

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 46 (1955)  
**Heft:** 6

**Artikel:** Das Verhalten von Regulierspartransformatoren gegenüber Stossspannungen  
**Autor:** Wellauer, M.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1058134>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 25.12.2024

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

# Das Verhalten von Regulierspartransformatoren gegenüber Stoßspannungen

Von M. Wellauer, Zürich

621.314.214 : 621.314.223 : 621.3.015.33

Der Verfasser untersucht das Verhalten von Regulierspartransformatoren für hohe Nennspannungen bei Beanspruchung mit Stoßspannungen (Gewitterüberspannungen). An Hand von Berechnungen und Messungen an einem ausgeführten Transformator und an einem Modell wird gezeigt, dass bei Verwendung einer Regulierwicklung mit Lagenaufbau gegenüber einer solchen mit Scheibenspulen wesentlich günstigere Beanspruchungen der Wicklung gegen Erde und viel kleinere Spannungen zwischen den Anzapfungen der Regulierwicklung entstehen. Dies ist besonders der Fall bei einem Stoss, der von der Leitung direkt auf eine Anzapfung der Regulierwicklung auftritt.

L'auteur examine le comportement de transformateurs de réglage pour hautes tensions nominales, lors d'une sollicitation par des tensions de choc (surtensions dues aux orages). En se basant sur des calculs et des mesures avec un transformateur réel, ainsi qu'avec un modèle, il montre qu'en utilisant un enroulement de réglage à étages, au lieu d'un enroulement à galettes, les sollicitations sont sensiblement plus favorables entre l'enroulement et la terre. De même, les tensions entre les prises additionnelles de l'enroulement de réglage sont moins élevées. Cela est particulièrement notable dans le cas d'un choc provenant de la ligne et atteignant directement une prise additionnelle.

## I. Einleitung

Bei der Kupplung von Netzen, deren Nennspannungen nicht sehr stark voneinander abweichen, bringt die Verwendung von Spartransformatoren besonders bei hohen Spannungen wesentliche wirtschaftliche Vorteile. Dies trifft zum Beispiel für die Energieübertragung aus den 220-kV-Leitungen in das ausgedehnte schweizerische 150-kV-Netz zu.

Soll eine der Spannungen in einem grösseren Bereich regulierbar sein, wie dies heute üblich ist, so bestehen gegen die Verwendung von Spartransformatoren Bedenken, weil die Stoßspannungen auf den Leitungen direkt auf die Regulierwicklung und den Stufenwähler einwirken und in diesen hohe Beanspruchungen erzeugen.

dass die letztere Anordnung billiger und einfacher ist, viel kleinere Verluste aufweist und somit vorzuziehen ist, falls sich eine befriedigende Lösung der eingangs erwähnten Probleme finden lässt.

Die vorliegende Arbeit beschreibt das Verhalten des Spartransformators mit Spannungsregulierung bei Beanspruchung mit Stoßspannungen und gibt die von der Maschinenfabrik Oerlikon gewählte konstruktive Ausbildung der Wicklungen der Transformatoren an, die von den Bernischen Kraftwerken für das Werk Mühleberg bestellt worden sind. Die Nenndaten dieser Transformatoren sind in der Tabelle I angegeben.

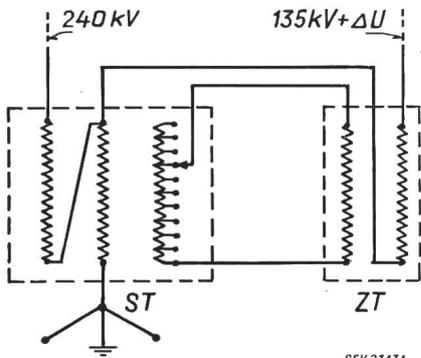


Fig. 1

Spar- und Zusatztransformator mit Regulierung der Unterspannung

ST Spartransformator; ZT Zusatztransformator

Man hat deshalb andere Schaltungen gewählt [1], [2]<sup>1)</sup>, von denen jene, welche einen Spartransformator und einen Zusatztransformator verwenden, die meiste Anwendung gefunden haben. Eine Anordnung mit Regulierung auf der Unterspannungsseite ist in Fig. 1 dargestellt. Hier sind die Wicklungen mit den Anzapfungen und der dazugehörige Stufenwähler auf einem niedrigen Potential gegen Erde, und sie sind dadurch den Stoßspannungen, die auf den Leitungen ankommen, viel weniger ausgesetzt.

Vergleicht man den Gestehungspreis und die Verluste einer Gruppe von drei Einphasen-Spartransformatoren und eines Dreiphasen-Zusatztransformators mit derjenigen von drei Einphasen-Regulierspartransformatoren (Tabelle I), so erkennt man,

Vergleich der Gewichte, Preise und Verluste einer Gruppe von drei Einphasen-Regulierspartransformatoren und einer Gruppe von drei Einphasen-Spartransformatoren mit einem Dreiphasen-Zusatztransformator (nach Fig. 1).

Nennleistung 125 MVA; Oberspannung 240 kV; Unterspannung in 16 Stufen: 135...184 kV

Tabelle I

	Gruppe von drei Einphasen-Regulierspartransformatoren %	Gruppe von drei Einphasen-Spartransformatoren mit Dreiphasen-Zusatztransformator %
<b>Gewichte</b>		
Ohne Öl und Stufenwähler	100	123
Öl	100	104
Total	100	116
<b>Preise</b>		
Transformatoren m. Kühler	100	91
Zusatztransformator	—	27
Stufenwähler	100	70
Antriebe	100	85
Total	100	116
<b>Verluste in kW</b>	Fe Cu Total	Fe Cu Total
Für 240/184 kV	120 245 365	148 330 478
Für 240/135 kV	120 375 480	148 520 668

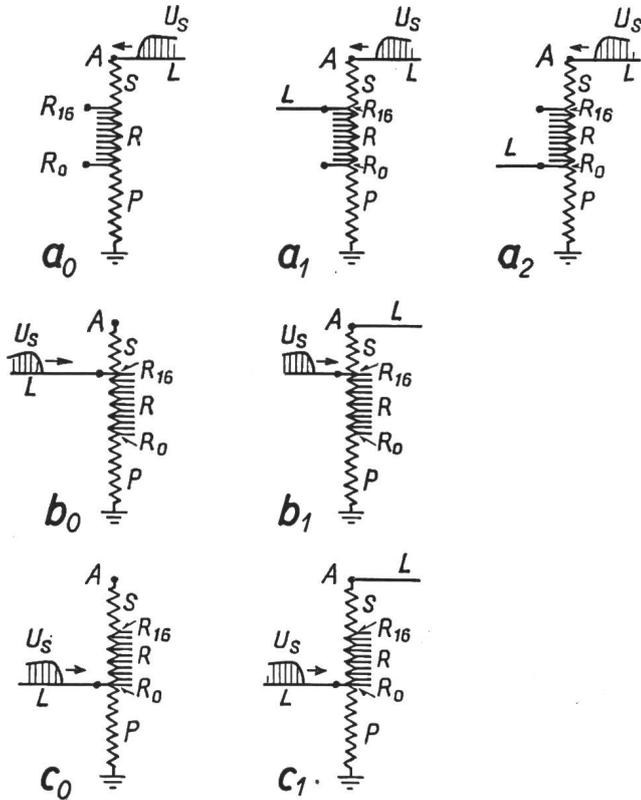
## II. Das prinzipielle Verhalten eines

### Spartransformators mit geerdetem Sternpunkt und regulierter Unterspannung beim Auftreten einer Stoßspannung

Stoßspannungen können von der Oberspannungs- und von der Unterspannungsleitung auf die Transformatorwicklung auftreten. Im letzteren Falle kann jede Regulierstellung die volle Stoßspannung erhalten. Der Einfachheit halber werden nur die in

<sup>1)</sup> siehe Literatur am Schluss.

Fig. 2 zusammengestellten Fälle untersucht und im folgenden mit *Stoßschaltungen* bezeichnet. Von den 16 Regulierstufen  $R_0 \dots R_{16}$  ist  $R_0$  die niedrigste und  $R_{16}$  die höchste. Bei den mit  $a_0, b_0$  und  $c_0$  benannten Stoßschaltungen befindet sich der Transformator im Leerlauf, d. h. er ist nur ober- oder unterspan-

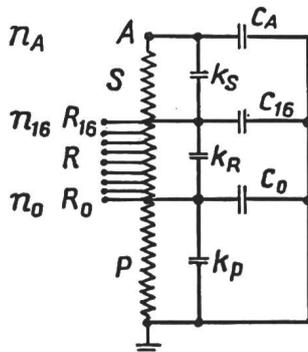


SEV 23132

Fig. 2  
Stoßschaltungen

$U_s$  Stoßspannung; L Leitung; S Sekundärwicklung;  
P Primärwicklung; R Regulierwicklung

nungsseitig an eine Leitung oder Sammelschiene angeschlossen. Bei den Stoßschaltungen  $a_1$  und  $a_2$  fällt die Stoßspannung von der Oberspannungsleitung auf die Oberspannungsklemme A des Transformators, während an die Klemme  $R_{16}$  beziehungsweise  $R_0$  die Unterspannungsleitung angeschlossen ist. Bei der Stoßschaltung  $b_1$  fällt die Stoßspannung



SEV 23133

Fig. 3  
Ersatzschema des offenen Regulierspartransformators  
P Primärwicklung; R Regulierwicklung; S Zusatz- oder Sekundärwicklung;  $n_0, n_{16}$  und  $n_A$  sind die den Wicklungspunkten  $R_0, R_{16}$  und A zugehörigen Windungszahlen, gerechnet vom geerdeten Ende der Wicklung an; c Erdkapazitäten; k Windungskapazitäten

auf die Klemme  $R_{16}$ , bei der Stoßschaltung  $c_1$  auf die Klemme  $R_0$ , wobei in beiden Fällen die Oberspannungsleitung an die Transformator-klemme A angeschlossen ist.

Man erhält nun näherungsweise einen guten Einblick in das Verhalten der Wicklung bei den verschiedenen Stoßschaltungen, wenn man sich in einem Ersatzschema die verteilten Induktivitäten und Kapazitäten der Wicklungen auf die wichtigsten Wicklungspunkte konzentriert denkt (Fig. 3) und die bei einem Stoß auftretenden Spannungen dieser Wicklungspunkte als den *Ausgleichsvorgang* aus dem *Anfangszustand* in den stationären (quasistationären) *Endzustand* dieser Spannungen auffasst. Der Anfangszustand wird mit einem Index  $a$  und der Endzustand mit einem Index  $s$  bezeichnet.

Nach dieser Methode seien im folgenden die verschiedenen Fälle der Figur 2 untersucht.

1. Das Verhalten des offenen Regulierspartransformators bei Stoßbeanspruchung

In diesem Falle (Stoßschaltungen  $a_0, b_0$  und  $c_0$ ) sind die Verhältnisse besonders einfach. Im Ersatzschema Fig. 3 seien die verteilten Kapazitäten auf die Wicklungspunkte A,  $R_{16}$  und  $R_0$  konzentriert. Werden die verteilten *Erdkapazitäten* der Primärwicklung mit  $c_P$ , die der Regulierwicklung mit  $c_R$  und die der Sekundärwicklung mit  $c_S$  bezeichnet, so kann folgende naheliegende Annahme getroffen werden:

$$c_A = 0,5 c_S \tag{1}$$

$$c_{16} = 0,5 (c_S + c_R) \tag{2}$$

$$c_0 = 0,5 (c_R + c_P) \tag{3}$$

In Fig. 3 ersetzen  $k_S, k_R$  und  $k_P$  die effektiven *Windungskapazitäten* der Sekundär-, der Regulier- und der Primärwicklung.

Mit Hilfe dieser Kapazitäten lassen sich die beim Auftreffen einer Stoßspannung entstehenden *Anfangsspannungen*  $u_{Aa}, u_{16a}$  und  $u_{0a}$  berechnen.

Die *quasistationären* Spannungen des Endzustandes (im folgenden einfach *Endspannungen* genannt)  $u_{As}, u_{16s}$  und  $u_{0s}$  der Wicklungspunkte A,  $R_{16}$  und  $R_0$  können im offenen Zustand des Transformators leicht angegeben werden, wobei die Tertiärwicklung als kurzgeschlossen zu betrachten ist. Die Windungszahlen der betrachteten Wicklungspunkte des Beispiels haben folgende relative Werte (Fig. 3):

$$n_0 = 1, n_{16} = 1,35 \text{ und } n_A = 1,8$$

Dann ist:

$$n_0 = 0,56 n_A$$

und

$$n_{16} = 0,75 n_A$$

Die beim Auftreffen einer Stoßspannung bestimmter Form entstehenden quasistationären Spannungen  $u_{As}, u_{16s}$  und  $u_{0s}$  haben die gleiche Form, aber ihre Grösse entspricht den den Wicklungspunkten A,  $R_{16}$  und  $R_0$  zugehörigen Windungszahlen.

Werden die einzelnen Stoßschaltungen der Reihe nach betrachtet, so erhält man, wenn die Stoßspannung mit  $U_s$  bezeichnet wird, folgende Ausdrücke für die Anfangs- und Endspannungen:

Stoßschaltung  $a_0$

Anfangsspannungen:

$$u_{16a} = U_s \frac{1}{1 + c_{16t}/k_S} \tag{4}$$

$$u_{0a} = U_S \frac{1}{1 + c_{16t}/k_S} \cdot \frac{1}{1 + (c_0 + k_P)/k_S} \quad (5)$$

Endspannungen:

$$u_A = U_S \quad (6)$$

$$u_{16s} = U_S \frac{n_{16}}{n_A} \quad (7)$$

$$u_{0s} = U_S \frac{n_0}{n_A} \quad (8)$$

worin mit  $c_{16t}$  die totale Kapazität des Wicklungspunktes 16 zur Erde bezeichnet ist.

Bei Wicklungen mit schmalen, konzentrischen Scheibenspulen, die bei Grosstransformatoren üblich sind, ist die effektive Windungskapazität  $k$  viel kleiner als die Erdkapazität  $c$  ( $k \ll c$ ), so dass man aus (4) und (5) folgende Anfangsspannungen erhält:

$$u_{16a} \approx 0 \quad (9)$$

$$u_{0a} \approx 0 \quad (10)$$

Die Frequenz der Ausgleichsschwingungen lässt sich ebenfalls berechnen, wenn die Induktivitäten der einzelnen Wicklungen  $L_S$ ,  $L_R$  und  $L_P$  bekannt sind. Der Einfluss der Dämpfung kann praktisch vernachlässigt werden, da sie in der sehr kurzen betrachteten Zeit noch wenig wirksam ist. Bei dieser Annahme rechnet man also eher etwas zu ungünstig

Für die Höhe der entstehenden Spannungen ist die Frequenz der Ausgleichsschwingungen wichtig, da diese sich den stationären Spannungen überlagern und der entstehende höchste Spannungswert wesentlich durch die Frequenz bei gegebener Form der auftretenden Stoßspannung bestimmt wird.

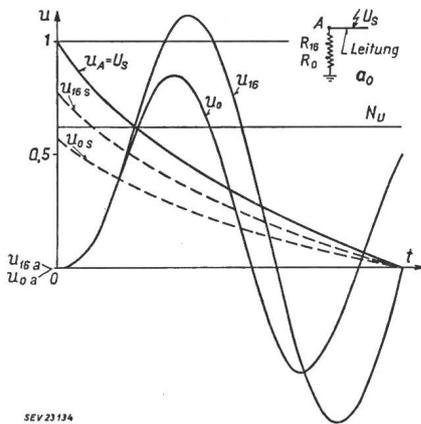


Fig. 4

Berechnete Spannungen  $u_{16}$  und  $u_0$  gegen Erde der Wicklungspunkte  $R_{16}$  und  $R_0$  bei einem Stoß  $U_S$  auf die Oberspannungsleitung

Transformator von der Unterspannungsleitung abgetrennt  
 $N_0$  Stossniveau der Oberspannung;  $N_U$  Stossniveau der Unterspannung

Die mit den obigen Überlegungen bestimmten Spannungen bei der Stoßschaltung  $a_0$  sind in Fig. 4 aufgezeichnet. Beispielsweise entsteht die Spannung  $u_{16}$  dadurch, dass sich die von Null ausgehende Ausgleichsschwingung mit einer Amplitude gleich dem Unterschied von  $u_{16a}$  und  $u_{16s}$  im Zeitpunkt Null der stationären Spannung  $u_{16s}$  überlagert. Man erkennt, dass die Wicklungspunkte  $R_{16}$  und  $R_0$  (Anfang und Ende der Regulierwick-

lung) hohe Spannungen gegen Erde annehmen. Die Spannung  $u_{16}$  schwingt sogar über die Haltespannung der Oberspannung hinaus. Da der Wicklungspunkt das Stoßniveau  $N_U$  der Unterspannung hat, wird bei diesem Vorgang das Stoßniveau des Punktes 16 ganz kräftig überschritten. Weniger hoch sind die Spannungen des Punktes  $R_0$ .

Da die Unterspannungsleitungen nicht angeschlossen sind, treten diese Spannungen in der Unterstation nur bis zum offenen Schalterpol auf.

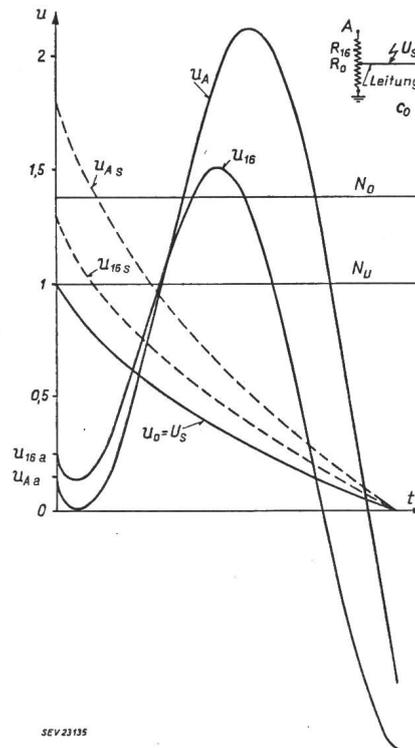


Fig. 5

Berechnete Spannungen gegen Erde der Wicklungspunkte  $A$  und  $R_{16}$  bei einem Stoß  $U_S$  auf die Unterspannungsleitung Tiefste Regulierstellung; Transformator von der Oberspannungsleitung abgetrennt

$N_U$  Stossniveau der Unterspannung;  $N_0$  Stossniveau der Oberspannung

Auf analoge Weise lassen sich die Spannungen des offenen Spartransformators für die Schaltungen  $b_0$  und  $c_0$  bestimmen. Am ungünstigsten werden die Verhältnisse bei einem Stoß auf die unterste Regulierstellung (Stoßschaltung  $c_0$ ). Dieser Fall ist in Fig. 5 dargestellt. Die Spannungen ergeben sich aus den folgenden Anfangs- und Endspannungen:

Stoßschaltung  $c_0$

Anfangsspannungen:

$$u_{16a} = U_S \frac{1}{1 + c_{16t}/k_R} \quad (11)$$

$$u_{Aa} = U_S \frac{1}{1 + c_{16t}/k_R} \cdot \frac{1}{1 + c_A/k_S} \quad (12)$$

Endspannungen:

$$u_0 = U_S \quad (13)$$

$$u_{As} = U_S \frac{n_A}{n_0} \quad (14)$$

$$u_{16s} = U_S \frac{n_{16}}{n_0} \quad (15)$$

Da diese Anfangsspannungen klein sind, schwingen die Spannungen der Klemmen *A* und *R*<sub>16</sub>, wie Fig. 5 zeigt, weit über das diesen Wicklungspunkten zugeschriebene Stossniveau hinaus.

Diese ungünstigen Verhältnisse lassen sich durch konstruktive Massnahmen nur wenig beeinflussen. Es ist also notwendig, sowohl überspannungsseitig als auch unterspannungsseitig Ableiter oder Schutzfunkenstrecken zwischen Transformator клемmen und Erde einzubauen, wenn man diesen hohen Spannungen begegnen will<sup>2)</sup>.

Andererseits darf angenommen werden, dass der Transformator äusserst selten nur einseitig angeschlossen ist. Will man diesen seltenen Fall ganz vermeiden, so ist durch Betriebsvorschrift zu verlangen, dass der Transformator *gleichzeitig* sowohl unterspannungsseitig wie überspannungsseitig von der Sammelschiene abgetrennt wird.

Im folgenden wird nun der weit wichtigere Fall des *beidseitig* an das Netz angeschlossenen Transformators untersucht.

2. Das Verhalten des belasteten, d. h. beidseitig angeschlossenen Regulierspartransformators bei Stossbeanspruchung

Wesentlich günstiger sind nun die Verhältnisse, wenn der Transformator sowohl ober- wie unterspannungsseitig an die Netzleitungen angeschlossen ist. Um die auftretenden Spannungen wieder mit dem Ersatzschema untersuchen zu können, sind die Leitungen *L* durch ihren Wellenwiderstand *Z* zu ersetzen (siehe Schaltungen *a*<sub>1</sub>, *a*<sub>2</sub>, *b*<sub>1</sub> und *c*<sub>1</sub> in Fig. 2). Nach der gleichen Methode sind dann die Ausgleichsschwingungen, die vom Anfang- in den Endzustand überleiten, zu bestimmen.

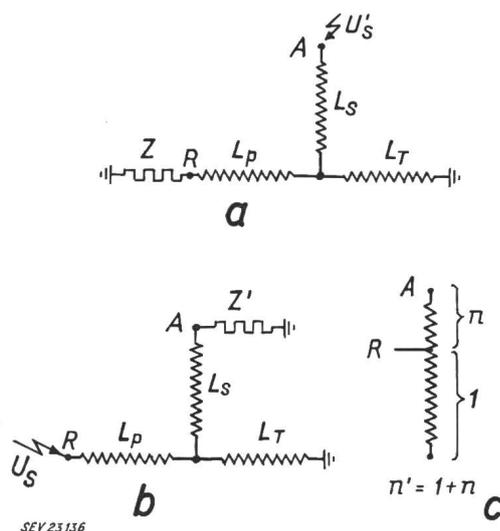


Fig. 6

Ersatzschaltung zur Berechnung der quasistationären Spannungen

a Stoss auf die Oberspannungsklemme *A*. An der Unterspannungsklemme *R* ist eine Leitung angeschlossen mit dem Wellenwiderstand *Z*

b Stoss auf die Unterspannungsklemme *R*. An die Oberspannungsklemme *A* ist eine Leitung angeschlossen mit dem Wellenwiderstand *Z*

c Bezeichnung der zugehörigen Windungszahlen (*l*, *n*)

<sup>2)</sup> Der Vorgang bei einem Stoss auf die Unterspannungswicklung eines auf der Hochspannungsseite offenen Zweiwicklungstransformators ist übrigens ähnlich.

Das Ersatzschema zur Berechnung des quasistationären Zustandes eines belasteten Spartransformators mit einer Tertiärwicklung *T* ist in Fig. 6 a, b dargestellt. Die darin angegebenen Induktivitäten können aus den folgenden Gleichungen berechnet werden [3]:

$$L_S = \frac{n'-1}{2 n'} \left( \frac{n'-2}{n'} L_{PS} + \frac{L_{ST}}{(n'-1)^2} - L_{PT} \right) \quad (16)$$

$$L_P = \frac{n'-1}{2 n'} \left( L_{PS} - \frac{L_{ST}}{(n'-1)^2} - L_{PT} \right) \quad (17)$$

$$L_T = \frac{n'-1}{2 n'} \left( -L_{PS} + \frac{L_{ST}}{(n'-1)^2} + \frac{n'+1}{n'-1} L_{PT} \right) \quad (18)$$

Darin ist

$$n' = 1 + n \quad (19)$$

wenn mit *l* die Windungszahl der jeweiligen Schalterstellung *R* und mit *n* die zusätzliche Windungszahl bis *A* bezeichnet wird (siehe Fig. 6c).

$L_{PS}$  ist die Induktivität der Primärwicklung, wenn die Sekundärwicklung kurzgeschlossen und die Tertiärwicklung offen ist. Dabei ist unter Primärwicklung die Wicklung vom Nullpunkt bis zum Wicklungspunkt *R* und unter Sekundärwicklung die Wicklung von *R* bis *A* zu verstehen. Mit analogen Bedingungen erhält man  $L_{PT}$  und  $L_{ST}$ .

Bei einem Stoss auf die Klemme *A* ist in die Berechnung eine reduzierte Stoßspannung  $U'_S$  einzuführen, und bei einem Stoss auf die Unterspannungsklemme *R* ist in der Berechnung der Widerstand *Z* durch  $Z'$  zu ersetzen, wobei

$$U' = \frac{U}{n'} \quad (20)$$

und

$$Z' = \frac{Z}{(n')^2} \quad (21)$$

Für die Berechnung der quasistationären Spannungen wird der Einfluss der Frontdauer vernachlässigt, also eine Stoßspannung  $U_S$  mit der Frontdauer Null und der Halbwertzeit  $T_h$  angenommen. Es ergeben sich dann folgende Ausdrücke für die stationären Spannungen:

Stoßschaltung *a*<sub>1</sub> und *a*<sub>2</sub>

$$u_A = U_S e^{-at} \quad (22)$$

$$u_R = \frac{U_S}{n'} \cdot \frac{A}{\alpha - a} \left( e^{-at} - e^{-\alpha t} \right) \quad (23)$$

wobei im Ausdruck für Spannung  $u_R$  der Klemme *R* die reziproken Zeitkonstanten *a*,  $\alpha$  und *A* den folgenden Ausdrücken genügen:

$$a = \frac{0,7}{T_h} \quad (24)$$

$$\alpha = \frac{Z(L_S + L_T)}{\Sigma} \quad (25)$$

$$A = \frac{Z L_T}{\Sigma} \quad (26)$$

und

$$\Sigma = L_P L_S + L_P L_T + L_S L_T \quad (27)$$

Die quasistationäre Spannung an einer mit dem Wellenwiderstand *Z* belasteten Klemme *R* hat also

die Form einer Stoßspannung, die mit Null beginnend exponentiell zum Maximum ansteigt und dann wiederum exponentiell abfällt. Aus den Zeitkonstanten

$$T_a = \frac{1}{a} \tag{28}$$

und

$$T_b = \frac{1}{\alpha} \tag{29}$$

können die Zeiten  $t_1$  bis zum Scheitelwert und  $t_2$  bis zum Rückenhalbwert und der Scheitelwert der Spannung aus bekannten Kurven entnommen werden (siehe z. B. [4]).

Die Anfangsspannungen der Wicklungspunkte  $R_{16}$  und  $R_0$  sind wiederum Null, so dass sich die in Fig. 7 und 8 gezeichneten Spannungen für die Stoßschaltung  $a_1$  und  $a_2$  ergeben.

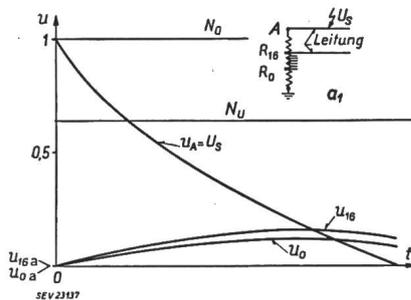


Fig. 7

Berechnete Spannungen  $u_{16}$  und  $u_0$  der Wicklungspunkte  $R_{16}$  und  $R_0$  gegen Erde bei einem Stoß  $U_S$  auf die Oberspannungsleitung

Unterspannungsleitung an die oberste Regulierstellung

$N_0$  Stossniveau der Oberspannung;  $N_U$  Stossniveau der Unterspannung

**Stoßschaltungen  $b_1$  und  $c_1$**

Für diese Schaltungen gilt:

$$u_s = U_S e^{-at} \tag{30}$$

$$u_A = U_S n' \frac{A}{\alpha - a} (e^{-at} - e^{-\alpha t}) \tag{31}$$

$$\alpha = \frac{Z'(L_P + L_T)}{\Sigma} \tag{32}$$

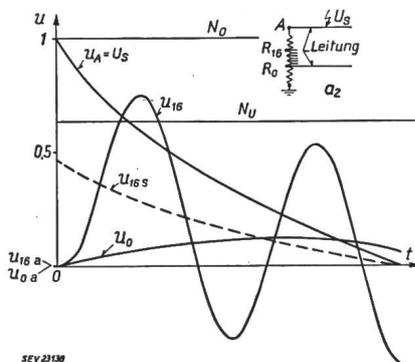


Fig. 8

Berechnete Spannungen  $u_{16}$  und  $u_0$  gegen Erde an den Wicklungspunkten  $R_{16}$  und  $R_0$  bei einem Stoß auf die Oberspannungsleitung

Unterspannungsleitung an die unterste Regulierstellung

$N_0$  Stossniveau der Oberspannung;  $N_U$  Stossniveau der Unterspannung

$$A = \frac{Z' L_T}{\Sigma} \tag{33}$$

worin  $a$  und  $\Sigma$  wie früher zu berechnen sind.

Die Figuren 9 und 10 enthalten die berechneten Spannungen bei den Stoßschaltungen  $b_1$  und  $c_1$ .

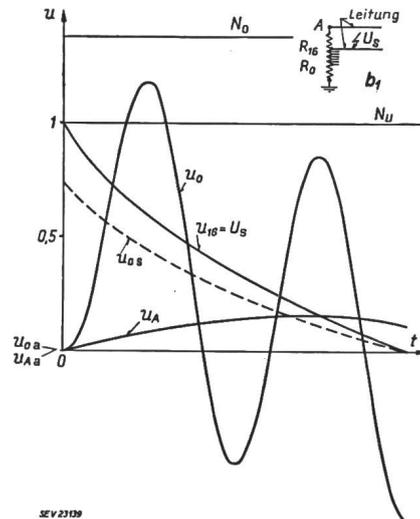


Fig. 9

Berechnete Spannungen  $u_A$  und  $u_0$  gegen Erde der Wicklungspunkte  $A$ , und  $R_{16}$  bei einem Stoß  $U_S$  auf die oberste Regulierstellung

Oberspannungsleitung angeschlossen

$N_0$  Stossniveau der Oberspannung;  $N_U$  Stossniveau der Unterspannung

Der Vergleich der Figuren 7 bis 10 mit denen des offenen Transformators der Figuren 4 und 5 zeigt, wie viel günstiger die Verhältnisse des an die Leitung angeschlossenen Spartransformators sind, besonders was die Spannungen gegen Erde anbetrifft. Die Spannungen aller Wicklungspunkte überschreiten nun das ihnen zugeschriebene Stossniveau viel weniger.

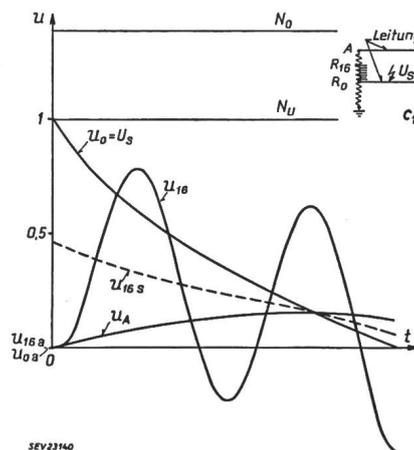


Fig. 10

Berechnete Spannungen  $u_{16}$  und  $u_A$  gegen Erde der Wicklungspunkte  $A$  und  $u_{16}$  bei einem Stoß  $U_S$  auf unterste Regulierstellung

Oberspannungsleitung angeschlossen

$N_0$  Stossniveau der Oberspannung;  $N_U$  Stossniveau der Unterspannung

Immer noch relativ gross sind jedoch die Spannungen, die an der Regulierwicklung, d. h. zwischen  $R_0$  und  $R_{16}$  auftreten. Zieht man ferner in Betracht, dass die Frequenzen der einzelnen Anzapfstellen dieser Wicklung infolge der kleinen induktiven und

kapazitiven Kopplung zwischen den Wicklungsteilen der Regulierwicklung unter sich etwas verschieden sein können, so kommt man zum Resultat, dass auch die Spannungen zwischen den Anzapfungen und damit die Spannungen zwischen den Kontakten des Stufenwählers nahezu so gross werden können wie die Spannung an der ganzen Regulierwicklung, ein Resultat, das durch Messungen bestätigt wird (siehe Fig. 15 und 17).

Um diese ungünstigen Verhältnisse zu beheben, hat die Maschinenfabrik Oerlikon unseres Wissens erstmalig bei sehr hohen Spannungen die im folgenden beschriebene Wicklungsanordnung für Regulierspartransformatoren gewählt, die eine wesentlich bessere Beanspruchung in der ganzen Wicklung bei Stoßspannungen ergibt. Als Resultat dieses günstigen Aufbaues konnte der hier betrachtete Transformator nicht nur mit der Stoßspannung von 960 kV, sondern auch mit der Stoßspannung von 1050 kV (wie für nicht geerdeten Sternpunkt) geprüft werden.

3. Der Spartransformator mit einer Regulierwicklung in Lagenanordnung

Dieser Transformator ist dadurch gekennzeichnet, dass seine Regulierwicklung eine Lagenwicklung ist. Regulierwicklung und Zusatzwicklung sind getrennt auf je einer Säule angeordnet. Das Eisenfenster ist in Fig. 11 dargestellt.

sowie die Zusatzwicklung getrennt auf je einem Eisenkern aufgebaut sind, hat den Vorteil, dass die Regulierwicklung mit ihren 16 Anzapfungen und den Zuleitungen zum Stufenwähler gut zu montieren ist und einfache und kurze Leitungen erhalten werden.

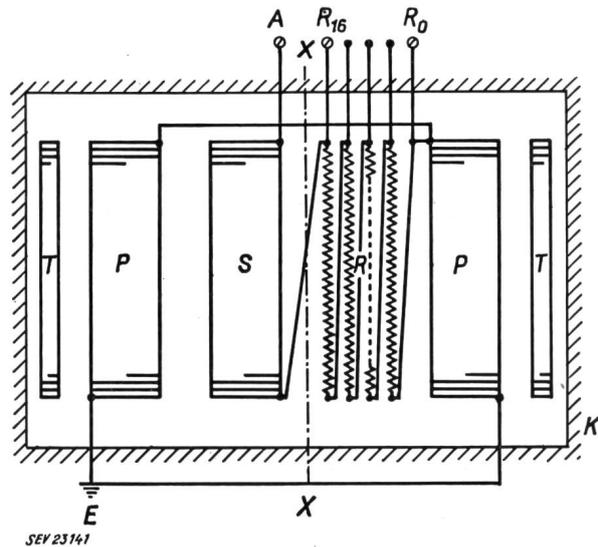


Fig. 11  
Eisenfenster des Regulierspartransformators mit Regulierwicklung in Lagenanordnung mit 16 Stufen  $R_0 \dots R_{16}$   
P Primär (Stamm-)wicklung; R Regulierwicklung; S Sekundär (Zusatz-)wicklung

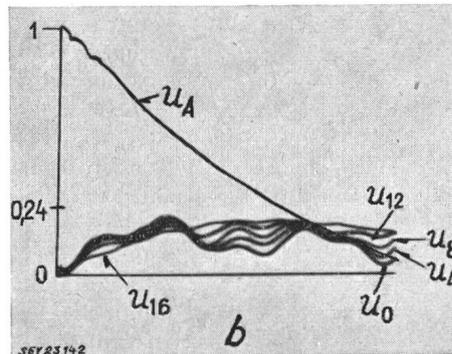
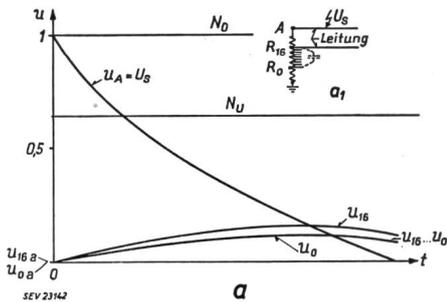


Fig. 12  
Berechnete und gemessene Spannungen  $u_A, u_{12}, u_8, u_4$  und  $u_0$  gegen Erde der Wicklungspunkte A,  $R_{16}, R_{12}, R_8, R_4$  und  $R_0$  bei einem Stoss  $U_S = u_A$  auf die Oberspannungsleitung  
Unterspannungsleitung an die oberste Regulierstellung angeschlossen; Regulierwicklung in Lagenanordnung  
a berechnete Kurven  
b gemessene Kurven  
 $N_0$  Stossniveau der Oberspannung;  $N_U$  Stossniveau der Unterspannung

Dadurch werden folgende Vorteile gewonnen:

a) Die Regulierwicklung als Lagenwicklung ausgeführt bewirkt, vermöge ihrer grösseren Kapazität, bei Stössvorgängen kleinere Spannungen in der ganzen Wicklung und eine

Der Einfluss der Lagenwicklung auf das Verhalten des Transformators bei Stoßspannungen wird jetzt wieder an Hand der Ersatzschaltungen untersucht. Im Ersatzschema, Fig. 3, ist die Win-

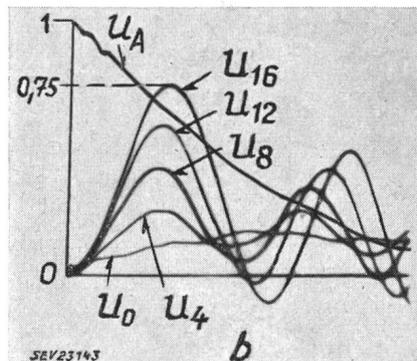
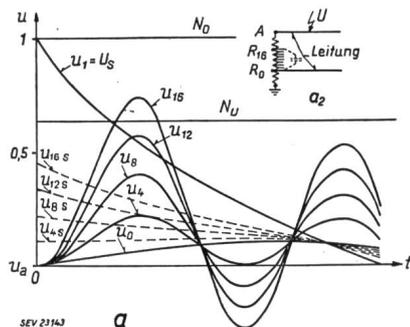


Fig. 13  
Berechnete und gemessene Spannungen  $u_A, u_{16}, u_{12}, u_8, u_4$  und  $u_0$  gegen Erde der Wicklungspunkte A,  $R_{16}, R_{12}, R_8, R_4$  und  $R_0$  bei einem Stoss  $U_S = u_A$  auf die Oberspannungsleitung  
Unterspannungsleitung an die untere Regulierstellung angeschlossen; Regulierwicklung in Lagenanordnung  
a berechnete Kurven  
b gemessene Kurven  
 $N_0$  Stossniveau der Oberspannung;  $N_U$  Stossniveau der Unterspannung

praktisch gleichmässige Aufteilung der in der Regulierwicklung auftretenden Spannungen auf die einzelnen Anzapfungen, beziehungsweise Kontakte des Stufenwählers.

b) Der zweiseilige Aufbau, wobei die Stamm- und die Tertiärwicklung auf die beiden Säulen verteilt und die Regulier-

wicklungskapazität  $k_R$  der Regulierwicklung nun sehr gross. Die übrigen Kapazitäten werden durch die neue Anordnung kaum geändert.

Untersucht man wieder die Verhältnisse bei an-

geschlossenen Leitungen, so erhält man bei der Stoßschaltung  $a_1$  die in Fig. 12a gezeigten, berechneten Spannungen  $u_A = U_S$  der Oberspannungsklemme A und  $u_{16}, u_{12}, u_8, u_4$  und  $u_0$  der Anzapfungen  $R_{16}, R_{12}, R_8, R_4$  und  $R_0$ . Fig. 13a enthält die

der Anzapfungen besonders am Anfang bei hohen Spannungen gleichmässig zusammenschwingen. Die Amplituden dieser Schwingungen entsprechen praktisch genau den Windungszahlen der Anzapfungen. Die gemessene Spannung  $u_{16}$  hat im ungünstigsten

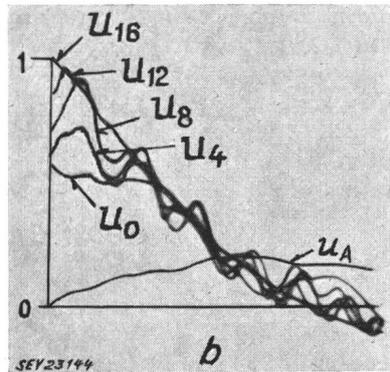
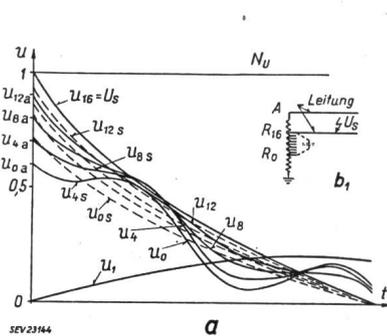


Fig. 13  
Berechnete und gemessene Spannungen  $u_A, u_{16}, u_{12}, u_8, u_4$  und  $u_0$  gegen Erde der Wicklungspunkte A,  $R_{16}, R_{12}, R_8, R_4$  und  $R_0$  bei einem Stoß  $U_S = u_{16}$  auf die oberste Stufe  $R_{16}$  der Unterspannung

Oberspannungsleitung angeschlossen (für die Messung: Oberspannungsklemme A über einen Wellenwiderstand  $Z = 300 \Omega$  an Erde angeschlossen); Regulierwicklung in Lagenanordnung

a berechnete Kurven  
b gemessene Kurven  
 $N_U$  Stossniveau der Unterspannung

berechneten Spannungen bei der Stoßschaltung  $a_2$  für dieselben Wicklungspunkte. Die beim *offenen* und einseitig angeschlossenen Transformator auftretenden Spannungen werden, wie bereits erwähnt, auch durch diese konstruktive Massnahme nicht verbessert.

Falle einen höchsten Wert von 0,75 bezogen auf die Stoßspannung  $U_S$ . Sie überschreitet also das Stossniveau der Unterspannung nur noch um wenige Prozente.

Besonders gut ist nun die Wirkung der Lagenwicklung bei einem Stoß auf die Regulierwicklung, wie die folgenden Figuren zeigen. Fig. 14a enthält die berechneten Spannungen bei einem Stoß auf die oberste Anzapfung der Regulierwicklung (Stoßschaltung  $b_1$ ). Die viel kleineren Ausgleichsspannungen und damit geringeren Beanspruchungen, die man durch die Lagenwicklung gewinnt, lassen sich beim Vergleich der Figuren 14b und 15 erkennen. Fig. 14b zeigt die gemessenen Spannungen des Transformators mit der Regulierwicklung in Lagen und entspricht den berechneten Kurven. Fig. 15 enthält die gemessenen Spannungen bei einem Stoß auf die oberste Anzapfung eines *Modelltransformators* mit dem genau gleichen Wicklungsaufbau und den gleichen Windungszahlen, jedoch *ohne Lagenwicklung*. Diese Figur zeigt das Auseinanderfallen der Spannungsschwingungen der Anzapfungen, wodurch die Aufteilung der ganzen Spannung der Regulierwicklung innerhalb derselben sehr ungünstig wird, wie dies bereits erwähnt wurde.

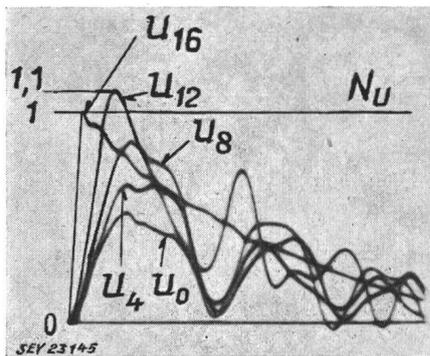


Fig. 14

An einem Modelltransformator gemessene Spannungen  $u_{16}, u_{12}, u_8, u_4$  und  $u_0$  gegen Erde der Wicklungspunkte  $R_{16}, R_{12}, R_8, R_4$  und  $R_0$  bei einem Stoß  $U_S = u_{16}$  auf die oberste Stellung  $R_{16}$  der Regulierwicklung

Regulierwicklung in Scheibenspulenordnung; Oberspannungsklemme A über einen Wellenwiderstand  $Z = 300 \Omega$  geerdet

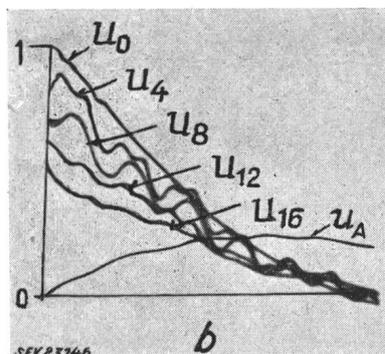
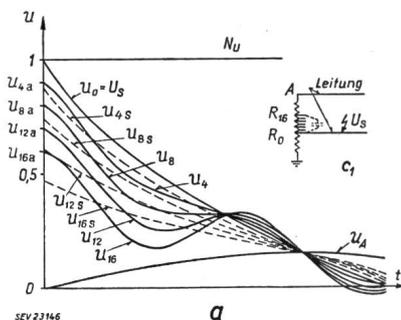


Fig. 15

Berechnete und gemessene Spannungen  $u_A, u_{16}, u_{12}, u_8$  und  $u_4$  gegen Erde der Wicklungspunkte A,  $R_{16}, R_{12}, R_8$  und  $R_4$  bei einem Stoß  $U_S = u_{16}$  auf die unterste Stufe  $R_0$  der Regulierwicklung

Oberspannungsleitung angeschlossen (für die Messung: Oberspannungsklemme A über einen Wellenwiderstand  $Z = 300 \Omega$  an Erde angeschlossen); Regulierwicklung in Lagenanordnung

a berechnete Kurven  
b gemessene Kurven  
 $N_U$  Stossniveau der Unterspannung

Die Figuren 12b und 13b enthalten die entsprechenden gemessenen Spannungen, die mit den berechneten eine gute Übereinstimmung zeigen.

Man erkennt aus diesen Figuren den günstigen Einfluss der Lagenwicklung, da nun die Spannungen

Ganz analog sind die Verhältnisse bei einem Stoß auf die unterste Anzapfung  $R_0$  der Regulierwicklung (Stoßschaltung  $c_1$ ). Fig. 16a zeigt die Berechnung und Fig. 16b die Messung der Spannungen des Regulierspartransformators mit Lagenwicklung. Der

Fortsetzung von Seite 246

**Das Verhalten von Regulierspartransformatoren gegenüber Stoßspannungen (Fortsetzung)**

Vergleich der Figur 16b mit den gemessenen Spannungen des Modelltransformators in Fig. 17 zeigt wiederum das viel bessere Verhalten des Transformators mit der Lagenwicklung.

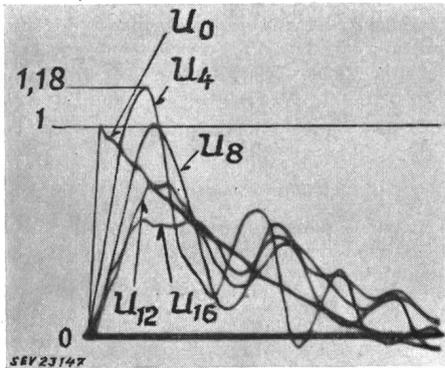


Fig. 17

An einem Modelltransformator gemessene Spannungen  $u_{16}$ ,  $u_{12}$ ,  $u_8$ ,  $u_4$  und  $u_0$  gegen die Erde der Wicklungspunkte  $R_{16}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_8$ ,  $R_4$  und  $R_0$  bei einem Stoss  $U_S$  auf die unterste Stufe  $R_0$  der Regulierwicklung

Regulierwicklung in Scheibenspulenordnung; Oberspannungsklemme A über einen Wellenwiderstand  $Z = 300 \Omega$  geerdet

Der grosse Unterschied im Verhalten des Spartransformators mit einer als Lagenwicklung ausgeführten Regulierwicklung gegenüber einer solchen mit Scheibenspulen wird durch die grosse Windungskapazität der Lagenwicklung bewirkt, die bei einem Stoss auf die Regulierwicklung eine viel günstigere Anfangsspannung in der Regulierlagenwicklung und dadurch viel kleinere Ausgleichspannungsschwingungen entstehen lässt.

Die Lagenkapazität kann ohne Schwierigkeit so gewählt werden, dass die Anfangsspannungen der

Anzapfungen nahe beim Anfang der entsprechenden stationären Spannung liegen, wobei im Idealfall beim völligen Zusammenfallen beider Spannungswerte überhaupt keine Ausgleichsschwingungen in der Regulierwicklung entstehen. Man erkennt aus den Figuren 14b und 16b, dass dies beim Transformator für das Kraftwerk Mühleberg praktisch erreicht wurde. Man darf also mit Bestimmtheit sagen, dass dieser Transformator gerade für einen Stoss auf die Regulierwicklung besonders günstig gebaut ist.

Es ergibt sich aus dieser Untersuchung, dass das Problem der Verwendung von Spartransformatoren mit Spannungsregulierung auch für sehr hohe Spannungen eine zufriedenstellende Lösung gefunden hat.

Der Spartransformator mit einer als Lagenwicklung gebauten Regulierwicklung ist, wenn die Leitungen angeschlossen sind, in sich koordiniert, d. h. die Spannungen sämtlicher Wicklungspunkte überschreiten in allen möglichen Fällen das ihnen zugeschriebene Stoßspannungsniveau nicht.

Es darf darauf hingewiesen werden, dass die guten Eigenschaften in der vorliegenden dargestellten Konstruktion wesentlich dazu beigetragen haben, den Bernischen Kraftwerken den Entschluss zu erleichtern, erstmals in der Schweiz einige Regulierspartransformatoren sehr hoher Spannung und grosser Leistung in Auftrag zu geben.

**Literatur**

- [1] Rossier, Cl. und J. Froidevaux: Liaisons entre réseaux à très haute tension: Transformateurs ou autotransformateurs. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1954, Bd. 2, Rapp. 124, 16 S.
- [2] Wellauer, M.: Le comportement des autotransformateurs de rélage soumis aux tensions de choc. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1954, Bd. 2, Rapp. 123, 14 S.
- [3] Westinghouse: Electrical Transmission and Distribution Reference Book. 3. Aufl.; Pittsburgh: Westinghouse Electric and Manufacturing Co. 1944.
- [4] Wellauer, M.: Einführung in die Hochspannungstechnik. Basel: Birkhäuser 1954.

Adresse des Autors:

Dr. M. Wellauer, Leonhardstrasse 8, Zürich 1.

**Technische Mitteilungen — Communications de nature technique**

**Germanium-Gleichrichter in der Starkstromtechnik**

621.315.592.2 : 621.314.634 : 546.289

[Nach H. N. McIntyre: Germanium Rectifiers - Big Low-Cost Power. Gen. Electr. Rev. Bd. 57(1954), Nr. 6, S. 11...14]

Das in der Elektronik durch seine Anwendung als Transistor berühmt gewordene Germanium (Ge) bringt auch für die Starkstrom-Gleichrichtung einen Fortschritt. Physikalisch gesehen, verwendet man, wie bei den andern metallischen Gleichrichtern Selen (Se) und Kupferoxydul ( $\text{CuO}_2$ ), diejenigen komplizierten Eigenschaften des Ge, die es als «Halbleiter» kennzeichnen. An Stelle des winzigen Ge-Einkristalles beim Transistor treten jedoch beim Starkstromgleichrichter Ge-Querschnitte bis  $1 \text{ cm}^2$  auf.

General Electric baut z. Z. zwei standardisierte Ge-Gleichrichter-Einheiten, bestehend aus Anpassungstransformator, Ge-Zelle und Kühlvorrichtung. Sie können mit Drehstrom von 208, 230, 280 oder 460 V Spannung gespiesen werden. Die luftgekühlte 25-kV-Anlage liefert 400 A, die flüssigkeitgekühlte 120-kV-Anlage 2000 A schwachwelligen Gleichstrom bei 65 V.

Germanium-Gleichrichter zeichnen sich gegenüber allen andern durch ausserordentliche Kleinheit, geringste Verluste (die obigen Anlagen weisen einen Wirkungsgrad von 94% auf), minime Anschaffungs- und Unterhaltskosten und

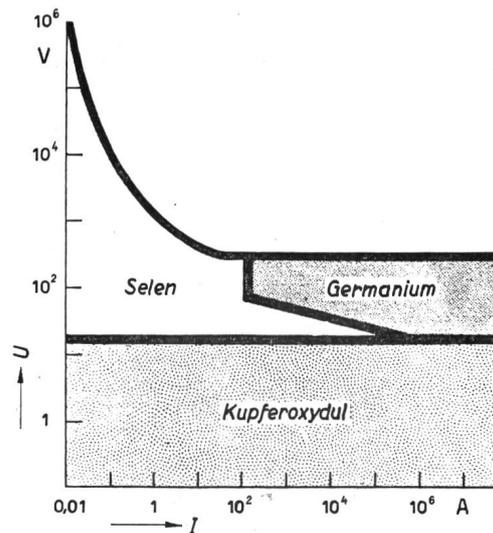


Fig. 1

Wirtschaftlichste Bereiche der metallischen Gleichrichter  
U Gleichspannung; I Gleichstrom