen ist gegenüber dem Nulleiter spannungslos. Dieselben zwei Phasenleiter haben unter sich $(2/\sqrt{3})u_E$, also um 15 % höhere relative Empfangsspannung als gegenüber dem Nulleiter, und der dritte Phasenleiter hat gegenüber den zwei anderen nur $(1/\sqrt{3})u_E = 58\%$ von u_E . Für Anlagen mit grossen Empfängerzahlen wäre dies betrieblich nachteilig. Trotzdem findet diese Art von Signalströmen gelegentliche Anwendung, weil sie aufwand- und leistungsmässig die ökonomischste Lösung darstellt. Wenn z. B. in einem Netz oder Netzteil nur vereinzelte Objekte zu steuern sind, so fällt der erwähnte Nachteil nicht ins Gewicht. Auch in Anlagen, die lokale Niederspannungsnetze nach dem homopolaren Prinzip bedienen und nachträglich auf vereinzelte Mittelspannungsstränge ausgedehnt werden sollen, haben diese einphasigen Signalströme trotz des asymmetrischen Charakters ihre Berechtigung.

4.2 Frequenz der Signalströme

Die Wahl der Steuerfrequenz ist teilweise durch die Natur der verschiedenen Zentralsteuersysteme, aber auch durch die Struktur und die Grösse des zu steuernden Netzes begründet. Heute werden hauptsächlich Frequenzen zwischen 175 und 1350 Hz angewendet. Wenn sich die vorliegende Untersuchung

auf einen weiteren Bereich von etwa 170...1700 Hz erstreckt, so geschieht dies mit Rücksicht auf bestehende Anlagen.

4.3 Art der Tonfrequenzankopplung ans Netz

Es gibt grundsätzlich zwei Arten, wie die Tonfrequenz-Signalspannung dem Netz aufgedrückt werden kann, nämlich die Parallel- und die Serienankopplung. Beide sollen hier nur soweit charakterisiert werden, als sie direkt oder indirekt als Faktor des Einflusses der Kondensatoren in Frage kommen.

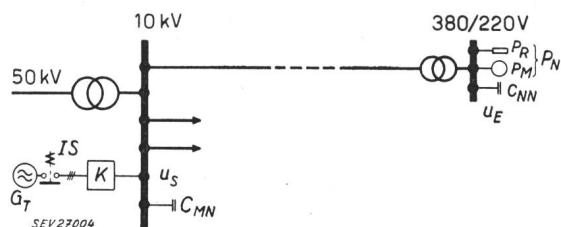


Fig. 4

Beispiel einer Parallelankopplung dreiphasiger Signalströme an das Mittelspannungsnetz

P_R Ohmsche Belastung; P_M Motorenbelastung (Wirkkomponente)

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 2

Bei der *Parallelankopplung* wird die Leistung des Tonfrequenzgenerators über ein Kopplungsfilter auf die Sammelschiene der Sendestelle eingespeist. Für die Tonfrequenz sind deshalb das überlagerte Netz und das Fremdnetz (Liefernetz und andere von diesem gespeiste Verteilnetze) einander parallelgeschaltet (Fig. 2, 4, 7). An beiden liegt somit unabhängig von ihrer Grösse dieselbe Tonfrequenzspannung. Die Grösse der ins überlagerte Netz und ins Fremdnetz fliessenden Tonfrequenzströme richtet sich nach den Tonfrequenzimpedanzen dieser Netze. Wird die Impedanz des Fremdnetzes als zu klein erachtet, so kann sie durch Einschaltung eines Sperrkreises zwischen dem Fremdnetz und der Kopplungsstelle erhöht werden. Falls zwischen dem Fremdnetz und der Kopplungsstelle Transformatoren oder Freileitungen ausreichender Längsreaktanz vorhanden sind, so können diese die Funktion der Sperrre übernehmen.

Bei der *Serieankopplung* wird in die Speiseleitung eines zu überlagernden Netzes oder Netzteils ein Serientransformator eingeschaltet, dessen andere Wicklung vom Tonfrequenzgenerator gespeist wird. Für die Tonfrequenz ist das überlagerte Netz mit dem Fremdnetz in Serie geschaltet (Fig. 3, 5, 6). Der Tonfrequenz-Sendestrom I_S durchfließt also das zu überlagernde Netz und das Fremdnetz.

Die Tonfrequenz-Sendespannung U_S im überlagerten Netz und die tonfrequente Rückschlussspannung U_{Fr} im Fremdnetz sind gleich dem Produkt aus dem Sendestrom I_S und den respektiven Tonfrequenz-Impedanzen Z_T des überlagerten Netzes und Z_{Fr} des Fremdnetzes. Die Impedanz Z_{Fr} des Fremdnetzes ist oft wesentlich kleiner als die Impedanz Z_T des überlagerten Netzes, da die Generatoren des Liefernetzes mit der Impedanz anderer, von ihnen gespeister Verteilnetze tonfrequenzmäßig parallelgeschaltet sind. Je grösser das Fremdnetz im Vergleich zum überlagerten Netz, desto kleiner ist

die Impedanz Z_{Fr} im Vergleich zur Impedanz Z_T , desto kleiner also auch die tonfrequente Fremdnetzspannung U_{Fr} im Vergleich zur Sendespannung U_S . Da die tonfrequente Impedanz des Fremdnetzes meist vorwiegend induktiven Charakter besitzt, so ist die Rückschlussspannung U_{Fr} und die ins Fremdnetz abwandernde Tonfrequenzleistung auch um so geringer, je tiefer die Steuerfrequenz gewählt wird.

4.4 Ort der Tonfrequenzkopplung an das Netz

Die Ankopplung kann grundsätzlich an irgend einer Stelle des Netzes erfolgen. Ein einzelnes Niederspannungsnetz wird man auf der Niederspannungsseite des speisenden Transformators überlagern (Fig. 2, 3). Ein Mittelspannungsnetz hingegen wird vorzugsweise auf seiner Spannungsebene überlagert (Fig. 4, 5, 6). Ankopplung auf der Hochspannungsebene ist dann angezeigt, wenn mehrere Mittelspannungsnetze zu überlagern sind, die von einem gemeinsamen Hochspannungsnetz gespeist werden (Fig. 7).

Aus Gründen der guten Ausbreitung und der Ökonomie wird also ein Netz wo immer möglich auf derjenigen Spannungsebene überlagert, auf der sich die Hauptverteilung der Energie in das zu überlagernde Gesamtgebiet vollzieht. Ankopplung im Hauptspeisepunkt oder doch auf einem möglichst zentralen Knotenpunkt dieser Spannungsebene wird bevorzugt.

4.5 Zusammenfassung

Dreiphasige Signalströme werden am meisten verwendet. Einphasig symmetrische (homopolare) Signalströme sind auf Niederspannungsnetze beschränkt und kommen deshalb vorwiegend in kleineren Anlagen vor. Einphasig asymmetrische Signalströme finden nur ausnahmsweise und insbesondere in Mittelspannungsnetzen Anwendung (s. 4.1).

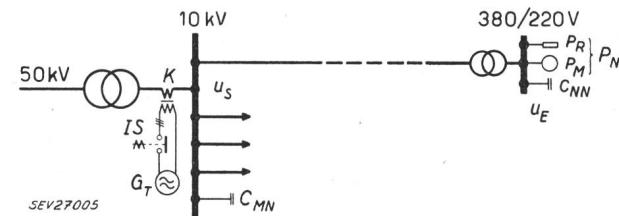


Fig. 5
Beispiel einer Serieankopplung dreiphasiger Signalströme an das Mittelspannungsnetz
Bezeichnungen siehe Fig. 2 und 4

Die Wahl der Frequenz (s. 4.2) und der Koppungsart (s. 4.3) sind weitgehend miteinander verknüpft, und die Serie- und die Parallelankopplung verhalten sich in mancher Hinsicht gerade gegenseitlich. Je ungünstiger ein Netz für eine Koppungsart, desto günstiger ist es in der Regel für die andere. Ferner ist die Serieankopplung das natürliche Gebiet der tiefen Frequenzen, während die Parallelüberlagerung mehr den höheren Frequenzen vorbehalten ist. Da aber eine Reihe nicht frei wählbarer Faktoren der Netzlage und der Platzverhältnisse usw. mitsprechen, so gibt es einen weiten Frequenzbereich, in dem beide Koppungsarten vertreten sind.

Diese allgemeinen Ausführungen über Parallel- und Serieankopplung gelten in erster Linie für dreiphasige Signalströme in Drehstromnetzen. Für einphasig asymmetrische Signalströme (s. 4.1) sind grundsätzlich ebenfalls beide Kopplungsarten anwendbar und der Zusammenhang zwischen Frequenz und Kopplungsart ist derselbe wie bei dreiphasigen Signalströmen. Die Serieankopplung ist dabei jedoch insofern im Vorteil, als bei ihr nur eine Phase des dreiphasigen Feeders mit einem Kopplungstransformator ausgerüstet werden muss (Fig. 6), während bei Parallelankopplung an zwei von drei Phasenleitern je ein einphasiges Kopplungsfilter angeschlossen werden müsste. Schliesslich liegen bei den einphasig symmetrischen (homopolaren) Signalströmen (s. 4.1) die Verhältnisse noch eindeutiger zugunsten der Serieankopplung, weil die Parallelankopplung ein dreipoliges Filter erfordert würde, während die Serieankopplung mit einem einpoligen Serientransformator auskommt, der zudem nur für den Nulleiterstrom dimensioniert werden muss (Fig. 3).

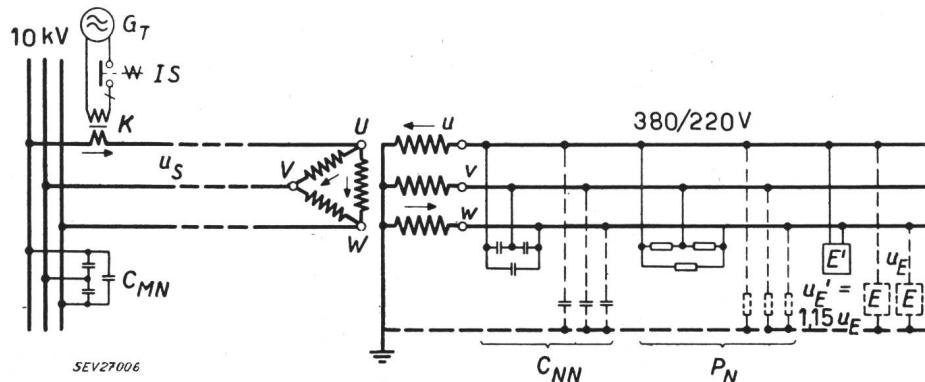


Fig. 6
Beispiel einer Serieankopplung einphasiger, asymmetrischer Signalströme an das Mittelspannungsnetz
(Ohne Nulleiter fallen die gestrichelt gezeichneten Partien weg)
Bezeichnungen siehe Fig. 2

ren) Signalströmen (s. 4.1) die Verhältnisse noch eindeutiger zugunsten der Serieankopplung, weil die Parallelankopplung ein dreipoliges Filter erfordert würde, während die Serieankopplung mit einem einpoligen Serientransformator auskommt, der zudem nur für den Nulleiterstrom dimensioniert werden muss (Fig. 3).

Die Ankopplung erfolgt vorzugsweise im Hauptspeisepunkt des zu überlagernden Gebietes, also je nach der Struktur und Ausdehnung des Netzes auf der Nieder-, Mittel- oder Hochspannungsebene.

5. Netzelemente

5.1 Allgemeines

Der Einfluss der Kondensatoren kann nicht isoliert, sondern nur im Zusammenhang mit den übrigen Netzelementen betrachtet werden. Dieser Einfluss ist oft von nachteiliger Art, wenn die resultierende Querkapazität der Kondensatoren und anderer kapazitiver oder induktiver Netzelemente mit der Längsinduktivität von Leitungen und Transformatoren zusammenwirkt. Zwei besonders unerwünschte Extremfälle dieses Zusammenspiels sind einerseits die schwach gedämpfte Serieresonanz, die eine starke Erhöhung der Empfangsspannung (s. 2.2) und eine beträchtliche Zusatzbelastung der Sende-anlage (s. 2.3) bewirkt, anderseits der Zusammenbruch der Empfangsspannung (s. 2.1), wenn die resultierende Kapazität den zweifachen Resonanzwert wesentlich überschreitet (Fig. 8). Resonanzdämpfend wirken der Querwiderstand der Ohmschen Netzlast und der Längswiderstand von Leitungen und Transformatoren.

Erwünschte Einflüsse der Kondensatoren sind gelegentlich mässige Spannungserhöhungen und vor allem die Kompensation von induktiven, tonfrequenten Querleitwerten durch kapazitive von parallelgeschalteten Kondensatoren.

5.2 Tonfrequente Eigenschaften von Netzelementen

Leitungen treten vor allem durch ihre Längsinduktivität und Querkapazität in Erscheinung. Freileitungen haben etwa 2...4mal soviel Längsinduktivität, aber etwa 20...40mal weniger Querkapazität als Kabel. Die Kapazität der Freileitungen kann deshalb meist vernachlässigt werden. Die Kapazität der Kabel interessiert insofern, als sie dieselbe Wirkung hat wie diejenige von Kondensatoren.

Zu beachten ist ferner, dass beim Zusammenspiel von Netzelementen verschiedener Transformationsstufen die Leitungskapazität mit dem Quadrat der Leitungs-Nennspannung in die Rechnung eingeht, während der Einfluss der Leitungsinduktivität im umgekehrt quadratischen Verhältnis verläuft. Die Längsinduktivität von Leitungen macht sich deshalb mehr in den niederen und die Querkapazität in den

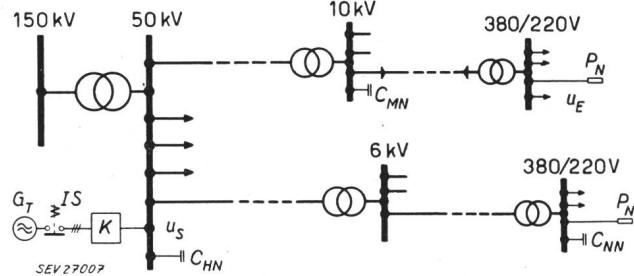


Fig. 7
Beispiel einer Parallelankopplung dreiphasiger Signalströme an das Hochspannungsnetz
C_HN Kondensatoren im Hochspannungsnetz
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 2

hohen Spannungsebenen bemerkbar. Ein 50-kV-Kabel verschluckt 100mal soviel Tonfrequenzleistung wie ein 5-kV-Kabel gleicher Kapazität. Daraus folgt, dass für die Ausbreitung tonfrequenter Signalströme im allgemeinen bei hohen Netzspannungen die Freileitungen und bei niedrigen Netzspannungen die Kabel günstiger sind.

Transformatoren wirken vor allem durch ihre Längsinduktivität (Streuinduktivität). Die tonfrequente Längsreaktanze der Transformatoren ist pro-

portional der Signalfrequenz und lässt sich deshalb aus der 50-Hz-Streureaktanz unmittelbar berechnen.

Synchronmaschinen können bei Tonfrequenz durch ihren induktiven Blindleitwert den kapazitiven Blindleitwert von Kondensatoren oder Kabeln kompensieren. Der tonfrequente Blindleitwert von synchronen Generatoren, Motoren und Kondensatoren ist gleich dem Produkt aus dem Verhältnis der Netzfrequenz zur Signalfrequenz und der reziproken Stossreaktanz. Die Belastung der Maschine und die Phasenfolge der Signalströme sind ohne Einfluss.

Asynchronmotoren spielen eine besonders wichtige Rolle, dies schon deshalb, weil sie hauptsächlich Anlass geben zum Masseneinsatz von Konden-

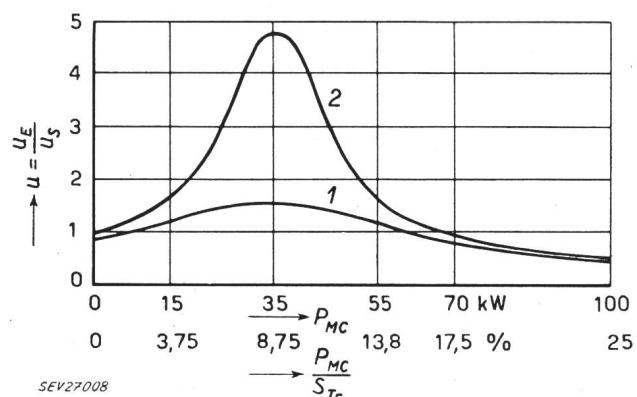


Fig. 8

Spezifische Empfangsspannung u in Funktion der kompensierten Motorenbelastung P_{MC} in den Anlagen nach Fig. 4 und 5

- 1 Ohmsche Belastung $P_R = 300$ kW
2 Ohmsche Belastung $P_R = 60$ kW

Mittelspannungsfreileitung: Länge 5 km, Querschnitt 25 mm²
Niederspannungstransformator:

Nennscheinleistung $S_{Tr} = 400$ kVA,
relative Kurzschlussreaktanz $x_e = 4\%$,
Gütefaktor $Q = 10$

Frequenz 750 Hz

$u = u_E: u_S$: spezifische Empfangsspannung = Verhältnis der relativen Empfangsspannung u_E zur relativen Sende- spannung u_S

satoren. Ihr relativ grosser induktiver Blindleitwert pro Leistungseinheit in tieferen Frequenzlagen vermag einen namhaften Teil des kapazitiven Blindleitwertes der zugehörigen Kompensationskondensatoren wettzumachen. Unterhalb etwa 220 Hz können deshalb sogar kompensierte Motoren noch erheblich induktiv wirken. Der mittlere Blindleitwert pro Leistungseinheit unkompenasierter und kompensierter gewerblicher Motoren in Funktion der Signalfrequenz ist in Fig. 1 dargestellt. Die Formel und Kurve fussen auf Durchschnittsdaten gewerblicher Motoren und auf der Annahme eines mittleren $\cos \varphi = 0,57$ der unkompenasierten und zu durchschnittlich 50 % belasteten Motoren.

Entladungslampen und Schweissapparate haben unkompenziert denselben Verlauf des induktiven Blindleitwertes in Funktion der Signalfrequenz. Dies trifft auch zu für den Blindleitwert der parallel-kompenzierten Entladungslampen und Schweissapparate. Dementsprechend wird in Fig. 1 der Verlauf des Blindleitwertes pro 144 kW Wirklast in Funktion der Frequenz in einer gemeinsamen B_E' -

Kurve für unkompenzierte Entladungslampen und Schweissapparate wiedergegeben. Analog stellt die B_{EC}' -Kurve die Blindleitwerte für parallel-kompenzierte Entladungslampen und Schweissapparate gemeinsam dar.

Im Gegensatz zu den kompensierte Motoren sind parallel-kompenzierte Entladungslampen und Schweissapparate im ganzen Tonfrequenzbereich kapazitiv. Trotzdem kommt ihnen im allgemeinen eine viel geringere Bedeutung zu als den kompensierte Motoren, weil sie leistungsmässig schwächer vertreten sind und zudem oberhalb etwa 330 Hz einen kleineren Leitwert pro Leistungseinheit aufweisen. Ferner ist ein Teil der Entladungslampen und Schweissapparate serie-kompenziert, wodurch sie bei Tonfrequenz induktiv und relativ hochohmig werden.

Die Serie-kompenzierte besteht in der Serieschaltung eines Kondensators mit der Entladungslampe und einer Stabilisierungsdrosselpule, bzw. mit der Primärwicklung des Schweisstransformators. Bei den Entladungslampen werden die Daten des Serie-kondensators und der Stabilisierungsdrosselpule so gewählt, dass der Gesamtleitwert bei Netzfrequenz kapazitiv wird («Überkompensation»). Je nach dem angestrebten $\cos \varphi$ der betreffenden Beleuchtungsanlage können dann jeder «kapazitiven» (serie-kompenzierten) Lampe eine, zwei oder gar drei «induktive» (unkompenzierte) Lampen zugeordnet werden, die nicht unbedingt an derselben Stelle installiert sein müssen [2].

Der hochohmige und induktive Charakter der unkompenzierten und der serie-kompenzierten Entladungslampen und Schweissapparate bei Tonfrequenz hat zur Folge, dass diese Objekte wenig Signalstrom absorbieren und niemals zu der besonders unerwünschten Serieresonanz mit Längsinduktivitäten von Leitungen und Transformatoren führen. In der Schweiz mögen etwa 2/3 aller neu installierten Entladungslampen von dieser Art sein. Parallel-kompenzierte Einzellampen werden heute praktisch nicht mehr verwendet. In grösseren Fabriken und Verwaltungsgebäuden werden meist unkompenzierte Lampen installiert, die dann im Bedarfsfall zentral oder gruppenweise kompenziert werden. Die Kurve B_{EC}' der Fig. 1 gilt nur für diesen Anteil von höchstens etwa 1/3 aller in der Schweiz neu installierten Lampen. Praktisch alle andern fallen unter die Kurve B_E' .

5.3 Beispiel des Zusammenspiels von Netzelementen

Fig. 8 zeigt den typischen Verlauf der spezifischen Empfangsspannung $u = u_E/u_S$ in Funktion der kompensierten Motorenlast P_M einer Anlage nach Fig. 4 oder 5. Die Daten können gegenüber den angenommenen Werten nach Fig. 8 von Fall zu Fall stark variieren, was aber am charakteristischen Verlauf der u -Kurven nichts ändert. Wenn die Längswiderstände der Leitungen und Transformatoren verhältnismässig höher oder tiefer liegen, so tritt die Spannungserhöhung in Resonanznähe schwächer oder stärker in Erscheinung. Dasselbe gilt von der grösseren oder kleineren Ohmschen Netzlast im Verhältnis zur Nennlast der Stationstransformato-

ren. Dagegen liegt der Resonanzpunkt für 750 Hz unabhängig von der Transformatorengrösse immer bei einer kompensierten Motorenlast von etwa 9 % der totalen Transformatoren-Nennleistung der Station. Bei andern Signalfrequenzen, z. B. 1000, 500, 300 Hz, läge der Resonanzpunkt bei etwa 5, 22, 110% kompensierter Motorenlast, wie sich aus der B_{MC} -Kurve der Fig. 1 ergibt.

6. Zusammenfassende Übersicht über die Einflussfaktoren

6.1 Anschlussort der Kondensatoren

Der Anschlussort der Kondensatoren (s. 3) ist von entscheidender Bedeutung für den Einfluss auf die Zentralsteueranlagen. Von ihm hängt es vor allem ab, ob ein Kondensator bestimmter Grösse sich neutral verhält, oder die Ausbreitung der tonfrequenten Signalströme nachteilig oder im günstigen Sinne beeinflusst.

Ungünstig ist die Wirkung der Kondensatoren immer dann, wenn zwischen ihnen und der Sendestelle Netzelemente liegen, deren Längsinduktivität mit der Gesamtkapazität der Kondensatoren einen Serieresonanzkreis bilden (starke Spannungserhöhungen und Steigerung der Sendeleistung) oder wenn die Kondensatoren zusammen mehr als etwa die doppelte Resonanzkapazität aufweisen (Spannungssenkung). Träger von Längsinduktivitäten sind in erster Linie Transformatoren und Freileitungen (s. 5.2).

Am häufigsten treten Schwierigkeiten mit Kondensatoren im Niederspannungsnetz in Anlagen nach Fig. 4...7 auf, weil Niederspannungskondensatoren am meisten verbreitet sind, und weil zwischen ihnen und der Tonfrequenzankopplung Transformatoren liegen (s. 5.3 und Fig. 8). Auch die Leitungsreaktanze fällt in der Niederspannungsebene am meisten ins Gewicht (s. 5.2).

6.2 Stromkreis und Phasenzahl der Signalströme

Mit einer einzigen Ausnahme haben der Stromkreis und die Phasenzahl der Signalströme keinen Einfluss auf das Verhalten der Kondensatoren gegenüber Netzkommadoanlagen. Diese Ausnahme liegt bei den homopolaren Signalströmen, bei denen nur die an den Nulleiter angeschlossenen Kondensatoren an Tonfrequenzspannung liegen (s. 4.1 und Fig. 3). Das Hauptkontingent aller Kondensatoren ist aber zwischen die Phasenleiter geschaltet und hat somit keinen Einfluss auf homopolare Signalströme.

6.3 Frequenz der Signalströme

Wo der Anschlussort der Kondensatoren überhaupt die Möglichkeit eines namhaften Einflusses auf die Zentralsteueranlage in die Nähe rückt (s. 6.1), ist die Signalfrequenz (s. 4.2) der ausschlaggebende Faktor, von dem die günstige oder ungünstige Wirkung in erster Linie abhängt. Im Einzelfall kann zwar der Einfluss bestimmter Kondensatoren grundsätzlich nur im Zusammenhang mit den übrigen Netzelementen beurteilt werden. Trotzdem ist die allgemeine Feststellung zulässig, dass die Einflüsse der Kondensatoren mit steigender Frequenz

zunehmen, teilweise sogar in mehr als quadratischer Relation (s. 5.3).

6.4 Art der Tonfrequenzankopplung ans Netz

In bezug auf den Einfluss der Kondensatoren auf Zentralsteueranlagen spielt es mit wenigen Ausnahmen keine Rolle, ob die Einspeisung der Tonfrequenz mittels Parallel- oder Serieankopplung (s. 4.3) erfolgt. Wichtiger ist eine genügend leistungsfähige Dimensionierung der Kopplungsmittel und der Sendemaschine, damit unvorhergesehene Mehrbeanspruchungen infolge Einsatzes von Kondensatoren aufgefangen werden können.

6.5 Ort der Tonfrequenzankopplung ans Netz

Der Einfluss von Kondensatoren auf die Tonfrequenzanlagen kann auch vom Ort der Ankopplung (s. 4.4) abhängen. In dieser Hinsicht besteht eine wechselseitige Beziehung zwischen dem Anschlussort der Tonfrequenzankopplung und der Kondensatoren (s. 6.1). Die grundlegenden Faktoren sind dieselben, nämlich die zwischen diesen beiden Anschlußstellen liegenden Längsinduktivitäten im Verhältnis zur Kapazität der Kondensatoren (s. 5.1) in Abhängigkeit von der Frequenz (s. 4.2).

6.6 Übrige Netzelemente

Auch von den Daten der übrigen Netzelemente hängt es ab, ob sich Kondensatoren in bezug auf die tonfrequenten Signalströme günstig, ungünstig oder neutral verhalten (s. 5.1).

Leitungen und Transformatoren wirken vor allem durch ihre Längsinduktivität. Motoren und in geringerem Masse auch Schweissapparate und Entladungslampen geben Anlass zum Einsatz von Kondensatoren. Anderseits kompensieren sie durch ihren induktiven Querleitwert je nach Frequenz ganz oder teilweise den kapazitiven Querleitwert der Kondensatoren. Auch Generatoren können durch ihren induktiven Querleitwert die Wirkung von Kondensatoren und Kabelkapazitäten wettmachen (s. 5.2).

7. Massnahmen zur Vermeidung unerwünschter Einflüsse von Kondensatoren

7.1 Vorbemerkung

Ganz allgemein gilt der Grundsatz, dass die Disposition von Netzkommadoanlagen sich nach der Anlage und Betriebsweise des Netzes richten sollte und nicht umgekehrt. Dies gilt insbesondere in dem Sinne, dass der Netzbetrieb nicht durch Rücksichten auf die als Hilfsmittel der Energieverteilung zu betrachtende Zentralsteuerung behindert werden soll. Unter den Massnahmen werden deshalb zunächst solche auf der Tonfrequenzseite in Betracht gezogen. Dies schliesst aber nicht aus, dass unter gleichwertigen Dispositionen der Energieverteilung solchen der Vorzug gegeben werden sollte, die auch für die tonfrequente Zentralsteuerung am günstigsten sind. Denn es liegt auch im Interesse der Energieverteilung, ihre Hilfsmittel zu fördern, insbesondere wo dies ohne Opfer an Kosten oder Handlungsfreiheit bei Schaltungen im Netz möglich ist. In diesem Sinne werden unter 7.4...7.8 auch einige

Massnahmen angeführt, deren Anwendung anregungsweise den Elektrizitätswerken und Fabrikanten von elektrischen Apparaten empfohlen wird. Es kann nichts schaden, dieser Frage einige Aufmerksamkeit zu schenken, selbst wo die Anschaffung einer Netzkmandoanlage zur Zeit nicht aktuell erscheint.

Da in den meisten Fällen nicht schon eine einzige Massnahme ausreicht, um das Problem restlos und ökonomisch zu lösen, so sind auch solche Mittel erwünscht, die zur Milderung von Schwierigkeiten beitragen können.

7.2 Homopolare Signalströme in Niederspannungsnetzen

Diese Lösung nach Fig. 3 ist in Anlagen kleineren oder mittleren Umfangs immer zu empfehlen, sei es in einem einzelnen Niederspannungsnetz oder in Ortschaften mit mehreren Niederspannungsnetzen, die sich leicht durch einen 1...2adrigen Hilfsdraht mit dem zentralen Tonfrequenzgenerator verbinden lassen (s. 4.1).

Die homopolare Lösung schützt zwar nur vor eventuellen Schwierigkeiten mit Kondensatoren, die nicht mit dem Nulleiter verbunden sind. Damit ist aber das Kondensatorenproblem schon zur Hauptache gelöst (s. 6.2).

7.3 Tiefe Steuerfrequenz

Das radikalste Mittel, um bei einem Masseneinsatz von Kondensatoren einen störungsfreien Netzkmando betrieb zu gewährleisten, besteht in der Wahl einer entsprechend tiefen Signalfrequenz. Die Wirksamkeit dieses Mittels geht schon aus der Resonanzbedingung $\omega^2 L C = 1$ hervor. Angewendet auf das Zusammenspiel der Kondensatorenkapazität und der Längsinduktivität von Leitungen und Transformatoren heisst dies, dass z. B. bei halb so hoher Frequenz viermal so viel Kapazität zulässig ist, ohne dass eine bestimmte Spannungserhöhung bzw. -senkung überschritten wird (s. 5.1 und Fig. 8). Dazu kommt noch der zunehmende negative Blindleitwert der induktiven Energieverbraucher bei tieferer Frequenz (s. 5.2 und Fig. 1), so dass bei halb so hoher Frequenz in Wirklichkeit mehr als viermal so viel Kapazität zulässig ist (s. 5.3).

Die konkrete Frage interessiert nun, wie tief die Frequenz angesetzt werden müsste, um Schwierigkeiten selbst bei extremem Einsatz von Kondensatoren zu vermeiden. Um diese Frequenz abzuschätzen, muss von Industriennetzen ausgegangen werden. Solche führen oft sozusagen reine Motorenbelastung, deren grosser Blindstrombedarf häufig einem Einsatz von Kondensatoren ruft, wie er bei keiner anderen Belastungsart vorkommt.

Nach der B_{MC}' -Kurve der Fig. 1 haben kompensierte Motoren den Leitwert Null bei etwa 223 Hz. Dies wäre somit die «ideale» Frequenz, bei der ein kompensierte Motorennetz theoretisch überhaupt keinen Tonfrequenzstrom absorbieren und deshalb auch keinen Spannungsverlust gegenüber der Sendespansnung erleiden würde. Zwischen 200 und 240 Hz bleibt der tonfrequente Leitwert innerhalb $\mp j1$ S pro 144 kW kompensierte Motorenlast. Dies entspricht dem Leitwert von 144 kW rein Ohmscher

Belastung im 380/220-V-Netz. Im Bereich von etwa 200...240 Hz wären also Schwierigkeiten mit normal kompensierte gewerblichen Motoren auch nicht zu erwarten. Für überkompensierte Motoren liegt dieser Bereich noch etwas tiefer, für nur teilweise kompensierte Motoren entsprechend höher. Auch in Fabriken mit besonderen Betriebsverhältnissen mögen die Daten etwas abweichen (s. 5.2).

Ganz abgesehen von dieser Uneinheitlichkeit darf niemals die Kondensatorenfrage als alleinige Richtschnur für die Wahl der Signalfrequenz dienen. Schon die Nachbarschaft von Oberwellen schliesst gewisse Frequenzbereiche aus. Dazu kommt manchmal die Rücksicht auf benachbarte Anlagen. Wichtig ist aber auch die ökonomische Seite: Sowohl die Empfangsgeräte als auch die Sendeanlagen erfordern bei sehr tiefen Frequenzen mehr Aufwand. Die Wirksamkeit einer passend tiefen Signalfrequenz als Massnahme zur Vermeidung unerwünschter Einflüsse von Kondensatoren steht aber im Prinzip nicht in Frage. Es ist übrigens schon viel gewonnen, wenn in Netzen mit viel Kondensatoren durch Meidung unnötig hoher Frequenzen nur wenige grosse und nicht auch die vielen mittleren und kleinen Kondensatoren gesperrt werden müssen.

7.4 Fluoreszenzlampen mit Seriekompensation

Die gemischte Verwendung von unkompenzierten und seriekompensierte Entladungslampen verursacht im ganzen Frequenzbereich keine Schwierigkeiten (s. 5.2). Sie stellt auch in anderer Hinsicht eine vorteilhafte Lösung dar, weshalb ihre möglichst weitgehende Verwendung zu empfehlen ist. Einzig bei Beleuchtungsanlagen grosser Fabrik-, Geschäfts- oder Verwaltungsgebäude ist die Verwendung unkompenzierte Einzellampen in Verbindung mit Zentral- oder Gruppenkompensation ökonomischer. Falls dabei die Zentralsteuerung Massnahmen erfordert, fallen diese unter Abschnitt 7.9.

7.5 Schweißtransformatoren mit Seriekompensation

Da die Seriekompensation auch noch andere Vorteile aufweist und die Netzkmandoanlagen nicht behindert (s. 5.2), so ist ihre vermehrte Anwendung im Interesse aller Beteiligten zu empfehlen.

7.6 Abschaltung von Kondensatoren bei schwacher Netzlast

Durch dieses Mittel werden die tonfrequenten Spannungsspitzen vermieden, die bei schwacher Netzlast auftreten können (s. 5.3 und Fig. 8). Auch vom Standpunkt des Netzbetriebes ist die Abschaltung der Kondensatoren ausserhalb der Arbeitsstunden zweckmässig [5].

7.7 Nicht mehr Kondensatoren als nötig

Da und dort zeigt sich eine Neigung, unnötig viel Kondensatoren zu installieren. Man will auf der sicheren Seite sein und übersieht, dass auch über das Ziel hinaus geschossen werden kann. Vom reinen 50-Hz-Betriebsstandpunkt mag dies im Rahmen von Einzelfällen beschränkten Ausmasses harmlos sein, selbst wenn bis auf $\cos \varphi = 1$ oder gar auf leicht kapazitiven $\cos \varphi$ überkompensierte wird. Es ist aber zu betonen, dass die Elektrizitätswerke

daran doch wohl mindestens kein wirkliches Interesse haben. Demgegenüber wird auf Grund jahrelanger Erfahrung ein Leistungsfaktor angestrebt, der ein ökonomisches Optimum sowohl auf der Erzeugungs- wie auch auf der Verteilerseite darstellt [5]. Dieser Wert scheint von Land zu Land etwas unterschiedlich zu sein und z. B. in Holland bei 0,8 und in der Schweiz im Durchschnitt etwas höher zu liegen.

Eine Kondensatorenbestückung, die wesentlich weitergeht als bis zur Verbesserung des Leistungsfaktors auf den vom Lieferwerk vorgeschriebenen Mindestwert, bedeutet nicht nur unnötigen Aufwand, sondern auch eine zwecklose Erschwerung des Betriebes von Netzkommandoanlagen. Durch sachgemäße Beratung der Energieverbraucher kann dies im beidseitigen Interesse vermieden werden.

7.8 Seriekompensation von Netzen

Wären die Netze mittels Seriekondensatoren statt durch die hierzulande fast ausschliesslich verwendeten Shuntkondensatoren kompensiert, so gäbe es für die Netzkommandotechnik keine Kondensatorenprobleme. Im Gegenteil würde auch der tonfrequente Spannungsabfall eher noch etwas kleiner.

Seriekondensatoren sind in den Vereinigten Staaten seit etwa 30 Jahren bekannt und seit etwa 10 Jahren sehr verbreitet. In der Schweiz stammen die meisten Informationen aus Schweden. Die Erfahrungen scheinen allgemein zu befriedigen. Nach einer schwedischen Publikation [6] sind die Vorteile des Seriekondensators nicht auf lange Freileitungen beschränkt, sondern auch in Kabelnetzen vorhanden. Die Vorteile bestehen in einem unverzögerten, automatischen Ausgleich von Spannungsabfällen, die auch Ohmschen Ursprungs sein können. Nach dieser Publikation sollen sich Seriekondensatoren außer zur Kompensation von Spannungsabfällen in Leitungen und Transformatoren auch zur Verbesserung des Leistungsfaktors eignen. Demnach können sie ganz oder teilweise die Funktionen der Shuntkondensatoren übernehmen [6; 7].

Den wirtschaftlichen Vergleich mit Shuntkondensatoren sollen die Seriekondensatoren nach Informationen aus verschiedenen Ländern gut bestehen. Wieweit sie sich auch für unsere Verhältnisse eignen, müsste Gegenstand näherer Untersuchungen sein. Die Aussicht, neben direkten Vorteilen für die Energieversorgung auch zur Lösung besonders schwieriger Fälle des Kondensatorenproblems bei der Zentralsteuerung beizutragen, dürfte die Prüfung dieser Frage in vermehrtem Masse rechtfertigen.

7.9 Tonfrequente Sperrung der Kondensatoren

Da keine der vorgenannten Massnahmen überall anwendbar ist oder eine umfassende Lösung darstellt, so bleibt die konventionelle Massnahme der tonfrequenten Sperrung («Verdrosselung») nach wie vor da und dort aktuell. Die Leitsätze des SEV aus dem Jahre 1952 [3] stellen im wesentlichen immer noch eine brauchbare Basis dar.

Es wird empfohlen, in erster Linie den Parallelresonanzkreis nach Fig. 2 der Leitsätze anzuwenden,

da dieser eine viel geringere Spannungserhöhung am Kondensator verursacht, als nur eine Sperrdrosselspule nach Fig. 1. Dementsprechend wird auch die Drosselspule nach Fig. 2a, bzw. der Transformator nach Fig. 2b, kleiner als die Drosselspule nach Fig. 1. Abgesehen von ganz kleinen Objekten ist der Sperrkreis nach Fig. 2 deshalb auch die ökonomischere Lösung. Die Unterteilung des Hauptkondensators nach Fig. 3 mit einer Drosselspule in Serie mit dem einen Teilkondensator kommt wenig und nur in Neuanlagen zur Anwendung.

Für die Lösung nach Fig. 1 ist in Zeile 2 der Tabelle eine Sperrdrosselspule mit 5% Spannungserhöhung angegeben. Sie ist im ganzen Geltungsbereich der Leitsätze, also für alle ums Jahr 1952 als praktisch bedeutsam erachteten Frequenzen von 475...2000...(3000) Hz verwendbar. Diese Ausführung war vor allem für Netze vorgesehen, in denen man von Anfang an die Kondensatoren verdrosseln, aber die Wahl der Steuerfrequenz noch offen lassen will. Heute werden aber auch Steuerfrequenzen von weniger als 475 Hz wieder verwendet (s. 4.2). Trotz der grossen 50-Hz-Spannungserhöhung von 5% am Kondensator werden jedoch mit solchen Drosselspulen die Sperrbedingungen bei Frequenzen unter 475 Hz nicht erfüllt. Von 324 Hz an abwärts nehmen in dieser Weise verdrosselte Kondensatoren sogar mehr Tonfrequenzstrom auf als die unverdrosselten Kondensatoren. In der Nähe der Resonanzfrequenz $f_s = 229$ Hz wirken sie geradezu als Saugkreise. Im Sinne einer Allfrequenzverdrosselung sind also Drosselspulen nach Zeile 2, Seite 6 der Leitsätze heute als überholt zu betrachten, da sie für einen Teil der neuerdings verwendeten Frequenzen ungeeignet oder ausgesprochen schädlich sind.

Daraus folgt, dass vorhandene Drosselspulen nach Fig. 1 der Leitsätze in Anlagen mit Steuerfrequenzen von weniger als etwa 324 Hz besser außer Betrieb gesetzt werden. Womöglich soll nicht verdrosselt werden bevor die Signalfrequenz bekannt ist, um so mehr, als sich auch erst dann beurteilen lässt, ob Massnahmen überhaupt notwendig sind (s. 6.3 und 7.3).

8. Zusammenfassung

Mit einer Beeinflussung der Netzkommandoanlagen durch Kondensatoren ist grundsätzlich zu rechnen. Doch sollen die Kondensatoren nicht von vornherein als Stein des Anstoßes betrachtet werden. Auch andere Netzelemente haben Eigenschaften, die sich dem Netzkommandotechniker das eine Mal als Vorteil, das andere Mal als störender Faktor präsentieren. Erst vom Zusammenspiel mehrerer oder aller Netzelemente hängt es ab, ob bei einer bestimmten Anlagedisposition die Kondensatoren neutral, nachteilig oder vorteilhaft wirken.

Sowohl in der Wahl der Signalstromart und des Ortes der Ankopplung als auch vor allem der Frequenz gibt es eine Reihe von Ausweichmöglichkeiten, die es oft gestatten, ein vermeintliches Übel zum Segen gereichen zu lassen, oder doch einer Schwierigkeit die Spitze zu brechen. Auch gewisse betriebliche Anpassungen bei Energieverbrauchern und Rücksichten bezüglich der Ausführung von elektrischen Apparaten können dazu beitragen.

Literatur

- [1] Pelpel, J.: Etudes et nouvelles réalisations de la Compagnie des Compteurs. Bull. SEV Bd. 41 (1950), Nr. 5, S. 160...173.
 Koenig, W.: Die Grundzüge des Zentralsteuersystems von Landis & Gyr. Bull. SEV Bd. 41 (1950), Nr. 5, S. 173...178.
 Grob, O.: Netzkommadoanlagen der Zellweger A.-G., Uster. Bull. SEV Bd. 41 (1950), Nr. 5, S. 178...181.
 Spahn, E.: Das Sauter-Fernsteuersystem. Bull. SEV Bd. 41 (1950), Nr. 5, S. 181...184.
- [2] SEV 0199.1954. Leitsätze für Leistungsfaktor und Tonfrequenz-Impedanz bei Entladungslampen. 2. Aufl. Zürich: Schweiz. Elektrotechnischer Verein 1954.
- [3] SEV Publ. 185/1 d. Leitsätze für die Anwendung von grossen Wechselstrom-Kondensatoren für die Verbesserung des

Leistungsfaktors von Niederspannungsanlagen. Ergänzung. Zürich: Schweiz. Elektrotechnischer Verein 1952.

- [4] Meister, H.: Störungen von Fernmeldeanlagen durch Netzkommadoanlagen. Techn. Mitt. PTT Bd. 32 (1954), Nr. 11, S. 436...439.
 [5] Hustinx, H. A. L. M.: Het probleem van de $\cos \varphi$ in de huidige electriciteitsvoorziening. a) Het probleem van de $\cos \varphi$ vanuit de gezichtshoek van de electriciteitsbedrijven. Ingenieur, 's-Gravenhage Bd. 65 (1953), Nr. 26, S. E. 19...E. 127.
 [6] Smedsfelt, S. und P. Hjertberg: Series Capacitors for Distribution Networks. ASEA J. Bd. 27 (1954), Nr. 9, S. 123...136.
 [7] Hochhäuser, P.: Die Reihenkompenstation für Mittelspannungsnetze. ETZ, Ausg. A, Bd. 79 (1958), S. 169...173.

Adresse des Autors:

Dipl. Ing. W. Koenig, Reckenbühlstrasse 7, Luzern.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Besuch der neuen Transformatorenfabrik und des Hochspannungslaboratoriums der Maschinenfabrik Oerlikon

621.314.21.006.3 + 621.317.2.027.3 (494.341)

Am 23. September 1958 lud die Maschinenfabrik Oerlikon (MFO) in Zürich einen Teil ihrer Kunden, der Hochschulen und der Presse zu einer Besichtigung des neu erstellten Hochspannungslaboratoriums und der Transformatorenfabrik ein¹⁾.

Bei strahlendem Wetter begrüssten am Eingang zum Fabrikareal die Schweizerfahne und die gelbe Flagge der MFO die zahlreichen Besucher. Diese versammelten sich in der Transformatorenfabrik und wurden dort von Direktor R. Huber, Mitglied der Geschäftsleitung, begrüßt. Aus seinen Worten konnte man feststellen, dass die heute 4500 Angestellte und Arbeiter beschäftigende Fabrik ihre Produktivität im vergangenen Jahr um 15 % steigern konnte. Erfreulich ist auch, dass der Bestellungseingang der Firma als befriedigend bezeichnet werden kann. Anschliessend gab Direktor Dr. W. Lindecker einen zusammenfassenden Überblick über die technische Entwicklung der MFO mit besonderer Berücksichtigung der Transformatoren. Seinen Erörterungen entnehmen wir folgendes:

«Beinahe seit ihrer Gründung im Jahre 1876 hat sich die MFO ganz besonders mit den Fragen der Erzeugung und des Transportes elektrischer Energie und der Herstellung der dazu benötigten Maschinen, Apparate, Messeinrichtungen und Regelungen be-

Sprung in Richtung grösserer Maschinenleistungen gekennzeichnet.

Um die steigenden Leistungen zu übertragen, hat man die Betriebsspannungen der Leitungen und damit der Transformatoren in nicht mehr seltenen Fällen auf 400 kV erhöht, und bereits plant oder studiert man, in Russland, Amerika und Schweden, die Übertragung bei einer Spannung von 500...600 kV. Die maximale Leistung eines Dreiphasentransformators oder einer Gruppe von 3 Einphasentransformatoren ist auf 400...600 MVA angewachsen.

Besonders seit dem Kriege wurden durch zahlreiche und eingehende Untersuchungen und Beobachtungen festgestellt, welche atmosphärischen und innern Überspannungen in den Übertragungsnetzen und daran angeschlossenen Transformatoren auftreten können. Gegenwärtig befasst sich das Comité d'Etudes 28 der CEI (Koordination der Isolation) mit der

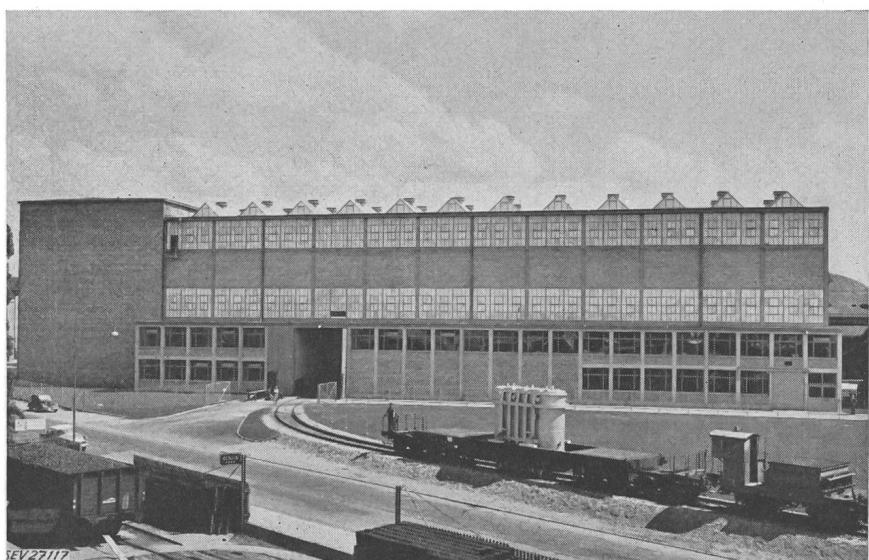


Fig. 1
 Aussenansicht der neuen
 Transformatorenfabrik

beschäftigt und besitzt daher auf diesem Gebiet eine grosse, sich über Jahrzehnte erstreckende Erfahrung und eine alte Tradition.

Seit dem Beginn der Entwicklung konnte man ein ständiges Anwachsen der Einheitsleistungen der Maschinen feststellen, bedingt durch eine bessere Nutzung der Primärenergiequelle, durch den besseren Wirkungsgrad bei der Umwandlung der Primärenergie in elektrische Energie bei grösseren Einheiten, durch kleinere Investitionskosten pro erzeugte Energieeinheit bei grösseren Maschinen und durch rationelleren Betrieb in grösseren Kraftwerken. Auch die Distanzen zwischen Erzeugungszentren, besonders den hydroelektrischen Kraftwerken und den Verbrauchszentren, wachsen immer weiter an und betragen bis zu 1000 km und mehr. Diese Entwicklung hat heute ihren Abschluss noch nicht erreicht; im Gegen teil ist gerade die Gegenwart durch einen markanten

Festlegung von Regeln für die Stoßhaltespannung, denen Transformatoren bei der Abnahmeprüfung standhalten müssen. So wird die Stoßhaltespannung für eine Netzspannung von 420 kV zwischen den Werten 1060 und 1550 kV liegen.

Durch die Entwicklung in Richtung höherer Spannung und höherer Leistung und durch die genaueren Kenntnisse der Vorgänge in den Übertragungsnetzen erwuchsen dem Transformatorenbauer neue Probleme, von denen wohl demjenigen der Isolation die grösste Bedeutung zukommt. Durch Verschachtelung der Wicklung erreicht man axial eine lineare Verteilung der Stoßspannung. Damit wird eine gleichmässige Beanspruchung der Isolation über die ganze Wicklungslänge erzielt, was eine wirtschaftliche Herstellung der Wicklung ermöglicht. Durch die Verschachtelung wird die Serikapazität der Wicklung erhöht, dadurch eine Linearisierung der Spannungsverteilung erzwungen, und es werden lokale Schwingungen unterdrückt.

¹⁾ Vgl. Bull. SEV Bd. 48 (1957), Nr. 19, S. 861...862.