

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 70 (1979)

Heft: 9

Artikel: Schaltprobleme in 20-kV-Netzen und eine mögliche Lösung

Autor: Ganz, A. / Honz, O.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-905375>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.01.2026

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

Schaltprobleme in 20-kV-Netzen und eine mögliche Lösung

Von A. Ganz und O. Honz

621.316.57:621.316.13;

Auf Grund der Erfahrung im 20-kV-Freileitungsnetz der Energie-Versorgung Schwaben AG hat man für die Leistungsschalter, die in diesem Netz eingesetzt werden, einen speziellen Prüfzyklus geschaffen. Durch diese strengere Selektion hofft man, die Störanfälligkeit bei Gewittern zu reduzieren.

Sur la base des expériences faites dans les réseaux aériens de distribution à 20 kV de la société Energie-Versorgung Schwaben S.A., on a conçu un programme d'essai spécial pour les disjoncteurs correspondants. Du fait de cette sélection sévère on espère réduire les dérangements par temps d'orage.

1. Einleitung

Nach den zurzeit in der Bundesrepublik Deutschland gültigen Prüfbestimmungen für Leistungsschalter, VDE 0670 Teil 1/1.64 bzw. IEC 56-4, ist zum Nachweis des Schaltvermögens im Rahmen einer Typenprüfung die Prüfschaltfolge 0- t_u -CO- t -CO (O = Ausschalten, C = Einschalten) bei 10%, 30%, 60% und 100% der Nennausschaltleistung gefordert. Dieser Schaltzyklus bildet eine erfolglose Kurzunterbrechung (auch mit KU-Schaltung bzw. Schnellwiedereinschaltung bezeichnet) mit anschliessendem erfolglosem Schaltversuch nach. Die Unterbrechungszeit t_u beträgt üblicherweise 0,3 s, die Pausenzeit t etwa 3 min. Die Betriebserfahrungen in den 20-kV-Freileitungsnetzen der Energieversorgung Schwaben AG, Stuttgart (EVS), deuten jedoch darauf hin, dass die Anforderungen, denen die Leistungsschalter im Netzbetrieb unterworfen sind, durch diese Prüfbestimmungen nicht ausreichend nachgebildet werden.

Weitere aussergewöhnliche Beanspruchungen, die im folgenden auch behandelt werden sollen, ergeben sich beim Schalten von Nullpunktgebildnern mit angeschlossener Erdschlusslöschspule während eines Erdschlusses. Die Forderung an das Schaltgerät ist in diesem Fall das sichere Abschalten eines Nullpunktgebildners mit erregter Kurzschlusslöschspule ohne Gefährdung der Schaltanlage und angeschlossener Betriebsmittel durch Überspannungen.

2. Betriebliche Anforderungen an Leistungsschalter in Mittelspannungsnetzen

2.1 Ursachen und Folgen von Schäden an in den 20-kV-Netzen der EVS eingesetzten Leistungsschaltern

Die 20-kV-Netze der EVS umfassen eine Stromkreislänge von ca. 12900 km, davon sind etwa 9300 km Freileitungen. Durch atmosphärische Einwirkungen kam es über einen Zeitraum von 10 Jahren zu mehreren schwerwiegenden Störungsfällen, bedingt durch Schalterversagen. Anhand einiger dieser Störungen sollen die Beanspruchungen, denen die Schalter im Netzbetrieb ausgesetzt sind, aufgezeigt und die Auswirkungen bei Nichtbeherrschung dieser Anforderungen dargestellt werden.

So wurde z.B. ein Leistungsschalter während eines Gewitters nach einer Leitungsauslösung (erfolglose KU-Schaltung) bei einem darauffolgenden Schaltversuch nach ca. 3 min mit einer weiteren Kurzschlussabschaltung belastet. Diese wurde zwar ausgeführt, doch etwa 2 min später explodierte ein Schalterpol.

In einer Fahrwagenanlage kam es an einem in der Betriebsstellung geöffneten Schalter zu Qualmentwicklung und Verrussung. Etwa 40 min zuvor hatte der Schalter nach einer

erfolgreichen KU-Schaltung im Abstand von ca. 1 min eine Leitungsauslösung (erfolglose KU-Schaltung) ausgeführt.

Ein weiterer gravierender Fall ereignete sich, als während eines Gewitters ein Schalter mit vier erfolgreichen KU-Schaltungen in kurzen Zeitabständen von weniger als einer Minute beansprucht wurde. Der Überdruck in einer Löschkammer führte zur Beschädigung eines Schalterpolos.

Nach einer erfolglosen KU-Schaltung und einem darauf folgenden Schaltversuch wurde in einer Schaltanlage Brandgeruch und leichte Rauchbildung festgestellt. Schäden an Schalter und Anlage konnten durch sofort eingeleitete Massnahmen verhindert werden.

Die anstehende Kurzschlussleistung betrug bei den oben angeführten Fällen maximal 50% der Nennausschaltleistung der eingesetzten Leistungsschalter. Die Schalter selber werden in regelmässigen Zeitabständen kontrolliert, gewartet und revisiert.

Diese Störungsfälle können auf zwei unterschiedliche Ursachen zurückgeführt werden. Zum einen wird durch mehrfaches Schalten in kurzen Zeitabständen in den Löschkammern ein Überdruck aufgebaut, der zum Bersten und damit zu einer Ölgasexplosion führen kann. Die zweite mögliche Ursache ist eine Kriechwegbildung längs der Kammerwand, so dass im geöffneten Zustand die dielektrische Festigkeit nicht mehr gewährleistet ist. Dies führt zu unzulässigen Ableitströmen mit Qualmentwicklung, Verrussung und evtl. Bränden in den betroffenen Anlagen.

Die Prüfbestimmungen sehen nach einer erfolglosen KU-Schaltung eine Pausenzeit von 3 min vor; insgesamt sind bei einem Prüfzyklus nur drei Ausschaltungen zugelassen. Die betrieblichen Erfahrungen zeigen jedoch, dass mehr als drei Ausschaltungen innerhalb weniger Minuten möglich sind (z.B. während eines Gewitters eine Reihe von erfolgreichen KU-Schaltungen, die vom selben Schalter ausgeführt werden) und dass auch die vorgesehene Pausenzeit, bedingt durch Erfordernisse des Netzbetriebes, nicht eingehalten wird.

Vom Antrieb her betrachtet sind alle in den Mittelspannungsnetzen der EVS eingesetzten Leistungsschalter nach spätestens 15 s wieder schaltbereit. Die meisten dieser Schalter stehen in unbesetzten Stationen. Eine Kontrolle oder eine Ölerneuerung, die für einzelne Fabrikate nach ein oder zwei schweren Kurzschlussabschaltungen gefordert ist, lässt sich somit nicht immer durchführen. Auch in besetzten Stationen sind diese Forderungen nicht praxisgerecht, da bei Beanspruchung eines Schalters mit mehreren KU-Schaltungen in kurzen Zeitabständen von Minuten dieser Schalter nicht gewechselt werden kann. Zudem sollten während eines Gewitters die Hochspannungsräume einer Anlage nicht betreten werden.

2.2 Beobachtungen in einem Mittelspannungsnetz der EdF

Was die zeitlichen Abstände zwischen einzelnen Schaltungen eines Schalters während eines Gewitters betrifft, kommt eine Untersuchung der EdF zu Ergebnissen, die die in den 20-kV-Netzen der EVS gemachten Erfahrungen bestätigen [1]. In dieser Studie sind einige Aussagen über die Häufigkeit von Ansprechvorgängen bei Überspannungsableitern während eines Gewitters getroffen. Diese Aussagen stützen sich auf Beobachtungen und Messungen einer Studiengruppe, die den Schutz von Verteilungstransformatoren gegen atmosphärische Überspannungen untersuchte. In Mittelspannungs-Freileitungsnetzen lassen sich Ansprechvorgänge von Ableitern direkt auf Blitzeinschläge in Freileitungen zurückführen. Diese Freileitungen werden üblicherweise ohne Erdseil gebaut, so dass bei den geringen Leiterseilabständen Blitzeinschläge praktisch immer mehrpolige Fehler mit oder ohne Erdberührung zur Folge haben. Der Leistungsschalter am Einspeisepunkt der Leitung führt dann eine Schnellwiedereinschaltung aus. Oder anders ausgedrückt: Übertragen auf den Leistungsschalter können somit Ansprechvorgänge von Ableitern zahlenmäßig mit Schnellwiedereinschaltungen gleichgesetzt werden.

Über einen Beobachtungszeitraum von drei Jahren wurde festgestellt, dass zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ansprechvorgängen während eines Gewitters in derselben Station 10 bis 30 % der Zeitintervalle kürzer als 1 min sind. Zusätzlich sind etwa 20 % der Zeitintervalle, die zwischen zwei Ansprechvorgängen desselben Ableiters liegen, kleiner als 1 min. Dies bestätigt die Vorstellung, dass ein Gewitter als eine geographisch eng begrenzte meteorologische Erscheinung im wesentlichen eine oder einige wenige Freileitungen, dafür aber in kurzen Zeitintervallen, in der Größenordnung Minuten, in Mitleidenschaft zieht.

3. Bedingungen der EVS für die Kurzschlussprüfungen von 24-kV-Leistungsschaltern mit einer Nennaußschaltleistung von 500 MVA bei Ausschaltungen in kurzen Zeitabständen: «Gewitterprüfzyklus»

Aus der Erfahrung, dass die Prüfbedingungen eines Schalters nach VDE bzw. IEC den Erfordernissen des Betriebes nicht immer voll entsprechen, hat die EVS für ihre Belange einen speziellen «Gewitterprüfzyklus» ausgearbeitet. Die Erfüllung dieses speziellen Schaltzyklus ist eine Bedingung für den Einsatz eines Leistungsschalters in den 20-kV-Netzen der EVS.

Es sind 10 Ausschaltungen mit einem Kurzschlußstrom von 5,5 kA (200 MVA) unmittelbar aufeinanderfolgend im zeitlichen Abstand von jeweils 15 s auszuführen. Die betriebsfrequent wiederkehrende Spannung beträgt 21 kV. Die Werte der transienten, wiederkehrenden Spannung sollen IEC entsprechen.

Unmittelbar anschließend an die letzte Kurzschlussabschaltung erfolgen Spannungsprüfungen. Der geöffnete Leistungsschalter bleibt 15 min an Spannung 21 kV. Die drei Schaltkammern werden mit $21/\sqrt{3}$ kV beansprucht. Daran anschließend wird eine Spannungsprüfung bei Erdschluss durchgeführt. Dazu wird in Phase R und T nacheinander 15 min lang ein Erdschluss eingelegt. Die Spannungsbeanspruchung für die Schaltkammern beträgt somit 21 kV. An die Spannungsprüfungen schließt sich zum Nachweis der Funktionsstüchtigkeit des Prüflings eine Betriebsstromabschaltung 100 A,

$\cos \varphi = 0,7$ an. Der Schalter darf jetzt revidiert oder gegen einen neuen ausgetauscht werden.

Es folgen nun 5 Kurzschlussabschaltungen bei 13,8 kA (500 MVA) unmittelbar aufeinanderfolgend im zeitlichen Abstand von jeweils 15 s bei einer betriebsfrequent wiederkehrenden Spannung von 21 kV. Die Werte der transienten Einschwingspannung sollen IEC entsprechen. Der Asymmetriefaktor des Stromes im Augenblick der Kontakttrennung soll 0,2 betragen. Unmittelbar anschließend an die fünfte Ausschaltung werden die gleichen Spannungsprüfungen und Betriebsstromabschaltung wie beim ersten Zyklus durchgeführt.

Der Prüfkreis ist für beide Zyklen der übliche, d.h. Speiseseite nicht geerdet, die am Schalter kurzgeschlossene Seite hingegen ist starr geerdet.

An jedem Prüfling sind mit einem Kurbelinduktor bei einer Prüfspannung von mindestens 1500 V die Isolationswiderstände der einzelnen offenen Schaltstrecken zu messen, und zwar vor Beginn der Prüfung und unmittelbar nach Ende der Spannungsprüfung mit Phasenspannung.

Am Schluss sollen die Kontakte ausgebaut und auf die Veränderung durch die Schaltbeanspruchung kontrolliert werden.

4. SF₆-Selbstblasschalter speziell geeignet für Gewitterprüfzyklen

In den vergangenen Jahren wurden in den 20-kV-Netzen der EVS nur noch Schalttypen eingesetzt, die im Abschnitt 3 genannten Prüfungen mit Erfolg bestanden haben. Bisher werden im Mittelspannungsbereich fast ausschließlich ölarme Leistungsschalter verwendet. Neuerdings werden für diesen Spannungsbereich Neuentwicklungen angeboten, Vakuum- und SF₆-Schalter.

Der SF₆-Selbstblasschalter, wie er seit zwei Jahren von BBC, Baden, fabriziert wird (Fig. 1), eignet sich von seinem Löschrinzip her gut für die Beherrschung der Beanspruchungen bei den beschriebenen Gewitterprüfzyklen. Schwefelhexafluorid (SF₆) ist besonders prädestiniert als Isolier- und Löschgass im Schalterbau [2]. Fig. 2 zeigt einen schematischen Schnitt durch eine Löschkammer des SF₆-Selbstblasschalters. Bei geschlossenem Schalter fliesst der Strom über die Finger und den

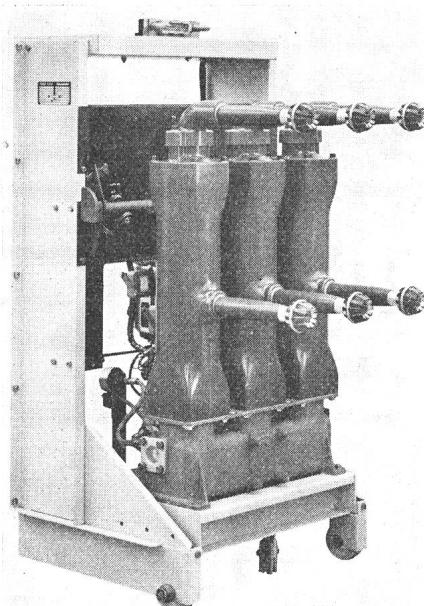
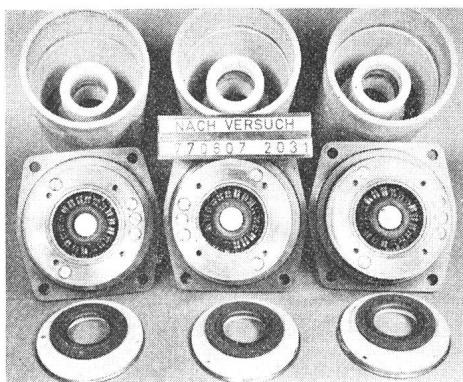
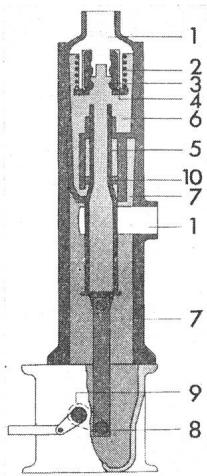


Fig. 1
SF₆-Selbstblasschalter
Typ HB
für Innenraum

Fig. 2
Schnittbild des SF₆-Selbstblasschalters Typ HB

- 1 Stromanschluss
- 2 Zylinderspule
- 3 Nennstromkontakt (Finger)
- 4 Leistungskontakt fest
- 5 Leistungskontakt beweglich
- 6 Löschraum
- 7 Auspuffraum
- 8 Polhebel
- 9 Drehwelle
- 10 Blashilfe



An den Kontaktfingern ist ein sehr geringer Abbrand zu sehen

Fig. 3 SF₆-Selbstblasschalter Typ HB,
Löschkontakte nach 10 Ausschaltungen
mit einem Ausschaltstrom von 12,5 kA
und einer Spannung von 24 kV

beweglichen Leistungskontakt. Konzentrisch und parallel zu den Nennstromfiguren liegt ein Leistungsstrompfad, in den eine Stromspule integriert ist. Beim Ausschalten wird der gesamte Strom auf den Leistungsstrompfad kommutiert. Die stromdurchflossene Spule erzeugt in der Löschzone ein Magnetfeld, welches den Lichtbogen auf dem Laufring zum Rotieren bringt. Dieser rotierende Lichtbogen bewirkt eine Aufheizung des Gases und damit auch einen dem Strom entsprechenden Druckanstieg im Löschraum. In der Folge entsteht eine Gasströmung durch den beweglichen Leistungskontakt zum Auspuffraum, welche den Lichtbogen axial bebläst und zum Löschen bringt.

Dieses Löschprinzip hat den Vorteil, dass es fast unabhängig ist von der Kontaktgeschwindigkeit und einen energie schwachen Antrieb gestattet. Wegen der Rotation des Lichtbogens ist der Kontaktabbrand gering [3]. Fig. 3 zeigt den Zustand der Kontakte nach 10 Kurzschlussausschaltungen. In der ausgeschalteten Stellung sind die beiden Kontakte lediglich durch eine freie Gasstrecke verbunden; dieser Schalter hat deshalb eine sehr hohe Durchschlagsfestigkeit. Da bei Kurzschlussausschaltungen nur eine geringe Druckerhöhung stattfindet und das SF₆-Gas bei 2000 K eine sehr hohe spezifische Wärme und somit auch eine gute Wärmeleitfähigkeit besitzt, ist der Schalter von der Löschkammer her betrachtet sofort wieder für eine weitere Schaltung bereit [4]. Er eignet sich somit auch speziell für den Einsatz in Freileitungsnetzen mit hoher Gewitterhäufigkeit.

5. Resultate der mit dem SF₆-Schalter durchgeführten Gewitterprüfzyklen

Nur wenige Kurzschlussprüffelder sind in der Lage, die geforderten Zyklen, d. h. 10 bzw. 5 Kurzschlussausschaltungen mit einer Pausenzeit von 15 s zu prüfen. Speziell geeignet sind Prüffelder, die ihre Kurzschlussleistung direkt aus dem Netz beziehen. Die Versuche wurden deshalb bei der Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs- und Hochstromtechnik e.V. (FGH) in Mannheim durchgeführt.

Es wurden zwei Schalter vom Typ HB 24.12.12 geprüft. Der erste wies eine SF₆-Füllung mit Normaldruck und der zweite Schalter eine solche mit Minimaldruck auf. Mit beiden Schaltern wurde ohne Revision das volle Prüfprogramm geschaltet. Im Prüfbericht der FGH wurde das Prüfergebnis wie folgt beurteilt:

«Die beiden Leistungsschalter haben alle genannten Ausschaltungen einwandfrei ausgeführt und die Spannungsbean-

spruchungen überstanden. Die Widerstandsmessung der Schaltstrecken mit 1500 V_{dc} in allen Polen beider Schalter vor der Prüfung und unmittelbar nach dem Abschalten der Wiederkehrspannung nach jedem Zyklus ergab stets Messwerte > 20000 MΩ.

Die Besichtigung der nach der Prüfung zerlegten Schalter zeigte keine Schäden und keine die Funktion der Schalter beeinträchtigende Veränderungen. Der Verschleiss an Kontakten war gering und entsprach den Beanspruchungen durch die Prüfung. Die Schalter könnten weiterhin in Betrieb bleiben.

Der Leistungsschalter hat die genannte Prüfung bestanden.»

6. Schalten von Nullpunktgebildnern mit angeschlossener Erdschlusslöschspule

Neben dem Nachweis des Schaltvermögens in kurzen Zeitabständen schenkt die EVS dem Schalten von Nullpunktgebildnern mit angeschlossener Erdschlusslöschspule besondere Aufmerksamkeit. Nullpunktgebildner ermöglichen einen belastbaren Sternpunkt auch dann, wenn die Voraussetzungen dafür vom speisenden Transformator nicht gegeben sind.

In den kompensierten 20-kV-Netzen der EVS werden generell Nullpunktgebildner verwendet. Es sind dies in Zickzack geschaltete Drosseln mit Eisenkern, deren Sternpunkt über eine Löschspule geerdet ist. Weist nun das Netz einen Erdschluss auf, so fließen in allen drei Phasen gleichphasige Ströme, die sich in der Löschspule zum Erdstrom summieren (Fig. 4). Muss ein Leistungsschalter einen solchen Nullpunktgebildner mit Löschspule während eines Erdschlusses abschalten, so ist es richtig, dass erstens alle 3 Phasenströme gleichzeitig und zweitens ohne Wiederzündungen gelöscht werden, andernfalls können beträchtliche Überspannungen auftreten.

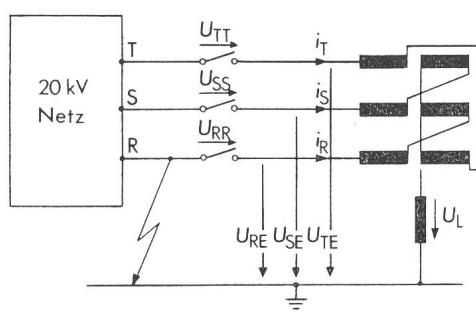


Fig. 4 Schema eines Nullpunktgebildners mit Löschspule

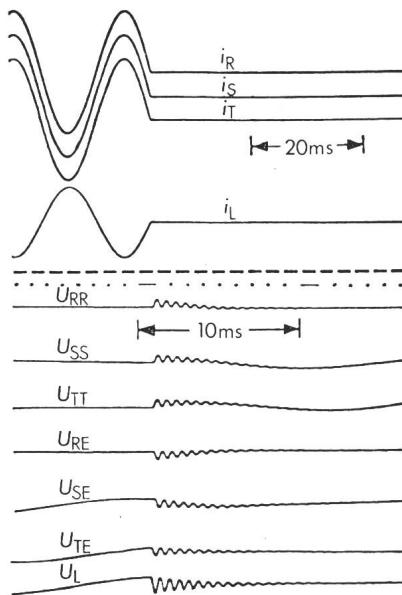


Fig. 5 Oszillogramm einer Ausschaltung des Nullpunktildner mit dem SF₆-Selbstblasschalter HB bei einphasigem Erdschluss

Mit dem SF₆-Selbstblasschalter HB 24.12.12 wurde bei der FGH auch ein solcher Nullpunktildner abgeschaltet. Es wurden die Ströme 80 A, 150 A und 250 A je 6mal ausgeschaltet. Bei allen Versuchen sind praktisch keine Überspannungen aufgetreten. Fig. 5 zeigt ein Oszillogramm einer entsprechenden Ausschaltung. Die Vorteile des SF₆-Selbstblasschalters liegen also nicht nur im häufigen und rasch aufeinanderfolgenden Ausschalten von grossen Kurzschlussströmen, sondern genauso bei den kleinen und kleinsten Strömen, die selbst bei ungewöhnlichen und harten Bedingungen gut und mit nur geringen Überspannungen unterbrochen werden.

Literatur

- [1] R. Effantin et J. Pielin: Protection des transformateurs de distribution contre les surtensions atmosphériques. Expérimentation «réseaux témoins». Rev. Gén. Electr. 82(1973)10, p. 635...646.
- [2] A. Eidingen: Die Anwendung von SF₆ im Anlagen- und Schalterbau. Bull. SEV/VSE 69(1978)22, S. 1202...1206.
- [3] R. Schaumann und D. Poole: Das H-System – eine neue Generation von SF₆-Mittelspannungs-Schaltgeräten. Brown Boveri Mitt. 64(1977)11, S. 628...633.
- [4] T. Jakob, E. Schade et R. Schaumann: L'autosoufflage, un nouveau principe de coupure pour les disjoncteurs économiques SF₆. Rapport CIREN N° 2.4, 1977.

Adressen der Autoren

Armin Ganz, dipl. El.-Ing. ETH, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., Abt. AGY, 5401 Baden, und Oskar Honz, dipl. El.-Ing., Energie-Versorgung Schwaben AG, Hochspannungsschaltanlagen, Hauptverwaltung Postfach 158, D-7000 Stuttgart 1.

Literatur – Bibliographie

Vereinfachtes Fachrechnen mit SI-Einheiten

Ergänzung eines Lesers zur Buchbesprechung in Bull. SEV/VSE 70(1979)5, S. 244

Wie der Rezensent treffend festhält, bietet das SI-System als kohärentes Maßsystem die Möglichkeit, die Formeln statt aus physikalischen Größen direkt aus Messzahlen und Einheiten aufzubauen. Damit werden die Masseinheiten von einer Kontrollmöglichkeit zum eigentlichen Baustein der physikalischen Zusammenhänge.

Eben diese Möglichkeit hat der Autor in seinem Büchlein praktisch genutzt, indem er eine Methode entwickelt, die einem ganz bestimmten Leserkreis, nämlich Absolventen von Gewerblichen Berufsschulen und Weiterbildungskursen, eine echte Hilfe bietet, durch das Fachrechnen grundlegende elektrotechnische Zusammenhänge zu verstehen und zu vertiefen.

Um eine möglichst klare Aussage über die physikalischen Vorgänge beizubehalten, wird ausser den SI-Basiseinheiten vorwiegend mit zusammengesetzten Einheiten gearbeitet. Einfache Äquivalenzen, die sich aus dem Energiesatz ableiten lassen, ermöglichen im Gebiet der Energie-Umwandlung und -Messung (Zählerkonstante) eine gut verständliche und aufschlussreiche Auseinandersetzung mit diesem Problemkreis, wobei dem Wirkungsgrad eine etwas ausführlichere Behandlung zuteil wird, da die richtige Einsetzung dieses dimensionslosen Verhältnisses auf dieser Schulstufe oft Mühe bereitet. Erst am Schluss des Rechenablaufes erfolgt dann von der Einheitengleichung her die Ableitung der physikalischen Zusammenhänge in die Größengleichung.

Das vorliegende Büchlein bedeutet für die entsprechende Schulstufe sicher eine interessante Möglichkeit, den Fachunterricht zu bereichern, zumal im Anhang 55 Übungsaufgaben (mit Schlüssel) geboten werden. Zu wünschen wäre lediglich, anlässlich einer allfälligen Neuauflage, eine etwas übersichtlichere Gestaltung des Inhaltes.

J. A. Huber

DK: 621.382.049.772-181.4 : 621.3.037.33 : 621.39 SEV-Nr. A 731

Elektronische Schaltungstechnik. Analogschaltkreise. Von Roland Köstner und Albrecht Möschwitzer. Bücherei der Hochfrequenztechnik Band 26. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig K.-G., 1978; 8°, 266 S., 242 Fig., 19 Tab. Preis: gb. Ostmark 34.-.

Das Buch behandelt typische Anwendungen moderner integrierter Schaltkreise der Mikroelektronik in der Analogtechnik, die ihre vorrangige Bedeutung für die Nachrichtentechnik gegenüber der Digitaltechnik immer noch behält. In den einführenden drei Kapiteln besprechen die Verfasser besondere Eigenschaften integrierter Schaltungen und Bauteile und im nachfolgenden Kapitel die Grundlagen der analogen Schaltungstechnik. Dieser umfangreichste Teil des Buches hat, abgesehen von seinem praktischen Wert für den Entwickler, einen ausgesprochen didaktischen Charakter. Es werden dort die wesentlichen Funktionseinheiten der Analogschaltungen wie: Referenzspannungs- und Stromquellen, Verstärkerstufen mit und ohne Gegenkopplung, Differenzverstärker, Eingangs- und Ausgangsstufen usw. eingehend besprochen und zahlreiche Bemessungsformeln abgeleitet. Im nächsten Kapitel werden die wichtigsten integrierten Analogbausteine in ähnlicher Weise behandelt, und zwar: NF-, Video-, ZF-, Leistungs- und Operationsverstärker, Demodulatoren und stabilisierte Stromversorgungsschaltungen. Hinweise auf handelsübliche Schaltungen dieser Art und deren zweckmässigen Einsatz sind dort auch enthalten. Das Schlusskapitel bringt ein konkretes Beispiel der Anwendung verschiedener integrierter Schaltungen in einem Fernsehempfänger. Ein 151 Titel umfassender Literaturnachweis und ein alphabetisches Sachverzeichnis ergänzen das Buch, das sowohl für die Entwicklung von integrierten Analogschaltungen als auch als Lehrbuch nützlich sein kann.

J. Fabijanski

Eigenfrequenzen, Moden und Anregungsformen der wiederkehrenden Spannung beim Ausschalten eines Lichtbogenofens im isolierten Netz

Von H.G. Gerlach

621.3.064.2 : 621.365.2;

Es wird ein Lichtbogenofen als charakteristisches Beispiel des Schaltens von schweren Lasten in der Mittelspannungsebene industrieller und städtischer Netze behandelt. Dieses Beispiel und dasjenige in [1] umfassen im wesentlichen den ganzen Bereich transienter wiederkehrender Spannungen, welche man beim Ausschalten starker Lastströme zu erwarten hat. Die eigenfrequenten Schwingungsscheinungen, die durch einen plötzlichen Abfall der Spannung bzw. des Stroms angeregt werden, kommen nicht eine ohne die andere vor. Die Versuchsbedingungen in [1] haben die vom Schalter beeinflusste stromerregte Komponente begünstigt, während die Bedingungen des hier untersuchten Lastfallen eine besonders kleine stromangeregte gegenüber einer grossen spannungserregten Komponente zur Folge haben. Als ein leistungsfähiges mathematisches Hilfsmittel für die Schwingungsrechnung wird die 2-Achsen-Theorie verwendet, und es wird der Vergleich zwischen oszillographischer Messung und berechneter Kurvenform angestellt.

Un four à arc est traité comme exemple caractéristique du phénomène de la coupure d'une charge importante dans un réseau industriel ou urbain à tension moyenne. Cet exemple et celui dans [1] couvrent essentiellement toute la gamme de la tension transitoire de rétablissement qu'on pourra obtenir en déclenchant des courants de forte intensité. Les phénomènes d'oscillation à fréquence propre obtenus par chute soudaine soit de la tension soit du courant ne surviennent pas les uns sans les autres. Contrairement aux conditions d'essais selon [1] qui ont favorisé la composante due au courant, les conditions lors du déclenchement dans le cas présent sont telles que la composante due au courant est particulièrement petite par rapport à celle due à la chute de tension. Comme aide mathématique puissante pour le calcul d'oscillations, la théorie des deux axes est introduite, puis une comparaison entre la mesure oscillographique et la forme d'onde calculée est présentée.

1. Einleitung

Auf Grund von Schaltversuchen in verschiedenen Hochspannungsnetzen [2] und im Anschluss an die Darstellung über typisches Stromabreissen beim Lastabschalten in gelöschten Netzen [1] soll versucht werden, die praktische Netzerfahrung durch weitere Modellanalysen zu untermauern. Es soll also versucht werden, an Hand von möglichst einfachen Anordnungen ein Prinzip erkennen zu lassen. Es wird darum ein Modellfall untersucht, welcher die wesentlichen Elemente einer Drehstromschaltung in einfachster Anordnung enthält, ein Lichtbogenofen (induktive Industrie-Einzellast), der letztlich auch als «Stichleitung» angesehen werden kann (Fig. 1). Dabei entfällt die Komplikation des Sternpunktanschlusses (sog. isoliertes Netz). Ganz bewusst wird das Abschalten eines starken induktiven Stroms im isolierten Netz dem Ringauftrennen im gelöschten Netz [1] gegenübergestellt. Man stelle sich vor, dass sich die in der Praxis vorkommenden Formen wiederkehrender Spannungen zwischen den beiden Grenzwerten ansiedeln und sogar berechnen lassen, wenn die betreffenden Netzdaten genügend bekannt sind, selbst wenn die Netzstruktur weniger einfach als in den behandelten Fällen sein sollte.

Um die Richtigkeit der entwickelten Modellvorstellungen zu überprüfen, und um die Teilvergänge in verschiedenen Anregungsarten ausschwingen zu lassen, wurden die Ausschaltversuche mehrfach durchgeführt, u.a. auch mit teilweise überbrückten Kontakten eines 3poligen Leistungsschalters. Die 1polige Kurzunterbrechung (2 überbrückte Kontakte) kommt bei jedem Drehstrom-Ausschaltvorgang tatsächlich vor. Im isolierten Netz hat der 1polige Erstvorgang ähnlich wie bei einer Kurzschlussabschaltung die grösste Bedeutung, weil der erstunterbrechende Schalterpol mit der höchsten wiederkehrenden Spannung (1,5mal Phasenspannung) belastet wird [1, Fig. 2c]. Der Schaltfall einer 2poligen Abschaltung (1 Schalterpol überbrückt) hat zwar kaum praktische Bedeutung, er-

gibt aber bestmögliche Aufschlüsse über Schaltungsstrukturen und Anregungsformen.

Wenn man davon ausgeht, dass es das ideale Wechselstromschalten [1, Fig. 1c] überhaupt nicht gibt, und dass ein beispielhafter induktiver Lastfall ähnlich wie das bekannte Kurzschlussabschalten [3] dem Idealfall sog. unbeeinflusster Schwingspannung [4] höchstens nahekommt, dann sollten die in [1] herausgestellten Abreissphänomene auch in den hier behandelten Modellen nicht übersehen werden. Tatsächlich enthält die transiente wiederkehrende Spannung jedes Ausschaltvorgangs Eigenschwingungskomponenten in Cosinus- und in Sinusphasenlage (mit Bezug auf den Löschzeitpunkt), wobei die letzteren durch das Stromabreissen hervorgerufen sind und grundsätzlich mit derselben Ungewissheit wie der betreffende (abgerissene restliche) Strom behaftet sind.

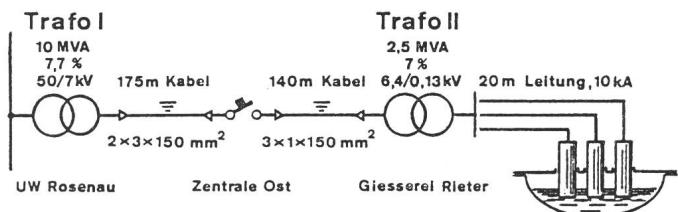


Fig. 1 Typischer Schaltfall aus einer Reihe induktiver Abschaltungen im isolierten Netz des EW Winterthur

Lichtbogenofen 2,5 MVA; kurzzeitig im Elektrodenkurzschluss mit 5 MVA $\cos \phi = 0,3$ betrieben.

Nennimpedanz der Speiseseite (Trafo I)	4,9 Ω
Kurzschlussimpedanz	0,38 Ω
Kurzschlussinduktivität je Phase	$L_1 = 0,0012$ H
Lastseitige Impedanz (Trafo II, Hochstromleitung und Ofen)	8 Ω
Lastinduktivität je Phase	$L_2 = 0,025$ H

Kabelkapazitäten:

UW Rosenau–Zentrale Ost, Betriebskapazität je Phase	$C_s = 0,19$ μ F
Kopplungskapazität	$C_k = 0,03$ μ F
Erdkapazität	$C_1 = 0,1$ μ F
Zentrale Ost–Ofentrafo, Erdkapazität	$C_2 = 0,05$ μ F

¹⁾ Dieser Aufsatz bildet eine Fortsetzung des Aufsatzes «Nicht-ideales Ausschalten induktiver Lastströme im gelöschten Netz» in Bull. SEV/VSE 69(1978)24, S. 1326...1331.

2. Abschaltung mit 2 dreiphasigen Eigenkreisen

Das Ausschalten von Lastströmen mit geringer induktiver Komponente hat wenig spezifische Formen der wiederkehrenden Spannung hervorgebracht [2]; im Grenzfall reinen Wirklaststromes fehlt die Einschwingspannung überhaupt oder wird lediglich durch Stromabreissen angeregt [1]. Zur Darstellung einer Lastausschaltssituation wie im Kurzschluss ist eine grosse Spannungsanregung nötig, d.h. ein hoher Momentanwert der wiederkehrenden Spannung. Dies ruft einem Schaltfall mit grundsätzlich induktivem Verbraucher auf der Lastseite des Schalters, beispielsweise mit einem Lichtbogenofen ohne Kompensationsbatterie nach Fig. 1.

Je ein Schwingkreis pro Phase vor und hinter dem Schalter (die Eigenkreise) kommen dadurch zustande, dass man die elektrischen Daten der Kabelleitungen und der Impedanzen zu konzentrierten Schaltungselementen zusammenfasst (Fig. 2a). Dies ist bei einem geradlinigen Stichleitungsmodell streng genommen nur zulässig, wenn auch die zusätzliche Bedingung, dass verteilte Leitungsbeläge nicht zu weitläufig seien, erfüllt ist. Beispielsweise für den Eingangskreis heisst das, dass die Quellenimpedanz des 50-kV-Netzes gegenüber der Kurzschlussimpedanz des speisenden Transformators (Trafo I) vernachlässigbar ist. Die lastseitige Induktivität (L_2) liegt, nachdem die Grafitelektroden tief in die flüssige Eisenschmelze eingefahren sind, fast ganz in den sekundären Hochstromleitungen. Die Parallelkapazitäten der Lastseite (C_2) sind im wesentlichen in den Einleiterkabeln konzentriert. Auf der Vorderseite des Schalters sind neben der Induktivität (L_1) die Erdkapazitäten (C_1) und die Kopplungskapazitäten (C_k) zweier paralleler Dreileiterkabel zu berücksichtigen. Die Serie widerstände (Dämpfungen durch Kupferverluste) werden vernachlässigt.

Nach der 3phasigen Netzstruktur in Fig. 2 ist ohne weiteres zu übersehen, dass die Vermaschung des Netzwerks jeweils eine andere ist, wenn die Schalterpole alle offen oder geschlossen (symmetrisch aus oder ein), oder wenn nur ein Teil der Kontakte geöffnet ist. Die Eigenfrequenzen (allgemeiner:

Eigenwerte) des Problems berechnen sich aus der charakteristischen Gleichung des simultanen linearen Differentialgleichungssystems für Ströme und Spannungen, die nach den Kirchhoffschen Regeln für unabhängige Knoten und Maschen angesetzt werden. Dabei geht es nur um den Ausgleichsvorgang, also um ein homogenes Gleichungssystem mit nur Nullen auf der rechten Seite, so dass die Quellenspannungen der Phasen durch Kurzschlüsse ersetzt werden (Sternpunkt von L_1). Der Sternpunkt der Kapazitäten (Erdsymbol) stellt einen nicht unabhängigen, entbehrlichen Knotenpunkt dar, den man auflösen darf, indem die über Erde führenden kapazitiven Verbindungen auf andere Kopplungszweige verteilt werden. Ein solches Verfahren entspricht der stufenweisen Reduktion des Gleichungssystems (Prinzip des Gauss-Algorithmus); es darf bei den Differentialgleichungen nur angewendet werden, falls die Gesamtheit der Strahlen-Leitwerte Y_{j0} von allen Knoten j zum eliminierten Knoten 0 einheitliche Phasenlage aufweist, d.h. nur Widerstände, nur Kapazitäten oder nur Induktivitäten umfasst.

Die Admittanzen zwischen zwei Knoten i und k (ϵj) berechnen sich mit Hilfe der Sternstrahlen Y_{i0} , Y_{j0} , Y_{k0} zu

$$Y_{ik(\text{neu})} = Y_{ik(\text{alt})} + Y_{i0} \cdot Y_{k0} / \left(\sum_j Y_{j0} \right) \quad (1)$$

Beispielsweise bestimmt sich die den offenen Kontakt (S) in Fig. 2a vertretende Ersatzkapazität mit $Y_{ik} = j\omega C_{ik} = j\omega C_{ss} = 0,011 \mu\text{F}$.

Im Falle der 2polig geöffneten Verbindungen (Fig. 2b) ergibt sich der gleiche Kapazitätswert für beide offenen Kontakte; die Verbindung R ist geschlossen: Sie diene als Referenzpotential für das Modell des isolierten Netzes mit unzugänglichen Sternpunkten (sog. V-Schaltung).

Der Vorteil der 3phasigen Netzwerkdarstellungen besteht allenfalls darin, dass keine Voraussetzungen über die Verteilung der Schaltungsparameter getroffen worden sind (keine Phasensymmetrie), dass also das Problem in der allgemeinsten Form, mit beliebigen induktiven oder kapazitiven Phasenkopplungen, angepackt werden könnte. Nachteilig ist die grosse Zahl der Gleichungen, entsprechend der Anzahl unabhängiger Maschen und Knoten (Legende Fig. 2).

3. Vereinfachte Ersatzschaltungen in 2achsigen Komponenten

Die symmetrischen Komponenten werden normalerweise dazu benutzt, unsymmetrische stationäre Zustände in zyklisch symmetrischen Drehstromsystemen auf einfache Ersatzschaltungen aus Komponentennetzwerken zurückzuführen [1]. Dabei steht eine Zustandsvariable (Mit- oder Gegen- bzw. Null-Komponente m, g bzw. 0) für je 3 gleichverteilte Ströme oder Spannungen, und die Netzwerke enthalten nur je 1 statt 3 Stränge. Diese Gleichverteilungsmuster kennzeichnen je einen bestimmten Schwingungsmodus, und die Komponenten werden auch modale Komponenten genannt. Während aber die symmetrischen Komponenten unbestritten praktisch sind zur Behandlung jener erzwungenen Schwingungen, die sich bei Anregung durch eine 3phasige Quelle ergeben (Quellenspannung nur im Mitsystem), drängen sich im Falle von freien Ausgleichsvorgängen andere Modalkomponenten auf.

Es gibt 3 freie Schwingungsmoden in einem einzelnen sterngeschalteten Drehstrom-Schwingkreis: Die a-Achse (z.B. die Sa-Achse, gleich Phase S in Reihe mit R und T parallel)

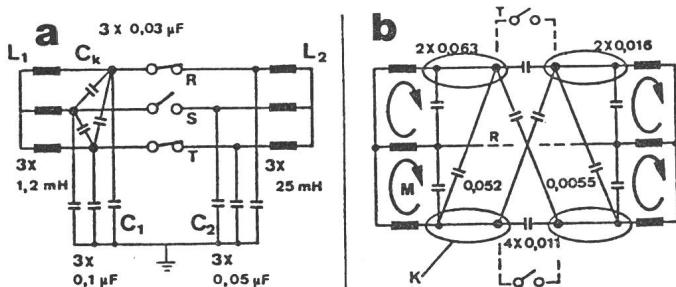


Fig. 2 Dreiphasige Netzwerke für unsymmetrische Kontaktverhältnisse

a Schalterpol S offen. Die Symmetrieachse des Systems fällt mit Phase S zusammen. Die Sternpunkte der Kapazitäten C_1 , C_2 (Erde) sind entbehrliche Knotenpunkte; wenn man den Erdpunkt auflöst, entstehen erdfreie Ersatzkapazitäten wie in Fig. b

b Schalterpole S und T offen. Die Symmetrieachse des Systems fällt mit der durchverbundenen Phase R zusammen. Der kapazitive Sternpunkt ist aufgelöst (erdfreies System mit geänderten Kapazitätswerten in μF). Betrachtet man die mittleren Zweige der Induktivitäten (R) als linear abhängig, so gibt es 4 unabhängige Maschen M (Ströme $i_1 \dots i_4$) sowie 4 unabhängige Knoten K (Spannungen $u_1 \dots u_4$ gegenüber dem Mittelleiter R), welche zusammen ein Gleichungssystem im 8. Rang begründen, aus dem 4 imaginäre Doppelwurzeln (die Eigenfrequenzen) hervorgehen, nämlich 2,9–4,5–9,9–10,5 kHz [2].

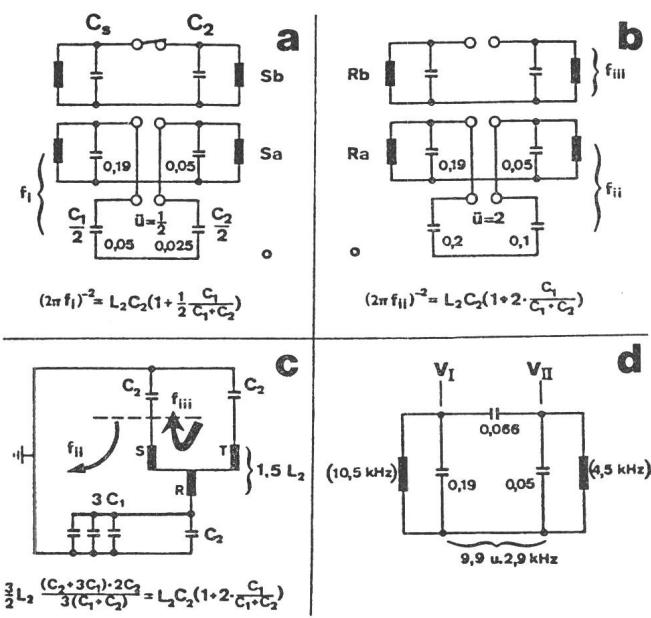


Fig. 3 Vereinfachte Ersatzschaltungen für die dreiphasige Netzstruktur von Fig. 2

Kapazitäten in μF ; \ddot{u} Admittanzübersetzung in der 0-Achse; f_i , f_{ii} Eigenfrequenzen bei einem (i) oder zwei (ii) offenen Schalterkontakte, wenn jeweils die Mitsystemkapazitäten C_s als kurzgeschlossen betrachtet werden

a Zweiachsiges Netzwerk in Sa-, Sb- und 0-Achsen für 1polig offenen Schalter anstelle von Fig. 2a

b Zweiachsiges Netzwerk in Ra-, Rb- und 0-Achsen für 2polig offenen Schalter anstelle von Fig. 2b

c Phasenschwingschaltung; Schwingungsmodus Ra+b bei erdfreier Spannungsmessung S oder T gegen R zum 2polig offenen Schalter (vgl. Fig. 5b), sonst Modus Ra+b+0 (Fig. 4b)

d Reduziertes 2kreisiges Modell anstelle von Fig. 3b.
Netzseitige Impedanzen nicht kurzgeschlossen

und die *b-Achse* (Sb-Achse gleich Phasen R und T in Reihe) mit gegenseitigem Phasenabstand 90° sind untereinander gleichwertige Teilbereiche der Raumordnung des verketteten Dreileitersystems, analog dem Mit- und Gegensystem, die den Sternpunkt nicht belasten. Im Gegensatz dazu steht die *0-Achse* mit gleicher Bedeutung wie das Nullsystem: alle Phasen gleichgeschaltet und über den Sternpunkt angeschlossen. Dreiphasige (m, g, 0) und zweiachsige Komponenten (a, b, 0) sind mathematisch verwandt. Ihr Zusammenhang mit dem Phasensystem und untereinander beruht auf Ähnlichkeitstransformationen an der Impedanzmatrix, so dass die Invarianz der Eigenwerte beim Übergang vom einen zum anderen Koordinatensystem sichergestellt ist [5].

Die Resultate lassen sich anschaulich interpretieren (Fig. 3). In jedem ungestörten symmetrischen Zustand des Schalters (Kontakte offen oder geschlossen) sind die Achsennetzwerke a, b, 0 entkoppelt. Beispielsweise sind im Betrieb alle 3 Kontakte ohne Querverbindungen unter den Netzwerken als geschlossen zu betrachten. Das 2-Achsen-System unterscheidet sich dann vom 3-Komponenten-System durch die Anordnung der Quellen (a- und b-Achsen beide bzw. die m-Komponente allein gespeist). Unsymmetrische Zustände des Schalters haben Komponentenverbindungen zur Folge: Parallelschaltung der Achsennetzwerke (Fig. 3a und 3b) bzw. der Komponentennetze [1, Fig. 2c]. Dabei bieten die a, b, 0-Achsen den Vorteil einer formal gleichartigen Behandlung beider Unsymmetrie-

Situationen, indem das Nullsystem mittels Admittanzübersetzung $\ddot{u} = 0,5$ bzw. $\ddot{u} = 2$ angeschlossen ist.

Betrachtet man zuerst die Situation des erstschaltenden Pols, so stellt man die grundsätzliche Äquivalenz des 2-Achsen-Netzwerks (Fig. 3a) mit dem 3-Komponenten-Netzwerk [1, Fig. 2c, rechts] fest: Bei kurzgeschlossener Quelle steht die Nulladmittanz über dem Schalter jeweils im Verhältnis 1:2 zur vereinigten Admittanz der Mit- und Gegensystemkomponenten.

Die Mitsystemkapazität C_s (symmetrische Betriebskapazität aus Umrechnung des Phasenkopplungstripels C_k auf den Sternpunkt in Fig. 2a) beträgt $C_s = C_1 + 3 \cdot C_k = 0,19 \mu\text{F}$. Sie kann unter Umständen ausser Betracht fallen, wenn die vordere Induktivität L_1 als genügend klein bzw. als Kurzschluss angesehen wird. Angenähert (Legende Fig. 3) ist die Lastseite somit dreier Eigenfrequenzen fähig, die nach der *Thomson-Formel*

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}} \quad (2)$$

mit lediglich einer Induktivität L_2 und mit verschiedenen Kapazitätswerten zu berechnen sind, wobei die Indices i, ii, iii die Zahl der offenen Schaltkontakte andeuten sollen (Fig. 3a, 3b). Ist f_{iii} die entkoppelte Last-Eigenfrequenz (L_2 , C_2)

$$f_{iii} = 4,5 \text{ kHz} \quad (3)$$

so folgen aus Fig. 3a und 3b die Kopplungsfrequenzen f_i , f_{ii} durch Mitbeteiligung von Nullsystemkapazitäten mit verschiedenem Gewicht $\ddot{u} = 0,5$ bzw. $\ddot{u} = 2$. Mit $C_1/(C_1 + C_2) = 2/3$ erhält man

$$f_i = 3,9 \text{ kHz} ; f_{ii} = 2,9 \text{ kHz} \quad (4)$$

Im Schaltfall von Fig. 3b stellt man fest, dass die Kopplungsfrequenz f_{ii} (unten) gleichzeitig mit der ungekoppelten f_{iii} (oben) auftritt, da offene Kontakte Schwingungsfähigkeit bedeuten. Man ersieht die Äquivalenz von 2-Achsen-Modell (Fig. 3b) und Phasenschwingschaltung (Fig. 3c) an der Übereinstimmung der charakteristischen LC -Produkte. Die Phasenschwingschaltung ermöglicht darüber hinaus einen tieferen Einblick in den überlagerten Schwingungsmodus: Die freigeschalteten Kapazitäten C_2 führen einen gemeinsamen Schwingstrom der Frequenz f_{ii} gleichverteilt und gleichphasig über die offenen Stränge (S, T), der über den geschlossenen Strang (R) und das Netz ($3C_1$) in entgegengesetzter Phasenlage abfließt. Die 3 Phasen der Schaltvorderseite schwingen gleichphasig im Nullsystem. Der Modus dieser Teilschwingung ist derjenige einer nach der Phase R orientierten Ra-Achse (nicht zu verwechseln mit der Sa-Achse der ersten Unterbrechung). Gleichzeitig kommt es unter den freigeschalteten Phasen zu einem Ladungsausgleich, der eine überlagerte Schwingspannung mit reiner Lasteigenfrequenz f_{iii} zur Folge hat. Diese Teilschwingung verläuft nach dem Modus einer im Verhältnis zur Phase R orthogonal orientierten Rb-Achse, mit Gegentakt in den Strängen S und T.

Die Schwingungen des Nullsystems kommen im isolierten Netz nur bei unsymmetrisch geschlossenem Schalter vor (Erstvorgänge der a-Achse mit Frequenz f_i in Fig. 4a und 4b). Diese Nullschwingungen beruhen auf der *Influenzierung* der Erdkapazitäten des speisenden Netzes C_1 , d.h. auf dem Mitschwingen des Sternpunktes nach dem Grundsatz, dass die Gesamtladung des Systems gegenüber Erde konstant bleiben

muss. Sie stehen im Gegensatz zu den in [1] ausführlich beschriebenen *induzierten* Nullschwingungen des gelöschten Netzes, welche nur bei allpolig offenem Schalter zu beobachten waren. Im isolierten Netz schwingt, wenn der Schalter voll offen ist, nur noch die b-Achse (Fig. 4a).

Die Nullschwingungen, mit denen der Sternpunkt des isolierten Netzes auf Unsymmetriesituationen reagiert, sind eine Folge kapazitiver Spannungsteilung zwischen freigeschalteten und mit dem Netz verbundenen Wicklungen der Lastinduk-

tivität (Fig. 3c); der netzseitige Anteil daran sinkt mit wachsender Kapazität C_1 . Im Grenzfall sehr grosser Eingangskapazität ($C_1 \rightarrow \infty$), z. B. im Fall gekuppelter Netztransformatoren plus Kabelnetz auf der speisenden Seite, verschwinden die Nullschwingungen, während gleichzeitig die Kopplungsfrequenzen ihrem absolut tiefsten Wert zustreben:

$$f_{i\min} = f_{iii}/\sqrt{1,5} = 3,7 \text{ kHz} ; f_{ii\min} = f_{iii}/\sqrt{3} = 2,6 \text{ kHz} \quad (5)$$

Die Modellanalyse wäre unvollständig ohne die Angabe von Schwingungswiderständen

$$X = \sqrt{L/C}, \quad (6)$$

welche bei der Amplitudeneberechnung benötigt werden (Abschnitt 5), wenn es darum geht, den Einfluss des Schalters in Rechnung zu stellen [1]. Man sucht die induzierende Wirkung eines im Schwingkreis der Frequenz f_{ii} zirkulierenden Stromes (Strom der Phase R) auf die freigeschalteten Kapazitäten, d. i. die Spannung an der Kapazität $2C_2$, welche in der Frequenz f_{ii} angeregt wird, wenn der Schalter nicht ideal schaltet. In den gegen Erde gemessenen Schwingspannungen der Lastseite (Fig. 4, II) sind nur diese Spannungsabfälle des Schwingstroms an der Kapazität $2C_2$ bzw. C_2 (Modus a bzw. b) enthalten. Die entsprechenden kapazitiven Reaktanzen X_a, X_b können als Teilschwingungswiderstände angesehen werden (z. B. $X_b = 0,5 \sqrt{2} L_2 / 0,5 C_2 = \sqrt{L_2 / C_2}$ nach Gl. 6), oder einfach mit Hilfe der Eigenfrequenzen berechnet werden (f_{iii}, f_{ii} aus Gl. 3, 4)

$$X_a = \frac{1}{2\pi f_{ii} \cdot 2C_2} = 0,54 \text{ k}\Omega ; X_b = \frac{1}{2\pi f_{iii} \cdot C_2} = 0,7 \text{ k}\Omega \quad (7)$$

4. Spannungsanregung und reduziertes 2kreisiges Modell

Die Oszillogramme in Fig. 4 unterscheiden sich nicht in den Vorgängen des erstschaltenden Pols, sondern nur in den Zweitvorgängen beim Löschen der b-Achse (Tb-Achse in Fig. 4a und Sb-Achse in 4b). Der Zweitvorgang zum 2poligen Ausschalten (Pol R überbrückt) regt eine zusammengesetzte Schwingung in allen 3 Moden an, vgl. Oszillogrammausschnitt Ra + b + 0 in Fig. 4b und Phasenschwingschaltung Fig. 3c; er sei der Gegenstand weiterer Analysen. Dazu ist in Fig. 5a das Zeigerdiagramm des speiseseitigen Netzes dargestellt. Es zeigt die betreffenden Phasenspannungen in bezug auf den Netzsternpunkt (der konzentrische Mittelpunkt zweier Kreise) vor und nach dem Abschalten des einachsigen Laststromes I_{sb} .

Die punktiert gezeichneten im U-Kreis eingeschriebenen Spannungen gehören zum symmetrischen Lastzustand vor dem Unterbrechen der Sa-Achse. Sind die belasteten Spannungen auf dem U-Kreis gegenüber den unbelasteten auf dem E-Kreis fixiert durch Betrag und Phase des Betriebsstromes (I_{sa} in Phase S und Achse a) gemäss

$$U_S = E_S - jX_c I_{sa}, \quad (8)$$

so ergeben sich die Phasenspannungen des einachsigen Zustandes zu:

$$\begin{aligned} U_S' &= E_S \dots \dots \dots \text{ auf dem E-Kreis} \\ U_R' &= E_R + 0,5 \sqrt{3} X_c I_{sa} = E_R + jX_c I_{sb} \\ U_T' &= E_T - jX_c I_{sb} \end{aligned} \quad (9)$$

Die verkettete Spannung der belasteten Sb-Achse U_{sb} unterscheidet sich nicht gegenüber der punktiert gezeichneten symmetrischen Lastspannung in derselben Achse, obwohl der

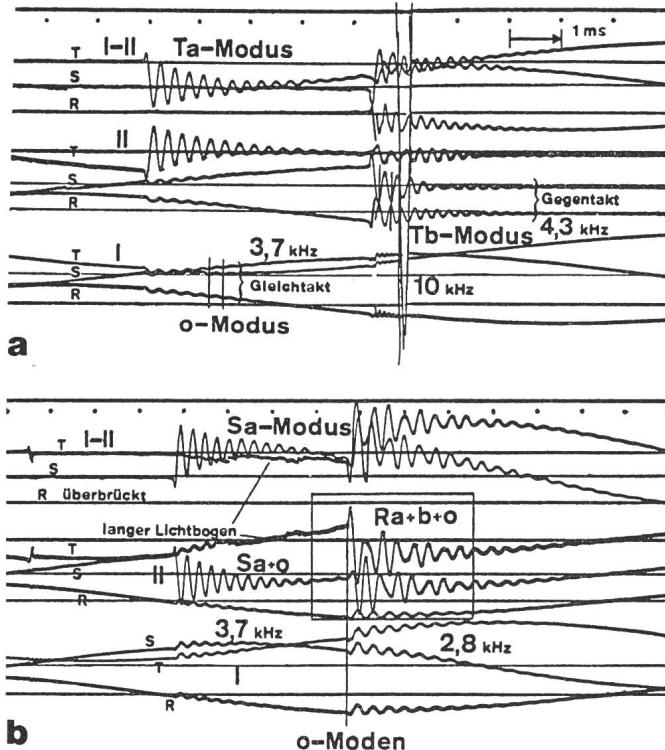


Fig. 4 Oszillogramme der wiederkehrenden Spannung beim Abschalten einer 5-MVA-Ofenlast mit einem Leistungsschalter (nach Fig. 1...3)

- 3 Spannungsgruppen, je Phasen R, S, T:
 I vor dem Schalter gegen Erde gemessen (Speiseseite)
 II nach dem Schalter gegen Erde gemessen (Verbraucherseite)
 I-II über dem Schalter in Differentialteilerschaltung gemessen (erdfrei)

- o-Modus: Schwingspannung des Netzsternpunkts gegen Erde
 a-Modus: Erdfreie Schwingspannung der a-Achse, Anregung 1,5fache Phasenspannung im Erstvorgang
 b-Modus: Erdfreie Schwingspannung der b-Achse, Anregung verkettete Spannung (aufgeteilt auf 2 Phasen) im Zweitvorgang (Fig. 4a)

Die gegen Erde gemessenen lastseitigen Schwingspannungen des a-Modus kommen nur in Verbindung mit dem o-Modus vor, beispielsweise die Amplitudenverhältnisse im Erstvorgang von Fig. 4b: o-Modus Spannungen $u_I \sim -\frac{1}{6} E_S$ (Fig. 5a),

$$\begin{aligned} \text{Sa-Modus Spannung } u_{S\text{I}-\text{II}} &\sim \frac{3}{2} E_S \text{ und Spannung } u_{S\text{II}} \sim \frac{4}{3} E_S \\ &= \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{6} \right) E_S. \end{aligned}$$

a 3poliges Ausschalten: Erstvorgang in Phase T (Achse Ta 3,7 kHz), Zweitvorgang in Phasen R und S (Achse Tb 4,3 kHz)

b 2poliges Ausschalten: Erstvorgang in Phase S (Achse Sa 3,7 kHz), Zweitvorgang in Phasen S und T (Achse Ra 2,8 kHz, Achse Rb 4,3 kHz)

Differenzvektor $U_{Sb} = U_T' - U_R'$ gegenüber Sternpunkt und Kreislage um $-j0,5 X_c I_{Sa}$ parallelverschoben ist: $U_{Sb} = -j\sqrt{3} U_s$.

Die Eckpunkte des unsymmetrischen Spannungsdreiecks nach Gl. (9) folgen einem bekannten Ansatz in symmetrischen 120°-Komponenten. Die halbe Quellenspannung $E_S/2$ tritt in der Komponentenschaltung für 1polige Unterbrechung [1, Fig. 2c rechts] sowohl im Gegensystem als auch im Nullsystem auf, wobei die Nullspannung vor dem Schalten U_0' als Teilspannung an der speiseseitigen Nullsystemklemme gegen Erde im Verhältnis der Kapazitäten $C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$ zu C_1 entsteht, die auch die Lage des Erdpunkts im Dreieck fixiert:

$$U_0' = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{E_S}{2} = \frac{1}{6} E_S \quad (10)$$

Nach dem Ausschalten der Sb-Achse bilden die Eckpunkte des Spannungspolygons einen auf dem E-Kreis gleichmäigig verteilten 120°-Stern, während der Erdpunkt in Relation zum Kreismittelpunkt (Sternpunkt) eine neue Lage einnimmt. Die Nullspannung nach dem Schalten ist das Ergebnis des Ungleichgewichts der Erdkapazitäten im Phasennetz der speisenden Drehstromquelle, nachdem die gesamte lastseitige Kapazität $3C_2$ mit der einen Phase R des Netzes vereint ist. Somit folgt aus dem Ansatz, dass die Stromsumme im Erdpunkt wie auch im Wicklungssternpunkt null sein muss:

$$(E_R + U_0'') (C_1 + 3C_2) + (E_S + U_0'') C_1 + (E_T + U_0'') C_1 = 0$$

$$(E_R + E_S + E_T) C_1 = 0$$

$$\text{also } U_0'' = -\frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot E_R = -\frac{1}{3} E_R \quad (11)$$

Als Spannungsanregung (Schwingspannungen) verstehe man die Differenz zwischen dem momentanen (wirklichen) Spannungswert u' , der sich aus der Betriebssituation vor dem Ausschalten ergibt, und aus dem stationären (fiktiven) Spannungswert u'' , der sich aus der Spannung desselben Kreises, lange nach dem Ausschwingen, durch Rückrechnen auf den Schaltmoment ergibt. Die Höhe des so definierten Spannungssprungs

$$\Delta u = u' - u'' \quad (12)$$

kann unter sog. idealen Verhältnissen, dargestellt durch eine Zeitlinie im Phasenzustand des natürlichen Nulldurchgangs von I_{Sb} (in Richtung des Zeigers I_{Sa} in Fig. 5a), als Projektion eines Differenzspannungsvektors auf eben diese Zeitlinie aufgefasst werden. Die apostrophierten Vektorzustände (' und '') sind gegeben durch zwei polygone Figuren (Δ und Y), welche gegenseitig in verschiedenen Polygonpunkten fixiert sein können. Der Wechsel von der S-Fixierung (Fig. 5a) zur R-Fixierung (Fig. 5b) entspricht einer Änderung der Symmetrieeigenschaften des Systems beim Übergang vom 1polig offenen in den 2polig offenen Zustand (Fig. 2a und b, oder Erst- und Zweitvorgang in Fig. 4b). Mit der Klemme R als Referenzpotential null erhält man die Spannungssprünge, die in erdfreien Meßschaltungen auftreten, vgl. Differenzspannungen u_{II-II} in Fig. 4b: Diese können keine Nullkomponente enthalten und setzen sich daher nur aus Schwingungen des Modus Ra und Rb zusammen.

Sei der Zeitwert der belasteten verketteten Spannung 100% (d.i. die momentane Lastspannung der Phase T, somit auch die lastseitige Anregung gleich Summenanregung Modus Ra und Rb):

$$u_{TII'} - u_{TII''} = u_{TII} - 0 = \sqrt{2} \cdot U_{Sb} \cdot \sin 75^\circ = \\ = u_{Ra} + u_{Rb} = 100\% \quad (13)$$

Dann folgt, indem die lastseitige Spannung der Phase S genau 50% beträgt, die modale Verteilung der Komponenten u_{Ra} und u_{Rb} (2,9 und 4,5 kHz), welche die Spannungssprünge der Phasen S und T durch simultane cosinusförmige Einschwingvorgänge überwinden:

$$u_{SII} = u_{Ra} - u_{Rb} = 0,5 \cdot u_{TII} = 0,5 (u_{Ra} + u_{Rb}) \\ u_{Ra} = 75\% \equiv v_{II} \\ u_{Rb} = 25\% \quad (14)$$

Die speiseseitigen Anregungen in den Phasen S und T ergeben sich mit Fig. 5b, wenn der Netztransformator in Fig. 1 mit

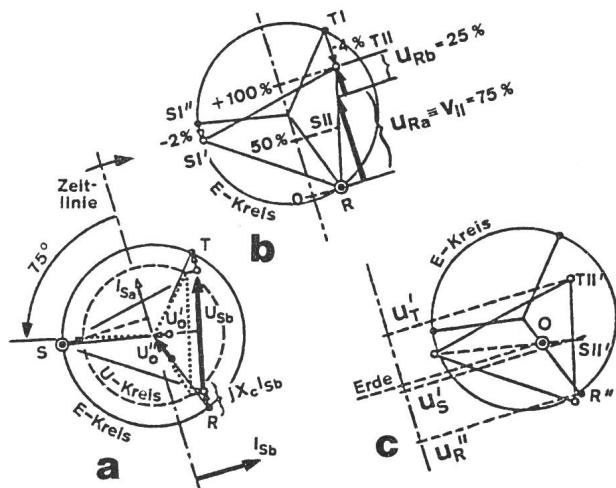


Fig. 5 Zeigerdiagramme zur Bestimmung der idealisierten Spannungsanregung im Falle des Zweitvorgangs von Fig. 4b

R, S, T Phasenindex; a, b Achsenindex

I, II Speise- bzw. Lastseite; ', '' vor bzw. nach dem Ausschalten

a S-fixiertes Lastspannungsdreieck (Δ) des speisenden Netzes: Potential E_S (auf dem E-Kreis) mit dem Sternpunkt (Mittelpunkt der konzentrischen Kreise) unverändert beim Ausschalten der einachsigen Last (I_{Sb})

E-Kreis geometrischer Ort des Leerlauf-Spannungssterns (Y) U-Kreis geometrischer Ort der symmetrisch belasteten Phasenspannungen (punktiert)

$j2X_c I_{Sb} = \sqrt{3} X_c I_{Sa}$ Spannungsabfall der b-Achse in Richtung der Zeitlinie

U' Sternpunktverlagerung gegen Erde im einachsigen Lastzustand

U_0'' Sternpunktverlagerung im Leerlauf bei überbrücktem Pol R

b R-fixiertes Lastspannungsdreieck für erdfreie Spannungen, Referenzpotential des überbrückten Schalterpols R null gesetzt: Dem entspricht eine Verschiebung des Leerlaufkreises (Y) um $jX_c I_{Sb}$ mit netzseitiger Anregung der Phase S in Höhe von $(u_{S1'} - u_{S1''}) / u_{TII} = -2\%$ sowie eine Verschiebung der Phase T um $j2X_c I_{Sb}$ mit netzseitiger Anregung in Höhe von -4% . Die lastseitigen Phasenanregungen $u_{TII} = 100\%$ und $u_{SII} = 50\%$ liefern die Anfangsbedingungen für die Schwingung des Ra-Modus $u_{Ra} = 75\%$ und für die Schwingung des Rb-Modus $u_{Rb} = 25\%$

c 0-fixiertes Lastspannungsdreieck vor dem Unterbrechen (') im Verhältnis zur Lage des Leerlaufkreises nach dem Unterbrechen des einachsigen Laststromes (''): Das stationäre Potential des überbrückten Schalterpols $u_{R''}$ verschiebt sich um die Potentialdifferenz des Sternpunkts $u_0'' - u_0'$ (Fig. 5a), so dass die modale Verteilung der Schwingspannungskomponenten $u_{Ra} : u_{Rb}$ nicht mehr genau 1 : 3 beträgt

u_S', u_T' Anfangswerte der Schwingspannung (vgl. Fig. 6)

$u_{R''}$ Endwert aller Phasen

5 MVA belastet war, als der relative auf die Zeitachsenprojektion zu beziehende Spannungsunterschied (Abfall an der Kurzschlussinduktivität)

$$\begin{aligned} u_{\text{TI}'} - u_{\text{TI}''} &= u_{\text{TI}''} - u_{\text{TI}} = - \frac{3,85\%}{\sin 75^\circ} = - 4\% \\ u_{\text{SI}'} - u_{\text{SI}''} &= 0,5 (u_{\text{TI}''} - u_{\text{TI}}) = - 2\% \end{aligned} \quad (15)$$

Wenn entgegen Fig. 3c die netzseitigen Impedanzen nicht als kurzgeschlossen angenommen werden, dann treten neben den lastseitig erregten Frequenzen des Ra- und Rb-Modus (2,9 und 4,5 kHz) auch noch die entsprechend speiseseitig erregten Frequenzen (9,9 und 10,5 kHz) auf (Fig. 3d). Um deren Anteil zu berechnen, darf man die reinen Eigenfrequenzen des Rb-Modus für sich behandeln (ungekoppelter Netzteil in Fig. 3b), da deren modales Verhältnis zum jeweiligen Ra-Modus (1 : 3) a priori bekannt ist (Gl. 14). Man geht also von der reduzierten Ersatzschaltung nach Fig. 3d aus, in welcher nur die beiden Kopplungsfrequenzen (9,9 und 2,9 kHz) vorkommen; die nachträglich zu ergänzenden ungekoppelten Rb-Modusfrequenzen sind nur zur Erinnerung in Klammern angeschrieben. Die Summenspannung vorn ($v_{\text{I}} = - 3\%$ als Durchschnitt der Phasen von Gl. 15) und hinten ($v_{\text{II}} = 75\%$ nach Gl. 14) setzt sich aus je 2 spektralen Komponenten der k-ten Frequenzen zusammen:

$$\begin{aligned} \sum v_{\text{IK}} &= v_{\text{I},1} + v_{\text{I},2} = v_{\text{I}} = - 3\% \\ \sum v_{\text{IHK}} &= v_{\text{II},1} + v_{\text{II},2} = v_{\text{II}} = + 75\% \end{aligned} \quad (16)$$

Die mit $k = 1,2$ induzierten Schwingströme der Frequenz f_k (9,9 und 2,9 kHz), welche über die Kopplungskapazität des reduzierten Modells fliessen, haben Spannungsabfälle v_{IK} , $-v_{\text{IHK}}$ zur Folge, die den respektiven Impedanzen des vorderen oder hinteren Eigenkreises Z_{IK} , Z_{IHK} bei der betreffenden Eigenfrequenz proportional sind. Die Impedanz- und Spannungsverhältnisse

$$\begin{aligned} \frac{v_{\text{II},1}}{v_{\text{I},1}} &= - \frac{Z_{\text{II},1}}{Z_{\text{I},1}} (9,9 \text{ kHz}) = - \frac{-j405 \Omega}{j637 \Omega} = 0,636 \\ \frac{v_{\text{II},2}}{v_{\text{I},2}} &= - \frac{Z_{\text{II},2}}{Z_{\text{I},2}} (2,9 \text{ kHz}) = - \frac{j779 \Omega}{j23 \Omega} = - 33,87 \end{aligned} \quad (17)$$

sind Elemente der sog. Modalmatrix; sie erlauben es, Gl. (16) durch Einsetzen von (17) aufzulösen, wie folgt:

$$\begin{aligned} v_{\text{I},1} + v_{\text{I},2} &= - 3\% \\ 0,636 v_{\text{I},1} - 33,87 v_{\text{I},2} &= + 75\% \\ \mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{\text{I},1} & v_{\text{I},2} \\ v_{\text{II},1} & v_{\text{II},2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -0,77 & -2,23 \\ -0,49 & +75,5 \end{bmatrix} \% \end{aligned} \quad (18)$$

Ein Größenvergleich unter den 4 Koeffizienten der sog. Spektralverteilungsmatrix (\mathbf{V}) lässt erkennen, dass es gestattet war, den speiseseitigen Schwingkreis (Mitsystem netzseitig) als kurzgeschlossen zu betrachten, was in anderen Fällen, mit im allgemein stärkeren Transformatoren noch besser erfüllt ist. Die Anregung des netzseitigen Eigenkreises durch den Spannungsabfall an der Quellenimpedanz (ungekoppelt 10,5 kHz) kann bei 3poligem Ausschalten etwa 4% betragen und lässt sich im Oszillogramm von Fig. 4a ohne überlagerte Nullschwingungen beobachten. In der Kopplungssituation von Fig. 4b wird die Komponente $v_{\text{I},1}$ (9,9 kHz) als Überlagerung zur Nullschwingung sichtbar, während $v_{\text{I},2}$ (2,9 kHz) auf dem Hintergrund der Nullschwingung (gleiche Frequenz) nicht erkennbar sein kann.

5. Stromanregung und Berechnung einer Lastschaltspannung

Die reine Spannungsanregung nach Vorstellung des idealen Wechselstromschaltvorgangs [1, Fig. 1c] kann mit Lichtbogenschaltgeräten nicht realisiert werden. Obwohl die Beeinflussung der Schaltspannung durch den Schalter schon vor dem Löschen des Schalter-Lichtbogens beginnt, darf festgestellt werden, dass der Einfluss der langsam veränderlichen Lichtbogen-Brennspannung bei weitem übertroffen wird durch einen schnell ablaufenden Leitfähigkeitswechsel im Löschen. Der erste Einfluss macht sich bemerkbar durch eine nicht sehr stark ins Gewicht fallende Änderung von Cosinuskomponenten. Der zweite Einfluss dagegen (die Stromanregung) äussert sich im Auftreten von erheblichen zusätzlichen sinus-Spannungs- komponenten, verbunden mit cosinusförmigen Schwingströmen, welche darauf zurückzuführen sind, dass der in den Induktivitäten fliessende Reststrom plötzlich vom Schalter auf die Parallelkapazitäten kommutiert.

Der Reststrom (i_R in Phase R) verteile sich auf die beiden Wicklungsphasen (S und T in Fig. 3c) nach dem Muster des Ra- und Rb-Modus, so dass der Strom in der bereits früher abgeschalteten Phase (S) durch Überlagerung verschwindet, woraus sich die Stromkomponenten i_a , i_b berechnen lassen:

$$\begin{aligned} i_S &= 0 = i_a - i_b & i_a &= i_b \\ i_T &= i_R = i_a + i_b & i_a &= i_b = i_R/2 \end{aligned} \quad (19)$$

Diese Stromanfangsbedingungen bedeuten, dass sich die Induktivitätsströme anfänglich nicht ändern. Damit ist auch gesagt, dass der vom Schalterpol T auf die Kapazitäten kommutierte Strom $i_a + i_b = i_R$ nach Ablauf etwa einer Viertelperiode in den Frequenzen $f_a = f_{\text{II}}$ und $f_b = f_{\text{III}}$ eine hohe Spannungsspitze u_p erzeugen wird, während gleichzeitig der andere Schalterpol S an unveränderter Spannung bleibt, weil vergleichsweise der Strom $i_a - i_b = 0$ noch eine kurze Zeit lang null bleibt (Fig. 6).

Um den Verlauf des Oszillogramms der lastseitigen Spannungen $u_S(t)$, $u_T(t)$ gegen Erde zu diskutieren (Fig. 6), muss man auf die 0-fixierte Form der Spannungspolygone in Fig. 5c zurückgreifen. Die gegen Erde gemessenen Spannungen enthalten notwendigerweise (da die erdfreien Spannungen $u_{\text{I-II}}$ keine 0-Achsenbeteiligung haben) vor und hinter dem Schalter (I und II) gleich grosse Komponenten einer Nullschwingung, welche das modale Verhältnis der spannungsangeregten Komponenten u_a , u_b verändern können. Einfachheitshalber sei angenommen, dass die netzseitigen Nullschwingungen (I in Fig. 4b) vernachlässigbar klein seien gegenüber den lastseitigen Schwingungen (II), was mit der Tatsache zusammenfällt, dass die messbaren Spannungsanregungen der Phasen $u_T' - u_T'' = u_T' - u_R''$ und $u_S' - u_S'' = u_S' - u_R'' \approx 0,5 (u_T' - u_R'')$ im Verhältnis 2 : 1 stehen. Man unterscheidet so die cosinusförmigen Spektralkomponenten u_{ac} , u_{bc} , die aus den Anfangsbedingungen des Oszillogramms von Fig. 6 bei $t = 0$ genügend genau berechnet werden können:

$$u_{\text{ac}} = \frac{3}{4} (u_T' - u_R'') \quad u_{\text{bc}} = \frac{1}{3} u_{\text{ac}} \quad (20)$$

und die sinusförmigen Komponenten u_{as} , u_{bs} , die erst mit den Schwingströmen i_a , i_b und Schwingungswiderständen X_a , X_b bestimmt werden können:

$$u_{\text{as}} = X_a \cdot i_R = 2X_a i_a ; \quad u_{\text{bs}} = X_b \cdot i_b = \frac{X_b}{2X_a} \cdot u_{\text{as}} \quad (21)$$

Die beiden Komponentengruppen (Gl. 20, 21) dürfen zu resultierenden Schwingspannungen

$$u_{a, b}(t) = u_{a, b} \cdot e^{-\delta_{a, b} t} \cdot \sin(\omega_{a, b} t + \varphi_{a, b}) \quad (22)$$

zusammengesetzt werden, welche die Anfangsbedingungen ebenso gut wie den gesamten Verlauf der beiden Phasenschwingspannungen (d.i. die Differenz der wirklichen Spannungen $u_{s, T}$ gegenüber der stationären 50-Hz-Spannung u_R) simultan erfüllen müssen:

$$\begin{aligned} u_T(t) - u_R(t) &= u_a(t) + u_b(t) \\ u_S(t) - u_R(t) &= u_a(t) - u_b(t) \end{aligned} \quad (23)$$

Der gemessene Verlauf der Phasenspannungen u_S , u_T jeweils Lastseite gegen Erde (Ausschnitt Ra + b + 0 in Fig. 4b) ist in Fig. 6 auf dem Hintergrund eines metrischen Rasters reproduziert worden. Die Darstellungsgrößen erscheinen im Längenmass. Der stationäre Anteil beider Spannungen (d.i. die Spannung des überbrückten Pols u_R) ist nach Lage des Erdpunkts (0) und nach Lage des Schaltmoments (Lastwinkel und Zeitlinie in Fig. 5c) nur ungefähr bekannt wegen der Unsicherheiten infolge von Lichtbogen-Brennspannung und abgerissenem Reststrom. Am besten bildet man eine Mittellinie zur Schwingspannung und verfolgt den gedachten Verlauf von u_R nach einer netzfrequenten Cosinuslinie zurück bis zum Schaltmoment (gestrichelt in Fig. 6). Die Amplituden der Cosinuskomponenten der Schwingspannung berechnen sich dann angenähert aus einer einzigen Anfangsbedingung, der Spannungsanregung in Phase T im Zeitpunkt $t = 0$ (Gl. 20): $u_T' - u_T'' = u_T' - u_R'' = 50 \text{ mm}$ ergibt $u_{ac} = 37,5 \text{ mm}$ und $u_{bc} = 12,5 \text{ mm}$.

Weitere Grundlagen zu einer rechnerischen Behandlung der gemessenen Spannungskurven bilden die Kreisfrequenzen (ω) bei theoretisch $f_{a, b} = 2,9$ bzw. $4,5 \text{ kHz}$ und 2 simultane Stützpunkte bei sehr kleinem t , darunter die charakteristische Abreißspitze $u_T = u_p$: $u_T(t) = 53(4)$, $u_S(t) = 0(4)$. In den Stützpunktkoordinaten stecken, zusammen mit den Funktionswerten (cos- und sin-Funktionen bei $t = 4 \text{ mm}$ in Fig. 6), die bekannten «idealen» Komponenten (cosinusförmig beginnende Teilschwingungen mit 37,5 bzw. 12,5 mm), und auch die mit dem unbekannten Abreißstrom i_R und mit den Schwingswiderständen zusammenhängenden gesuchten Komponenten

(sinusförmig beginnend nach Gl. 21). Die gesuchten Komponenten berechnen sich also aus einem simultanen Gleichungssystem zu: $u_{as} = 38 \text{ mm}$ und $u_{bs} = 25 \text{ mm}$. Schliesslich lässt sich der Verlauf der beiden Schwingspannungen in Fig. 6 analytisch angeben (u_a , u_b und t in mm):

$$\begin{aligned} u_a(t) &= 53 \cdot \exp(-0,01 \cdot t) \cdot \sin(14,5 t + 50) \\ u_b(t) &= 28 \cdot \exp(-0,015 \cdot t) \cdot \sin(21 \cdot t + 30) \end{aligned}$$

Man beachte, dass die nach den Stützwerten des empirischen Resultats berechneten Sinusamplituden im richtigen Verhältnis liegen, d.h., dass das Verhältnis der Schwingswiderstände stimmt (Gl. 7, 21), was als Beweis für die Richtigkeit der modalen Teilschwingungsverhältnisse, der spannungserrengten wie auch der stromerregten, angesehen werden kann: $X_b/2X_a = 0,65$ an Stelle von $u_b/u_a = 0,66$.

6. Zusammenfassung: Einige Sätze über die Schwingspannungen beim Ausschalten induktiver Ströme in erdfreien Drehstromnetzen

Die theoretischen Ergebnisse der Arbeit seien in einen grösseren Rahmen von Erfahrungen gestellt [1; 2]. Die wichtigsten grundsätzlichen Aussagen sind folgende:

1. Das Drehstrom-Ausschalten vollzieht sich in 2 getrennten Teilevorgängen. Ausser der zeitlichen Folge ist eine räumliche Unterscheidung nach Schwingsmoden in der a- und der b-Achse angezeigt: Beim zweiten Teilevorgang, dem Unterbrechen des b-Achsenstromes, zerfällt das System in 2 getrennte Schwingsysteme. Es schwingt der Lastkreis in der b-Achse (2 Phasen im Gegentakt) mit seiner Eigenfrequenz auf Endwert null, während das speiseseitige Netz mit anderer Eigenfrequenz auf die Leerlaufspannung einschwingt. Die Schwingsamplituden entsprechen der Lastspannung bzw. dem Spannungsabfall an der Quellenimpedanz.

2. Beim Erstvorgang (1 Schalter offen) oder bei anderen Unsymmetriesituationen treten 2 Kopplungsfrequenzen auf, die kleiner sind als die reinen Eigenfrequenzen. Die Spannungsanregung über dem erstunterbrechenden Schalterpol beträgt 1,5mal Phasenspannung. Alle unsymmetrischen Zustände des Schalters haben zudem eine Verschiebung des Netzsternpunkts gegenüber Erde zur Folge. Sternpunktsschwingungen des speisenden Netzes gehen mit derselben Kopplungsfrequenz wie in der abgeschalteten Lastphase; sie kommen, im Gegensatz zum gelöschten Netz [1], bei allpolig offenem Schalter nicht vor.

3. Der Schalter beeinflusst die Schaltspannungen in zweierlei Hinsicht: einmal durch die Lichtbogen-Brennspannung vor dem Löschen und dann durch einen schnell ablaufenden Leitfähigkeitsverlust an der Kontaktstelle, womit der noch nicht bei null angekommene Reststrom *plötzlich* auf die Kapazitäten umgelenkt wird. Der erste Einfluss erhöht die Cosinuskomponenten der Schwingspannung (mässig erhöhte Spannungserregung), der zweite Einfluss, das «Abreissen», erzeugt zusätzliche Schwingspannungskomponenten in der Phasenlage eines Sinus.

4. Der Schalter hat keinen Einfluss auf die Frequenzen des Systems, doch ändern sich dadurch die Anregungsverhältnisse. Der Schalteneinfluss wird um so stärker fühlbar, je geringer die Leerlaufspannung über den geöffneten Kontakten im Schaltmoment ist, so z.B. beim Ringauftrennen [1] oder bei ohmschen Lastimpedanzen. Die stromangeregten Schwingspannungen hängen ab von der Höhe des Reststromes (u.a.

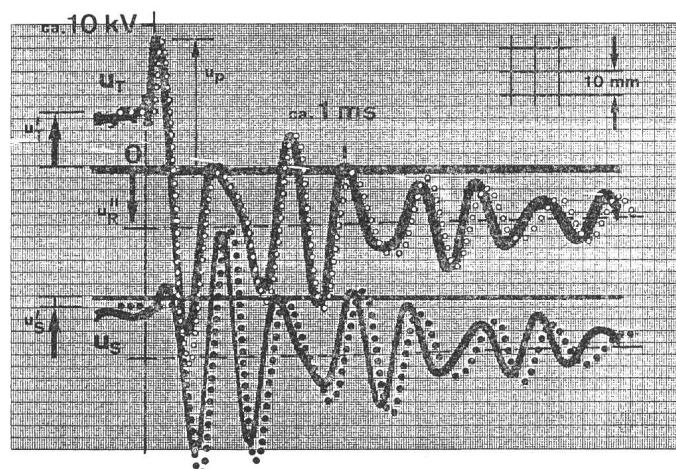


Fig. 6 Oszillogrammausschnitt aus dem Zweitevorgang von Fig. 4b sowie berechneter Spannungsverlauf der lastseitigen Phasen S und T

Punkte bedeuten berechnete Spannungswerte

eine Schaltereigenschaft) und vom Schwingungswiderstand des geschalteten Kreises (nur eine Systemeigenschaft); dieser ist identisch mit der kapazitiven Reaktanz der betreffenden kommutierenden Kapazitäten bei der jeweiligen Eigenfrequenz.

5. Als allgemeine Erfahrung darf festgestellt werden, dass die transiente wiederkehrende Spannung beim Lastausschalten durch Modelle nachgebildet werden kann, bei denen das Netzwerk der speisenden Seite im Mitsystem kurzgeschlossen ist, so dass die Eigenfrequenz der speisenden Seite eine untergeordnete Rolle spielt. Laststrom-Schaltspannungen verlaufen aber wegen des Schalteneinflusses (Lichtbogen) komplizierter ab als die wiederkehrende Spannung nach einem Kurzschluss, wegen des verhältnismässig hohen, mit der Unsicherheit des Abreissens behafteten Anteils stromangeregter Schwingspannungen.

Literatur

- [1] *H.G. Gerlach*: Nicht-ideales Ausschalten induktiver Lastströme im gelöschten Netz. Bull. SEV/VSE 69(1978)24, S. 1326...1331.
- [2] *E. Vogelsanger und H.G. Gerlach*: Untersuchungen über die wiederkehrende Spannung nach Lastabschaltungen in Mittelspannungsnetzen. FKH Bericht A 77/6. Zürich, Forschungskommission für Hochspannung, 1978.
- [3] Disjoncteur à courant alternatif à haute tension. Publication de la CEI N° 56, Partie 1/6.
- [4] Bestimmungen für Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV. Teil 3: Lastschalter. VDE 0670 Teil 3/2.66.
- [5] *H. Edelmann*: Normierte Komponentensysteme zur Behandlung von Unsymmetrieraufgaben in Drehstrom- und Zweiphasennetzen (mit besonderer Berücksichtigung der Erfordernisse des Netzmodells). Arch. Elektrotechn. 42(1956)6, S. 317...331.

Adresse des Autors

Dr.-Ing. *H.G. Gerlach*, Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH), Seefeldstrasse 301, Postfach, 8034 Zürich.

Literatur – Bibliographie

DK: 628.972 : 72

SEV-Nr. A 733

El ambiente luminoso en el espacio arquitectónico. Par *José Manuel Casal*. Madrid, Artes Gráficas Danubio, 1978; 8°, 138 p., fig., tab.

Zum Lehrprogramm der Schule für Architektur in Madrid gehört eine Ausstellung, die dem Thema der beleuchteten Umwelt im Innenraum gewidmet ist. Sie vermittelt den Studierenden Anregungen für die eigene Planung und zeigt Ausrüstungsobjekte, die zur Verwirklichung von Anlagen zur Verfügung stehen. Mit einem Vorlesungskurs wird die Ausstellung ergänzt, und in der gleichzeitig herausgebrachten Schrift, die der bekannte Experte J. M. Casal verfasst hat, werden die neuesten Gesichtspunkte für die Planung von Beleuchtungsanlagen behandelt. Der umfangreiche Stoff ist in vier Kapitel unterteilt: das Licht in der Architektur; der Mensch und das Licht; die Planung der Beleuchtung; die verfügbaren Ausrüstungsobjekte.

Einzelne erfolgt unter Berufung auf gut ausgewähltes Unterrlagenmaterial aus vielen Ländern eine kritische Besprechung der für die Projektierung notwendigen Elemente. Leider wird auf das 1975 erschienene «Handbuch für Beleuchtung», das für das deutschsprachige Gebiet immer noch die aktuellste Publikation ist, nicht hingewiesen. Aus vergleichenden Gegenüberstellungen von Angaben aus Empfehlungen und Normen verschiedener Länder sowie Arbeiten der Commission Internationale de l'Eclairage werden Folgerungen für Empfehlungen des eigenen Landes gezogen. Bei den geschichtlichen Rückblicken wird der Einfluss der Entwicklung der Lichtquellen auf die Architektur gezeigt und mit typischen Beispielen illustriert. Die grosse Zahl der technischen Ausrüstungsobjekte werden bis zu den neuesten Ausführungstypen mit den charakteristischen Eigenschaften beschrieben; bei den Leuchten wird vermerkt, dass bisher nur wenige der einheimischen Fabriken über Messlaboratorien verfügen.

Das Buch von Casal ist ein auf den heutigen Stand der Beleuchtungstechnik und -anwendung gebrachtes Kompendium, das Studierenden und Fachleuten in Spanien auch in nächster Zukunft weigert sein wird.

J. Guanter

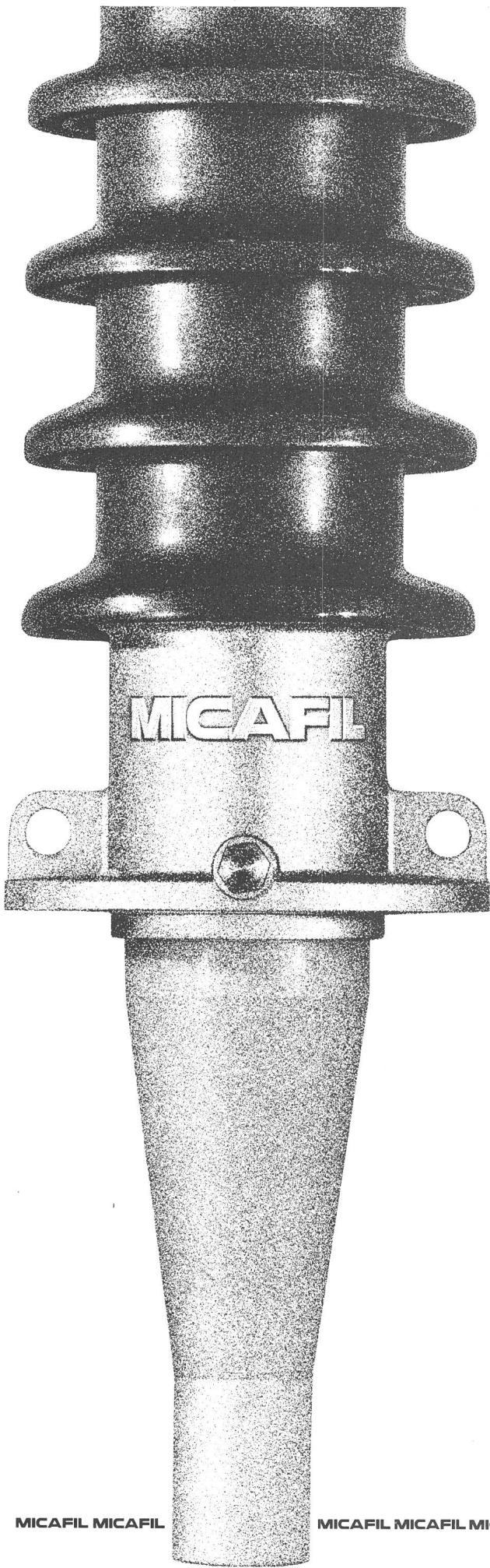
SEV-Nr. A 732

Heteroepitaxial Semiconductors for Electronic Devices. By *Glenn Wherry Cullen and Chih-Chun Wang*. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1978; 8°, XIII/299 p., 239 fig., 28 tab. Price: cloth DM 158.-.

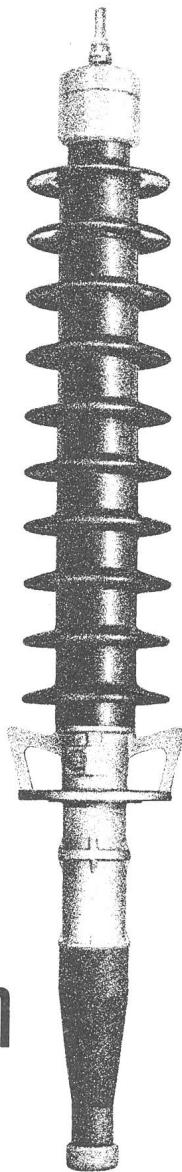
Heteroepitaktische Halbleiter sind einkristalline, auf fremdem Substratmaterial aufgewachsene Halbleiter.

Der vorliegende Sammelband über solche Halbleiter ist aus der aktiven Forschungs- und Entwicklungsarbeit in den RCA-Laboratorien der USA entstanden. Mit seinen 8 Kapiteln von verschiedenen Autoren gibt dieses Buch eine gute Übersicht sowohl über die vielfältigen Aspekte der Präparation und der Charakterisierung von heteroepitaktischen Schichten wie auch über die Eigenschaften dieser Filme und den Stand der Entwicklung vor allem im Hinblick auf Anwendungen in elektronischen Bauelementen. Neben heteroepitaktischen Siliziumschichten, zu denen auch die heute für kapazitätsarme Schaltungen interessanten Siliziumfilme auf Saphir zählen, werden III-V und II-VI Compound-Schichten eingehend behandelt. Ein Kapitel geht besonders auf die Präparation und die Eigenschaften von heteroepitaktischen Halbleiterschichten für Ultraschall- und elektrooptische Bauelemente ein. In einer Übersicht über die chemischen, physikalischen und elektrischen Methoden der Filmcharakterisierung sind Detailangaben über einzelne Filmmaterialien und typische für allfällige Anwendungen nützliche Resultate eingeflochten. Auch die Probleme der heteroepitaktischen Schichten, wie die mechanischen Verspannungen, die Dislokationen der Kristallgitter und deren Einfluss auf die Filmqualität, werden angedeutet.

Für den Bauelement- und Materialentwickler bietet dieses Buch neben einer guten Übersicht eine Fülle von Anregungen, nützlichen Informationen und Quellenhinweisen. Einem weiteren Publikum kann das Buch am Beispiel der heteroepitaktischen Schichten aufzeigen, welch aufwendiger Anstrengungen und zielbewusster Koordination zwischen Material- und Devicespezialisten es bedarf, um in der Elektronikindustrie neue Materialien und Bauelemente zu entwickeln und in Ergänzung zum Silizium auf einen praktisch brauchbaren Stand zu bringen. *H. Melchior*



**Micafil-
Durchführungen
bringen nicht
nur technische
Vorteile...
...sie wirken sich
auch auf den Preis
Ihrer Transformatoren
günstig aus!**



Die Typenreihen UTxf, UTrf und UTkf besitzen das neue Isolationssystem Drysomic® – Der Teilentladungseinsatz erfolgt erst bei 1,5facher Betriebsspannung gegen Erde –

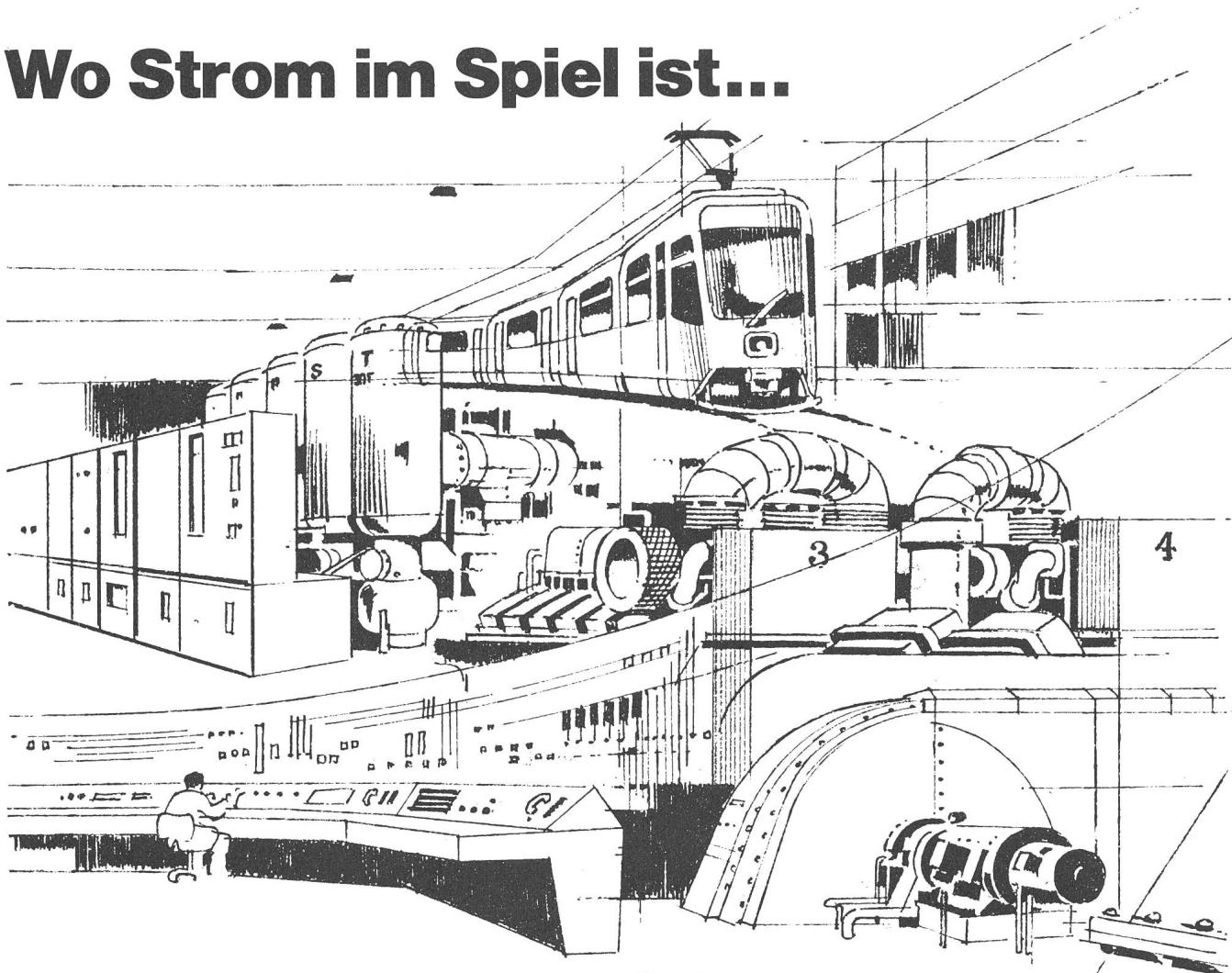
Die Reihe WTxf ist mit ölimprägnierter Hauptisolation ausgerüstet –

Eine umfangreiche, ausführliche Dokumentation mit Literatur steht Ihnen auf Anfrage zur Verfügung

Micafil AG

Abt. Durchführungen Postfach 8048 Zürich

Wo Strom im Spiel ist...



Beim Bau von Kraftwerken,
umweltfreundlichen SF6-isolierten Schaltanlagen,
Notstromanlagen,
Steuertafeln in Mosaiksteintechnik,
elektrischen Ausrüstungen für Bahnen,
Netzautomatisierung und Fernwirktechnik.

Planung:
Unsere Fachleute stehen in jeder Phase des
Projektes beratend bei.

Montage:
Die Anlagen werden weitgehend in unseren
Werkstätten montiert oder zur Montage
vorbereitet.

Service:
Wartung und Service aller gelieferten Anlagen
liegt in den Händen erfahrener Service-Monteure.

Siemens-Albis AG
Vertrieb Energie-Versorgung und Verkehr
Freilagerstrasse 28
8047 Zürich
Tel. 01 247 3111

Rue du Bugnon 42
1020 Renens-Lausanne
021 / 34 96 31

...sind wir dabei.

Fachleute von
Siemens-Albis AG