Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 36 (1945)

Heft: 14

Artikel: Untersuchungen über die Uebertragung von Stossvorgängen in Transformatoren

Autor: Meyer, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060235

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 11.12.2025

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

Untersuchungen über die Uebertragung von Stossvorgängen in Transformatoren

Von *H. Meyer*, Baden

621.3.015.33 : 621.314.21

Ausgehend von einer Reihe systematischer Versuche wird an Hand von Tabellen und Oszillogrammen der Aufbau des Uebertragungsvorganges aus seinen einzelnen Komponenten erläutert und qualitativ diskutiert. Weiterhin wird gezeigt, dass man mit der Theorie das Verhalten des Transformators auch quantitativ recht gut erfassen kann, wenn der jeder Komponente eigenen Verknüpfung der massgebenden Grössen sorgfältig Rechnung getragen wird. So zeigt der unseres Wissens erstmals vollständig durchgeführte Vergleich der oszillographischen Messungen mit den allein auf Grund der Konstruktionsdaten berechneten Spannungsverläufen eine sehr schöne Uebereinstimmung.

Des essais systématiques ont été entrepris pour élucider le phénomène du passage des ondes de choc au travers des transformateurs. A l'aide des valeurs numériques recueillies et des oscillogrammes relevés, l'auteur décompose ce phénomène en ses composantes, l'explique et l'analyse qualitativement. Il démontre en outre que la théorie établie peut également servir de base à des calculs numériques, si l'on tient compte exactement pour chacune des composantes, de l'interdépendance des grandeurs déterminantes. En comparant les relevés oscillographiques avec les courbes de tension calculées uniquement d'après les données de construction — une comparaison qui à notre connaissance a été faite pour la première fois d'une manière complète — on constate une concordance remarquable.

Da das Verhalten des Transformators bei Ueberspannungsvorgängen (Stoßspannungen) nicht so einfach ist wie im stationären Betrieb, sind auch die Kenntnisse über die Frage, ob und in welchem Ausmasse sich Ueberspannungen im Transformator übertragen, trotzdem sie in der Literatur schon mehrfach erörtert wurde, noch recht wenig verbreitet, und es schien uns daher wertvoll, ausgehend von eigenen Messungen das Problem umfassend zu behandeln.

I. Einige Versuchsresultate [1])

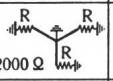
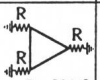
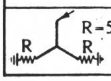
Damit alle bei der Uebertragung im Transformator vorkommenden Komponenten möglichst deutlich erkennbar sein sollten, wurden diese als Ausgangspunkt der prinzipiellen Betrachtungen dienenden Messungen an einem 100-kVA-Transformator mit einem Phasenübersetzungsverhältnis von 1 : 0,5 ausgeführt. Die Phasenwicklungen waren beliebig schaltbar, ferner waren alle Spulenverbindungspunkte für die Messung angezapft; im übrigen befand sich der Transformator jedoch in völlig normalem Zustande, insbesondere also im Oel. Bei den Versuchen wurde die OS-Wicklung mit Stosswellen von etwa 0,5 μs Frontdauer und etwa 200 μs Halbwertdauer (Annäherung an Rechteckwellen) beaufschlagt.

In der Tabelle I sind alle untersuchten Schaltungen zusammengestellt; die bei einigen Fällen angebrachten Belastungen der nicht gestossenen Phasen von 500 und 2000 Ω/Phase sollten den Wellenwiderständen angeschlossener Leitungen oder rotierender Maschinen entsprechen. In die gleiche Tabelle wurden auch die interessantesten Versuchsresultate eingetragen. Eine Kolonne zeigt die sekundärseitig gemessenen maximalen Spannungen in % der primär aufgedrückten Stoßspannung und eine weitere Kolonne dieselben Spannungen, aber nun ausgedrückt in % derjenigen Spannung, die sekundärseitig auftreten würde, wenn sich die Stoßspannungen nach dem Windungszahlverhältnis übersetzen würden. Eingeklammerte Werte beziehen sich auf ev. vorhandene Maxima im Wicklungsinnern, alle übrigen auf die Spannungen an den Klemmen.

Untersuchungen über die Uebertragung von Stoßspannungen in Transformatoren

Die eingeklammerten Werte geben Maxima im Inneren der Wicklung an, die übrigen Werte beziehen sich auf die Klemmen

Tabelle I

Schaltung primär	Schaltung sekundär	ü	Max. Spannung sekundär gegen Erde: in % der primär aufgedrückten Stoßspannung	Max. Spannung sekundär gegen Erde: in % der gemäss Uebersetzung zu erwartenden Spannung
		0,5	60	120
dto		0,5	106	212
dto.		0,5	35	70
dto	dto. mit R-500 Ω	0,5	33	66
dto.		0,29	34	117
dto		0,29	(24,5) 5,5	(84,5) 16
		0,5	58,5	117
dto		0,5	74	148
dto.		0,29	(26) 11,5	(90) 40
	dto. SEV12769	0,29	(31) 11,5	(107) 40

II. Allgemeine Diskussion

1. Ueberblick über die Resultate und grundlegende Betrachtungen über die Komponenten der übertragenen Spannung

Ueberblicken wir in der Zusammenstellung der Versuchsresultate (Tab. I) die Werte der äussersten Kolonne rechts, so fällt folgendes auf: Wenn man von den 2 Fällen mit der Schaltung Stern/Gegenstern absieht, so überschreiten die sekundärseitig auftretenden Spannungen den nach der Ueber-

[1]) Ein kurzer Auszug aus den Abschnitten I und II wurde vom Autor an der Transformatorentagung des SEV vom 13. 7. 1944 als Diskussionsbeitrag vorgetragen, s. Bull. SEV 1944, Nr. 22, S. 627...632.

setzung zu erwartenden Wert nicht stark; in den genannten Ausnahmefällen hingegen tritt sekundärseitig eine ganz wesentlich höhere Spannung auf. Weiterhin zeigen die Messungen der zweiten bis vierten Zeile von oben, dass diese hohen übertragenen Spannungen bei sekundärseitiger Belastung sehr stark abnehmen, also praktisch nur bei leerlaufender Sekundärwicklung ihre extreme Höhe erreichen.

Weshalb sind nun diese Schaltungen besonders ungünstig, und woher kommt die starke Abhängigkeit von der Belastung? Um diese Fragen beantworten zu können und einen tieferen Einblick in die auftretenden Vorgänge zu erhalten, sollen an Hand der Tabelle II die einzelnen Komponenten, aus denen sich die übertragene Spannung zusammensetzt, etwas näher betrachtet werden.

übersetzung übertragen, weil ja zur Aufrechterhaltung der Stoßspannung an den Klemmen der Primärwicklung in dieser Wicklung ein $L\frac{di}{dt}$ und damit ein anwachsendes Feld vorhanden sein muss, welches auch die Sekundärwicklung induziert. Der Uebergang von der kapazitiven Anfangsspannung *a)* in die übertragene Stoßspannung *b)* vollzieht sich in Form einer Eigenschwingung *d)* der Sekundärwicklung, deren Amplitude um so grösser wird, je grösser die Abweichung der Anfangswerte der beiden Spannungen *a)* und *b)* ist. Da die Potentiale an beiden Enden der Primärwicklung festgehalten sind, wirkt die Primärwicklung für die Ausgleichsschwingungen als kurzgeschlossene Wicklung, und

Art der auf der nicht gestossenen Sekundärseite auftretenden Spannungen
Schaltungen: Stern/Stern oder Stern/Gegenstern
Stoss: Dreipolig

Tabelle II.

Sternpunkt primär (Stoßseite) *geerdet*		Sternpunkt primär *isoliert*		
Sekundärseite offen	Sekundärseite belastet	Allgemein	Mit enger Kopplung zwischen Primär- und Sekundärseite	Mit übersetzter Kap. der Sekundärseite << Kap. der Primärseite
a) Kapazitiv übertragene Spannung	dito	a) Kapazitiv übertragene Spannung	dito	dito
b) Stoss übersetzt gemäss Leerlaufübersetzung	⟶ dito mit flachem Anstieg gemäss Zeitkonstante von Streuung, Belastung und Wellenwiderständen der Zuleitungen.	b) ———	———	———
c) ———	———	c) 1. (langsame) Koppelschwingung	⟶ Hauptfeldschwingung (Hauptfeld mit Summe der auf gleiche Seite übersetzten primär- u. sekundärseitigen Kapazität)	⟶ Eigenschwingung der Primärwicklung (Hauptfeld und primärseitige Kapazität)
d) Eigenschwingung der Sekundärwicklung (Streufeld und sekundärseitige Kapazität)	dito	d) 2. (schnelle) Koppelschwingung	⟶ Streufeldschwingung (Streufeld und Serieschaltung der auf gleiche Seite übersetzten primär- und sekundärseitigen Kapazität)	⟶ Eigenschwingung der Sekundärwicklung (Streufeld und sekundärseitige Kapazität)
Die Differenz zwischen a) und b) ist identisch mit der Anfangsbedingung für d), so dass im Oszillogramm a) gleich dem Anfangswert von d) ist.		a) ist identisch mit dem Anfangswert der Resultierenden von c) und d) auf der Sekundärseite.		
NB. Bei c) und d) sind für alle Induktivitäten und Kapazitäten die Korrekturfaktoren für die längs der Wicklung nichtkonstanten Ströme und Spannungen zu berücksichtigen.				

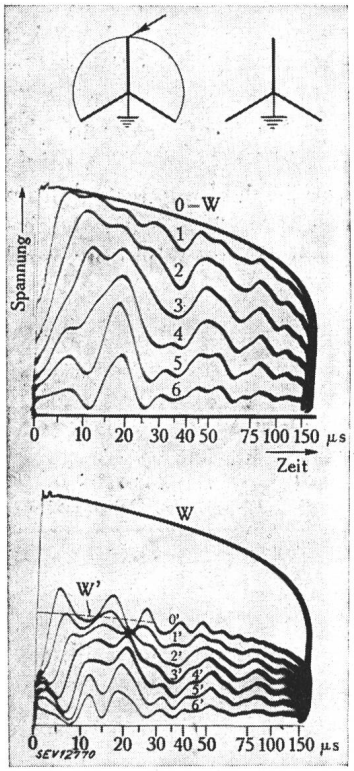
Sehen wir zuerst die Schaltung mit *primär geerdetem* Sternpunkt etwas näher an (linke Seite der Tabelle). Ganz links finden wir die einzelnen Komponenten aufgezählt, aus denen sich der Vorgang der Spannungsübertragung zusammensetzt. Zuerst kommt die kapazitive Uebertragung; wie nämlich der Primärwicklung durch den Stoss bekanntlich eine kapazitive Anfangsspannungsverteilung aufgedrückt wird, entsteht auch in der Sekundärwicklung entsprechend ihrer Lage im elektrischen Feld eine kapazitive Anfangsspannungsverteilung. Weiterhin wird die Stoßspannung selber bei unbelasteter Sekundärseite nach der Leerlauf-

es ist für die sekundäre Eigenschwingung nur das Streufeld massgebend. Wird die Sekundärseite jedoch belastet, so erhält die übertragene Stoßspannung *b)*, wie in der 2. Kolonne der Tabelle angegeben ist, einen sehr flachen Anstieg entsprechend den Zeitkonstanten von Streuung und Belastung sowie den Wellenwiderständen der Zuleitungen [2]; dadurch wird die anfängliche Abweichung der Spannungen *a)* und *b)* viel kleiner und somit auch die Amplitude der Ausgleichsschwingung *d)*. Hierin liegt der Grund für die eingangs festgestellte starke

[2]) Man erkennt dies leicht, wenn man sich das Steinmetzsche Ersatzschema des Transformators vergegenwärtigt.

Verminderung der übertragenen Spannung bei sekundärseitiger Belastung.

Fig. 1 und 2 zeigen, wie sich diese Vorgänge in den Wicklungen abspielen und in den bei den Versuchen aufgenommenen Oszillogrammen erkennen lassen. Fig. 1 enthält die Resultate für die Schal-



a

b

c c

Fig. 1.
Oszillogramme der in den Transformatorwicklungen auftretenden Spannungen
0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 bedeuten die Spannungen am Wicklungseingang und nach der 1., 2., 3., 4., 5., 6. Spule der gestossenen Primärwicklung; mit 0', 1', 2', 3', 4', 5', 6' sind die Spannungen an der Klemme und nach der 1., 2., 3., 4., 5., 6. Spule der Sekundärwicklung bezeichnet.
W ist der Verlauf der primär aufgedrückten Stoßspannung, W' die entsprechende gemäss der Leerlaufübersetzung übertragene Spannung

a Schaltung
b Spannungen primärseitig
c Spannungen sekundärseitig, unbelastet

tung Stern/Stern. Oben sind die Spannungsverläufe an den verschiedenen Spulenenden der Primärwicklung in Funktion der Zeit aufgezeichnet; unten ebenso für die Spulen der Sekundärwicklung. Man erkennt in der Primärwicklung die kapazitive Anfangsspannungsverteilung zur Zeit $t = 0$, welche anschliessend über Eigenschwingungen in die lineare induktive Endverteilung übergeht. Ebenso sehen wir unten, wie die sekundären Spannungsverläufe vom Wert der kapazitiv übertragenen Spannung ausgehen, und wie die sekundäre Klemmenspannung *0'* die besprochene Schwingung um den gestrichelt eingezeichneten Verlauf der auf die Sekundärseite übertragenen Stosswelle *W'* ausführt. Fig. 2 zeigt die entsprechenden Vorgänge für die Schaltung Stern/Gegenstern. Man erkennt wieder oben die Spannungsverläufe in der Primärwicklung, in der Mitte diejenigen in der unbelasteten Sekundärwicklung. Die kapazitive Anfangsspannung ist auch in der Sekundärwicklung gleichphasig wie die primärseitige Wellenspannung nach oben gerichtet, die übertragene Stoßspannung *W'* aber wegen der gegenphasigen Schaltung der Wicklungen nach unten, so dass eine viel grössere Abweichung der beiden Spannungen und damit auch eine grössere Amplitude der Eigenschwingung der Sekundärwicklung vorhanden ist. Wie das Bild zeigt, erreicht dann die sekundäre Klemmenspannung *0'* im Verlaufe ihrer Schwingung um die übertragene Wellenspannung *W'* die hohen Werte, die für diesen Fall in Tabelle I angegeben sind. Im gleichen Bild sehen wir unten den Vorgang in der Sekundärwicklung unter sonst gleichen Umständen, aber bei sekundärseitiger Belastung mit 500 Ω/Phase. Die Kurve *W* zeigt als Maßstab die primär aufgedrückte Stoßspannung. Als übersetzte Stoßspannung tritt nun nicht mehr ein Spannungsverlauf nach *W'* im mittleren Bilde auf, sondern eine nach Massgabe der in Tabelle II genannten Zeitkonstanten flach ansteigende Spannung. Die Schwingungsamplituden und die maximalen Werte der sekundärseitigen Klemmenspannung bleiben daher sehr viel kleiner als bei unbelasteter Wicklung.

Betrachten wir nun den Fall mit *primärseitig ungeerdetem* Sternpunkt an Hand der rechten Seite der Tabelle II. Es tritt wieder eine kapazitiv übertragene Spannung *a)* auf, hingegen findet nun keine Uebertragung des Stosses selber statt, weil ja wegen des isolierten Sternpunktes die Stoßspannung nicht zwischen beiden Enden der primären Phasenwicklung angelegt ist. Dafür ergeben sich nun zwei gekoppelte schwingungsfähige Systeme (Wicklungen und Kapazitäten), deren Grundschwingungen die beiden Koppelschwingungen *c)* und *d)* des gekoppelten Systems sind. Ist die Kopplung zwischen Pri-

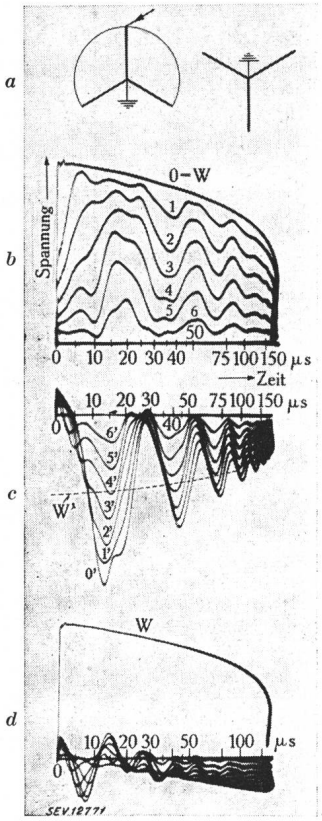


Fig. 2.
Oszillogramm der in den Transformatorwicklungen auftretenden Spannungen
Bezeichnungen wie in Fig. 1

a Schaltung
b Spannungen primärseitig
c Spannungen sekundärseitig, sekundär unbelastet
d Spannungen sekundärseitig, sekundär mit 500 Ω/Phase belastet.

mär- und Sekundärwicklung eng, wie dies bei Transformatoren stets der Fall ist, so lässt sich im besonderen die langsame Koppelschwingung als Hauptfeldschwingung und die rasche Koppelschwingung als Streufeldschwingung identifizieren; die zugehörigen massgebenden Schwingungskapazitäten sind der Tabelle zu entnehmen. Wenn weiterhin noch

speziell die Bedingung erfüllt ist, dass die auf die Primärseite übersetzte sekundärseitige Kapazität klein ist gegenüber der primärseitigen Kapazität, wie dies bei Transformatoren zwar in vielen Fällen, aber *nicht* immer, zutrifft, so kann man die Hauptfeldschwingung als Eigenschwingung der Primärwicklung und die Streufeldschwingung als Eigenschwingung der Sekundärseite darstellen. Dies sind aber nur Spezialfälle, die keine allgemeine Geltung beanspruchen können; die hier gebrachte Darstellung dürfte jedoch Herkunft und Geltungsbereich klargestellt haben. Insbesondere zeigt die Ableitung einleuchtend, wieso bei der einen Eigenschwingung das Hauptfeld und bei der anderen das Streufeld bestimmend ist, wo doch an sich beide Wicklungen gleichwertig sind. Die Amplituden der beiden Koppelschwingungen ergeben sich eindeutig daraus, dass ihre auf die entsprechenden Seiten übersetzten resultierenden Spannungen am Anfang des Vorganges gleich den kapazitiven Anfangswerten in der Primär- und Sekundärwicklung sein müssen.

Fig. 3 zeigt wieder die beschriebenen Vorgänge im Oszillogramm. Oben sind die Spannungen in der Primärwicklung aufgezeichnet und man bemerkt, wie der isolierte Sternpunkt (Kurve 7) die bekannte Nullpunktschwingung ausführt und hiebei sein

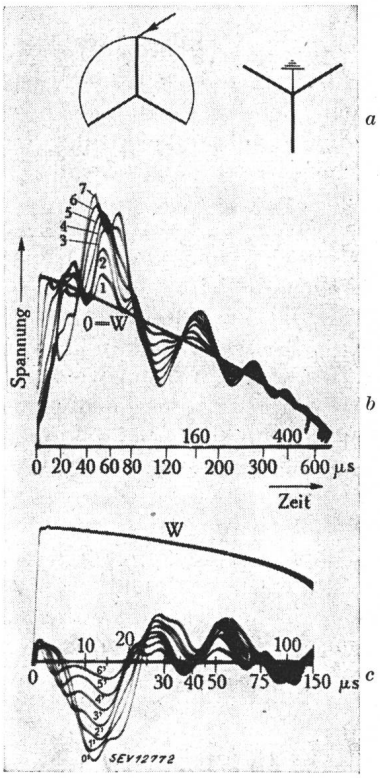


Fig. 3.
Oszillogramm der in den Transformatorwicklungen auftretenden Spannungen
Bezeichnungen wie in Fig. 1; dazu zeigt Kurve 7 den Spannungsverlauf am isolierten primärseitigen Sternpunkt

a Schaltung
b Spannungen primärseitig
c Spannungen sekundärseitig, unbelastet.

Potential dasjenige der gestossenen Klemmen erheblich übersteigt. Unten sind in einem etwas gedehnteren Zeitmaßstab die Spannungen in der Sekundärwicklung aufgezeichnet. Man sieht, dass nicht mehr wie in den früheren Bildern eine übertragene Stoßspannung vorhanden ist, sondern dass die sekundärseitigen Spannungen im Gesamten um die Nullinie schwingen. Der komplizierte Verlauf kommt durch Ueberlagerung der langsamen Hauptfeldschwingung, welche mit einer negativen Viertelwelle beginnt, mit der rund 4mal rascheren Streufeldschwingung, die mit einer positiven Viertelwelle vom kapazitiven Anfangswert ausgeht, zu Stande.

Diese Betrachtungen, die vorerst nur für 3polige Stösse gelten, sind noch für die Beurteilung des Verhaltens bei *1poligem* Stoss zu ergänzen. Bei den Schaltungen Stern/Stern und Stern/Gegenstern mit primär geerdetem Sternpunkt spielt es für den prinzipiellen Verlauf der Vorgänge keine Rolle, ob der Stoss 1- oder 3polig erfolgt; für die Schaltung Stern/Dreieck mit primär geerdetem Sternpunkt ist ebenfalls kein prinzipiell anderes Verhalten zu erwarten; es muss lediglich berücksichtigt werden, dass die Sekundärwicklung der gestossenen Phase mit den Sekundärwicklungen der ungestossenen Phasen belastet ist. Die sekundärseitig auftretenden Spannungen sind daher für 1poligen Stoss bei allen diesen Schaltungen nicht grösser als bei 3poligem Stoss.

Zur Beurteilung des Verhaltens der Schaltungen mit primär isoliertem Sternpunkt bei einpoligem Stoss ist folgende Ueberlegung nützlich: Man kann sich den 3poligen Stoss als Superposition von einpoligen Stössen auf jede Phase entstanden denken. Pro einpoligen Stoss und Schaltung Stern/Stern oder Stern/Gegenstern mit primär isoliertem Sternpunkt entsteht daher sekundär in jeder Phase eine Hauptfeldschwingung, deren Amplitude $^1/_3$ der entsprechenden Grösse beim 3poligen Stoss beträgt und die in allen Phasen gleichphasig auftritt. Ferner ist noch eine übertragene Stoßspannung, ähnlich wie bei den Schaltungen mit primär geerdetem Sternpunkt, vorhanden [3]), die in der gestossenen Phase $^2/_3$, in den beiden andern $^1/_3$ der nach Uebersetzung übertragenen vollen Wellenhöhe beträgt, wobei diese Spannungen in der gestossenen Phase einerseits und in den beiden nicht gestossenen Phasen anderseits gegenphasig sind. Die Summe dieser beiden Spannungen gibt mit ihrer Abweichung vom kapazitiv bedingten Anfangswert wieder die Mittellage für die Ausgleichsschwingung des Streufeldes. Da die sekundärseitige Amplitude der Hauptfeldschwingung beim 3poligen Stoss annähernd den Wert der übersetzten aufgedrückten Stoßspannung aufweist, so haben wir beim einpoligen Stoss in der gestossenen Phase annähernd die gleiche Schwingungsmittellage und Ausgangsamplitude der Streufeldschwingung, somit auch die gleichen Maxima der übertragenen Spannung wie beim 3poligen Stoss.

In der Schaltung Stern/Dreieck heben sich beim 3poligen Stoss nach aussen (zwischen den Klemmen) alle übertragenen Spannungen auf und die Dreieck-Wicklung nimmt einfach als Ganzes das durch die kapazitive Spannungsteilung bedingte Potential an, sofern die Sekundärseite nicht irgendwo geerdet ist. Beim einpoligen Stoss hingegen werden durch die Dreieck-Schaltung nur die gleich-

[3]) Es liegt hier also der ganz allgemeine Fall vor, bei dem in der Aufstellung nach Tab. II rechts auch die Komponente *b)*, somit also alle Komponenten vorhanden sind.

phasigen Anteile der Hauptfeldschwingung kurzgeschlossen, diese daher im Auftreten verhindert, nicht aber die Anteile des übertragenen Stosses. An den Sekundärklemmen der gestossenen Phase entsteht daher eine Spannung entsprechend einem nach den Phasenwindungszahlen übersetzten Stoss von $^2/_3$ der primär aufgedrückten Amplitude. Bei Belastung gilt hiebei das gleiche, wie wir es früher bei den Schaltungen Stern/Stern mit primärseitig geerdetem Sternpunkt gesehen haben, d. h. der übersetzte Stoss bekommt einen flachen Anstieg nach der Zeitkonstanten von Streuung, Belastung und Wellenwiderständen der Zuleitungen; ist die Belastung ferner beispielsweise in Stern gegen Erde geschaltet, so sind die sekundären Klemmenspannungen an der gestossenen Phase symmetrisch gegen Erde und verlaufen im übrigen ganz analog, wie es

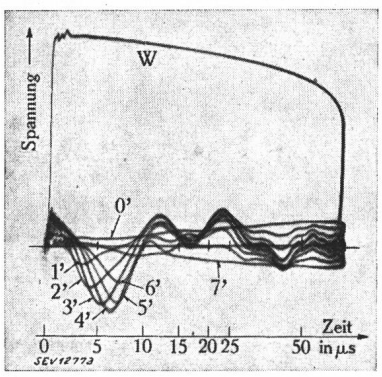


Fig. 4.
Oszillogramm der bei einpoligem Stoss in der Sekundärwicklung der gestossenen Phase auftretenden Spannungen. Schaltung Stern/Dreieck, Belastung sekundär 500 Ω/Phase gegen Erde
0', 1', 2', 3', 4', 5', 6', 7' bedeuten die Spannungen am Anfang und nach der 1., 2. ... 6., 7. Spule der Sekundärwicklung, 0' und 7' sind somit an den Klemmenanschlüssen der gestossenen Phase gemessen. W gibt als Maßstab die Grösse der primär aufgedrückten Stoßspannung.

bei der Schaltung Stern/Stern oder Stern/Gegenstern mit primär geerdetem Sternpunkt der Fall ist (vgl. Fig. 2 unten). Das Oszillogramm Fig. 4 wurde bei dem in der Gesamtaufstellung Tab. I zu unterst angegebenen Versuch aufgenommen und lässt die beschriebenen Merkmale schön erkennen. Im Wicklungsinnern sind hiebei die Spannungsverläufe nicht so einfach wie an den Klemmen, da das Auftreten interner Schwingungen (geradzahlige Harmonische) durch die Dreieck-Schaltung der Sekundärwicklung natürlich nicht verhindert wird.

2. Kurzer Vergleich des Verhaltens der verschiedenen Schaltungen

Will man die einzelnen Schaltungen vergleichen, so ist zu beachten, dass den elektromagnetisch übertragenen Komponenten der Stoßspannung gegenüber den rein kapazitiv übertragenen Anteilen die grössere Bedeutung zukommt, da jene viel energiereicher sind als diese und sich im Gegensatz zu den kapazitiven Komponenten durch die Kapazität der angeschlossenen Anlageteile und Kabel nicht wesentlich reduzieren lassen (es werden direkt nur die Frequenzen der Vorgänge geändert).

Aus der Zusammenstellung der Messresultate, wie auch aus den Erklärungen des vorhergehenden Abschnittes geht hervor, dass die Schaltungen Stern/Gegenstern, mit und ohne primärseitig geerdeten Sternpunkt, weitaus das ungünstigste Verhalten zeigen und sekundärseitig die höchsten Spannungen entstehen lassen. Schon bedeutend günstiger verhalten sich die Schaltungen Stern/Stern. Hier ist zu bemerken, dass es bei kapazitiver Belastung, z. B. durch angeschlossene Kabel, und den Schaltungen Stern/Stern oder Stern/Gegenstern nur mit Rücksicht auf die übertragenen Spannungen vorteilhafter wäre, eine Erdung des sekundärseitigen Sternpunktes nicht am Transformator vorzunehmen; denn die übertragenen Spannungen arbeiten dann gegen Erde auf die kapazitive Spannungsteilung von Transformatorkapazität und Belastungskapazität, so dass bei überwiegender Belastungskapazität das Netz zu Lasten des Sternpunktes in seiner Spannungsbeanspruchung entlastet wird. Ferner ist zu beachten, dass die höchsten Werte der sekundärseitigen Spannungen durch Ueberlagerung von Schwingungen zu Stande kommen, und daher flacher sind als übliche Stosswellen, so dass auf Steilheit des Spannungsanstieges empfindliche Maschinen und Apparate etwas weniger hoch beansprucht werden.

Wesentlich günstiger als die Schaltungen Stern/Stern und Stern/Gegenstern verhält sich die Schaltung Stern/Dreieck, indem bei so geschalteten Transformatoren die Ausgleichs- und Stossvorgänge bei dreipoligem Stoss überhaupt nicht übertragen werden und nur der ganzen US-Wicklung eine kapazitive Spannung erteilt wird, deren Höhe durch sekundärseitige Kapazitäten (Anlage- und Kabelkapazität) und Belastungen niedrig gehalten wird. Beim einpoligen Stoss ist das Verhalten zwar nicht ganz so günstig wie beim 3poligen Stoss, indem die Komponente *b)* des Stosses übertragen wird; da aber der Beitrag der weiteren Komponente der Hauptfeldschwingung fehlt, bleibt die sekundär auftretende Spannung immer noch wesentlich kleiner als beim entsprechenden Stoss bei den Schaltungen Stern/Stern oder Stern/Gegenstern.

Es sei hier noch kurz erwähnt, dass sich die Schaltung Stern/Zickzack ganz ähnlich wie die Schaltung Stern/Dreieck verhält, also auch recht günstig ist, mit Ausnahme der Transformatoren zur Speisung von Niederspannungsnetzen aber selten zur Anwendung gelangt.

III. Die Berechnung der übertragenen Spannungen (Grundschwingungen) für den 3poligen Stoss aus den Konstruktionsdaten

1. Berechnung der grundlegenden Grössen

Die Kapazität zwischen US-Wicklung und Erde (Eisenkern) berechnet sich zu $C_2 = 750$ pF/Phasenwicklung bzw. 107 pF/Spule.

Die Kapazität zwischen OS-Wicklung und US-Wicklung lässt sich als Kapazität zweier konzentri-

scher Zylinder ebenso leicht berechnen; sie beträgt $C_{12} = 630$ pF/Phase bzw. 90 pF/Spule. Die direkte Erdkapazität der OS-Wicklung (gegenüber Kasten und Joch) ist wegen der bedeutend grösseren Abstände viel kleiner und beträgt ca. $C_{11} = 80$ pF pro Phase.

Die wirksamen Seriekapazitäten der beiden Wicklungen sind etwas schwieriger zu bestimmen, wir haben die folgenden Werte berechnet:

OS: 205 pF/Spule entsprechend C_{s1}=29,3 pF/Phase
US: 166 pF/Spule entsprechend C_{s2}=23,7 pF/Phase

Die auf die Sekundärseite (US) bezogene totale Streuinduktivität berechnet sich auf übliche Weise zu

$$\lambda = 46{,}5 \text{ mH/Phase.}$$

Für die Berechnung der totalen Induktivität (Hauptfeld), bezogen auf die Primärseite (OS), müssen wir berücksichtigen, dass wegen der Gleichphasigkeit der Vorgänge in allen 3 Säulen der Rückschluss des Flusses durch die Luft erfolgt. Wir können diese Induktivität als solche einer Spule mit Stabkern berechnen, wobei wir zur Berücksichtigung des Einflusses der Joche annehmen, die Länge des Stabkernes sei um den doppelten Kerndurchmesser länger als die Wicklung. Die Berechnung nach Küchler [4]) ergibt den Wert

$$L_1 = 2{,}56 \text{ H}$$

Diese Induktivität ist, wie die Rechnung zeigt, dank der Wirkung des Eisenkerns praktisch auch gleich der auf die Primärseite übersetzten Hauptfeldinduktivität der Sekundärseite, somit also $L_1 \approx L'_2$.

Damit sind die wesentlichen Grössen bestimmt, aus denen sich die interessierenden Vorgänge im Transformator berechnen lassen; es soll aber hier schon darauf hingewiesen werden, dass natürlich diese Grundgrössen im allgemeinen nicht ohne weiteres verwendbar sind, sondern dass gewisse Beziehungen und Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der bei den Schwingungszuständen in der Wicklung vorhandenen Spannungsverteilung beachtet werden müssen [5]).

2. *Die übertragene Spannung bei primär geerdetem Sternpunkt*

Den *kapazitiv* übertragenen Anfangswert *a)* der sekundärseitigen Spannung können wir aus der Anfangsspannungsverteilung [6]) zu 26 % der primären Stoßspannung für die Schaltung Stern/Stern und 5 % für die Schaltung Stern/Gegenstern berechnen.

Die *übersetzte* eigentliche *Stoßspannung b)* folgt dem Verlauf der primär aufgedrückten Stoßspannung mit dem Uebersetzungsfaktor $K \cdot ü$, wo $ü = 0{,}5$ ist und der Kopplungsfaktor K sich folgendermassen berechnet:

$$K = \frac{L_{12}}{L_1} = \frac{L_1 - \frac{1}{2}\frac{\lambda}{ü^2}}{L_1} = 0{,}96 \qquad (1)$$

Der übersetzte Stoss ist somit gleich dem auf das $0{,}96 \times 0{,}5 = 0{,}48$-fache reduzierten primär aufgedrückten Stossverlauf.

Die *Frequenz der Eigenschwingung der Sekundärwicklung d)* ist bestimmt durch die Grössen

$$\lambda' = 0{,}516\ \lambda = 24 \text{ m H}^{7)} \text{ und} \qquad (2)$$

$$C' = \frac{2}{\pi}(C_2 + C_{12}) + \frac{\pi}{2} C_{s2} = 915 \text{ pF}^{8)} \qquad (3)$$

Die Schwingungsdauer T wird daraus

$$T = 2\pi\sqrt{\lambda' C'} = \underline{29{,}5\ \mu s} \qquad (4)$$

Mit dieser Schwingungsdauer schwingt daher die Sekundärspannung vom kapazitiven Anfangswert *a)* in den übertragenen Stosswert *b)* ein, und es soll im folgenden für diesen Einschwingvorgang noch die *Dämpfung* berechnet werden. Hiefür sind die Widerstände in den Primär- und Sekundärwicklungen massgebend (es fliesst ja nicht nur ein Strom in der Sekundärwicklung, sondern ebenso ein kompensierender Strom in der Primärwicklung), während die Eisenverluste nicht von Bedeutung sind. Bei der Berechnung der Widerstände muss in Anbetracht der hohen Frequenz von 33900 Hz dem starken Einfluss der Widerstandszunahme durch die Stromverdrängung Rechnung getragen werden (zusätzliche Kupferverluste). Die Berechnung nach Richter, Elektr. Maschinen, Bd. 1, Kap. II, L 2 und 5 ergab folgende Widerstandswerte [9]).

Widerstand der Primärwicklung übersetzt auf Sekundärseite:

$$r'_p = 805\ \Omega$$

Widerstand der Sekundärseite $r_s = 395\ \Omega$
Daraus wird die Zeitkonstante der Dämpfung

[4]) Küchler, Jahrbuch der AEG-Forschung, Bd. 6 (1939), S. 118.

[5]) Da bei den Schwingungsvorgängen längs der Wicklung Spannungsknoten und Spannungsbäuche mit den entsprechenden Strombäuchen und Stromknoten auftreten, so ist leicht einzusehen, dass die pro Längeneinheit der Wicklung vorhandene Induktivität und Kapazität nicht überall den gleichen Einfluss ausübt und voll wirksam ist. Frühauf hat im Bericht Nr. 28 des Congrès International d'Electricité 1932 unter bestimmten Annahmen für den Flussverlauf die auftretenden Schwingungsfrequenzen berechnet. Seine Resultate liefern für die Grundschwingung recht brauchbare Ergebnisse. Daraus lassen sich die Ersatzgrössen eines Serieschwingungskreises berechnen, wenn man die weiterhin noch nötige Beziehung berücksichtigt, dass für den Ersatzkreis und die schwingende Wicklung der Schwingungswiderstand gleich sein soll, damit auch die Dämpfungen im Ersatzkreis richtig berechnet werden können.

[6]) Vgl. hierüber u. a. Brown Boveri Mitt. 1943, Heft 9/10, S. 275.

[7]) Die Faktoren $\frac{16}{\pi^3} = 0{,}516$, $\frac{2}{\pi}$ und $\frac{\pi}{2}$ in dieser und den folgenden Gleichungen, sowie ihre Verknüpfung mit den angegebenen Grössen berücksichtigen nach der Fussnote [5]) die Art der bei den Schwingungsvorgängen in der Wicklung vorhandenen Spannungsverteilung.

[8]) Da die Potentiale der OS-Wicklung in bezug auf die Streufeldschwingung festliegen, kommt hier die Summe der Kapazitäten von OS- zu US- und von US-Wicklung gegen Erde zur Wirkung.

[9]) Hiebei ist der Gültigkeitsbereich der jeweiligen Formeln zu beachten.

$$T_D = \frac{2\,\lambda'}{r'_p + r_s} = \frac{48 \cdot 10^{-3}}{1200}\,\mathrm{s} = 40\,\mu\mathrm{s} \qquad (5)$$

und das *Verhältnis der Amplituden aufeinanderfolgender Halbwellen* ergibt sich zu

$$v = \varepsilon^{-\frac{14{,}75}{40}} = 0{,}69. \qquad (6)$$

Damit sind nun alle Bestimmungsgrössen berechnet und es kann der sekundärseitige Spannungsverlauf aufgezeichnet werden. Fig. 5 zeigt für die Schaltungen Stern/Stern und Stern/Gegenstern die berechneten sekundärseitigen Spannungen und zum Vergleich auch die aus den Oszillogrammen entnommenen gemessenen Kurven. Man erkennt bei der Schaltung Stern/Gegenstern eine sehr gute Uebereinstimmung; bei der Schaltung Stern/Stern hingegen sind grössere Abweichungen vorhanden. Der Grund hiefür ist darin zu suchen, dass wir nur die *Grundschwingung* berechnet und Oberwellen

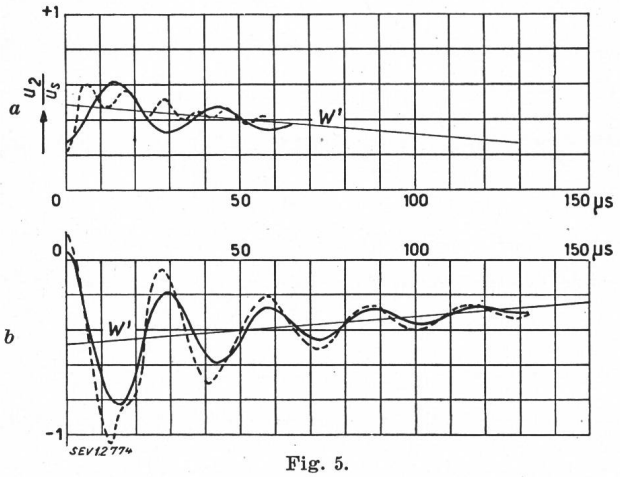


Fig. 5.
Berechneter und gemessener Verlauf der sekundärseitigen Ueberspannung u_2 bei dreipoligem Stoss und beidseitig geerdetem Sternpunkt

a Schaltung Stern/Stern
b Schaltung Stern/Gegenstern
gestrichelt: gemessener Verlauf
ausgezogen: berechneter Verlauf
W': Schwingungsmittellage

vernachlässigt haben. In der Schaltung Stern/Stern wird nun aber eine starke räumliche 3. Oberwelle angestossen, da die Strombäuche für die Grundschwingungen der Primär- und Sekundärwicklung längs der Säule gegeneinander verschoben sind (vgl. später) [10]). Dass dies so ist, erkennt man gut aus der Betrachtung der Oszillogramme Fig. 1, indem für den Spannungsverlauf *2'* in der Nähe des Spannungsknotens der 3. Oberwelle deutlich die langsamere Grundschwingung zum Ausdruck kommt.

3. Die übertragene Spannung bei primär isoliertem Sternpunkt und Schaltungen Stern/Stern oder Stern/Gegenstern

Für die *kapazitiv* übertragenen Anfangswerte können die gleichen Grössen angenommen werden wie im vorhergehenden Abschnitt, da die Anfangsspannungsverteilung von der Erdung des primären Sternpunktes praktisch kaum beeinflusst wird; zusätzlich setzen wir das Anfangspotential des isolierten primären Sternpunktes zu 6 % der Klemmenspannung an.

Als weitere Komponenten im Uebertragungsvorgang treten nun noch die Hauptfeldschwingung und die Streufeldschwingung auf, die in Tabelle II angegeben sind. Die der äussersten rechten Kolonne dieser Aufstellung zu Grunde liegende spezielle Voraussetzung ist für den vorliegenden Fall nicht erfüllt, und es sind die Angaben der zweitäussersten Kolonne zu berücksichtigen.

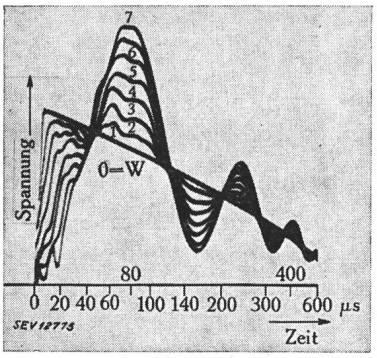


Fig. 6.
Oszillogramm der Spannungen in der Primärwicklung bei dreipoligem Stoss und Schaltung Stern/Stern
Bezeichnungen wie in Fig. 3

Bei der Berechnung der *Schwingungsfrequenzen* müssen wir hier nun dem Umstand Rechnung tragen, dass in *beiden* Wicklungen Schwingspannungen auftreten. Weil aber die Kapazität der OS-Wicklung vorwiegend zwischen OS- und US-Wicklung gelegen ist, ist diese Kapazität je nach Schaltung der US-Wicklung an einer anderen Spannung und wirkt in verschiedenem Ausmasse. Die Frequenzen werden daher nun verschieden ausfallen, je nachdem der Transformator Stern/Stern oder Stern/Gegenstern geschaltet ist. Der Vergleich der Fig. 6 und 3 Mitte zeigt dies übrigens augenfällig.

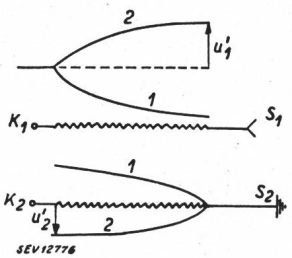


Fig. 7.
Spannungsverteilung für die Hauptfeldschwingung und Schaltung Stern/Stern
K_1, S_1 Klemme bzw. Sternpunkt der Primärwicklung.
K_2, S_2 Klemme bzw. Sternpunkt der Sekundärwicklung.

Für die Schaltung Stern/Stern haben wir die Spannungsverhältnisse für die *Hauptfeldschwingung* in Fig. 7 skizziert. Da hier das Potential desjenigen Teiles der Sekundärwicklung, der dem Schwingungsbauch der Primärwicklung gegenüberliegt, annähernd auf Erdpotential bleibt, braucht in diesem Fall für die gegenseitige Kapazität keine zusätzliche Korrektur eingeführt zu werden. Es sind somit die wirksamen Induktivitäten und Kapazitäten:

$$\begin{cases} L' = 0{,}516\ L_1 = 1{,}32\ \mathrm{H}\ ^{11)} \\ C' = \dfrac{2}{\pi}(C_{11} + C_{12} + C_2 \cdot \ddot{u}^2) + \dfrac{\pi}{2}\,C_{s1} = 616\ \mathrm{pF} \end{cases} \qquad (7)$$

[10]) Man beachte, dass die Frequenzen der Oberwellen wegen der Kopplungen *nicht* harmonisch liegen; s. auch Fussnote [14]), S. 425.

[11]) Vgl. Fussnote [7]).

woraus sich die Schwingungsdauer berechnet:

$$T_H = 2\pi\sqrt{L'\,C'} = \underline{179\ \mu s} \qquad (8)$$

Für die Schaltung Stern/Gegenstern zeigt Fig. 8 die Spannungsverhältnisse bei der Hauptfeldschwingung: An der Kapazität C_{12} liegt hier nur die Spannung

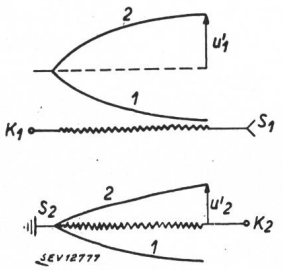


Fig. 8.
Spannungsverteilung für die Hauptfeldschwingung und Schaltung Stern/Gegenstern
K_1, S_1 Klemme bzw. Sternpunkt der Primärwicklung.
K_2, S_2 Klemme bzw. Sternpunkt der Sekundärwicklung.

$$u_1' - u_2' = u_1'\,(1 - \ddot{u}) = 0{,}5\,u_1',$$

sodass der wirksame Anteil dieser Kapazität sich im gleichen Masse verringert:

$$C_{1w} = (1 - \ddot{u})\,C_{12}$$

Es ist daher

$$C' = \frac{2}{\pi}\,(C_{11} + C_{1w} + C_{2w}\cdot\ddot{u}^2) + \frac{\pi}{2}\,C_{s1} \qquad (9)$$

Von der übersetzten Kapazität C_2 ist hierin nur ein Teil C_{2w} wirksam, weil in der Sekundärwicklung die durch die Kapazitäten C_{12} und C_2 zur OS-Wicklung bzw. Erde fliessenden Ströme sich teilweise aufheben. Aus diesen Ueberlegungen ergibt sich für die in diesem Falle wirksame sekundärseitige Kapazität

$$C_{2w} = C_2 - C_{12}\left(\frac{1-\ddot{u}}{\ddot{u}}\right) \qquad (10)$$

Damit wird $C' = 316$ pF und die Schwingungsdauer für die Hauptfeldschwingung bei der Schaltung Stern/Gegenstern

$$T_H = \underline{128\ \mu s.} \qquad (11)$$

Ganz ähnliche Ueberlegungen sind auch der Berechnung der Schwingungsdauern der *Streufeldschwingungen* zu Grunde zu legen. Im Prinzip ist hier nach der Tabelle II, zweitäusserste Kolonne rechts, die Serieschaltung von primärseitiger und sekundärseitiger Kapazität massgebend; da aber die Kapazitäten wieder zusammenhängend sind, muss man zuerst die Spannungsaufteilung ausrechnen, wobei zu beachten ist, dass die Schwingströme für die Streufeldschwingungen in beiden Wicklungen in entgegengesetzter Richtung fliessen. Man erhält nach Fig. 9 für die *Schaltung Stern/Stern* aus den Gleichungen für die Kapazitätsströme und für die Kompensation der Amperewindungen das Verhältnis der beidseitigen Schwingungsspannungen zu

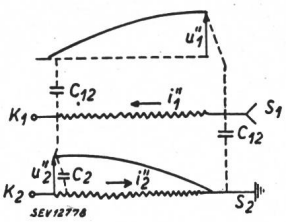


Fig. 9.
Spannungsverteilung für die Streufeldschwingung und Schaltung Stern/Stern

$$\delta = \frac{u_2''}{u_1''} = \frac{C_{12} + \frac{\pi^2}{4}\,C_{s1} + C_{11}}{\ddot{u}\left(C_2 + C_{12} + \frac{\pi^2}{4}\,C_{s2}\right)} \qquad (12)$$

Danach ist das Verhältnis der auf die Sekundärseite reduzierten Schwingungsspannungen

$$\frac{u_2''}{u_{1\,red}''} = \frac{\delta}{\ddot{u}} \qquad (13)$$

Aus dem reduzierten Spannungsverhältnis ergibt sich die in der prinzipiellen Serieschaltung der beidseitigen reduzierten Kapazitäten einzuführende Kapazität der Primärseite

$$C_1'' = \frac{\delta}{\ddot{u}}\left(C_2 + C_{12} + \frac{\pi^2}{4}\,C_{s2}\right)\cdot\frac{2}{\pi} \qquad (14)$$

und die in die Gleichung für die Schwingungsdauer einzusetzende resultierende und auf die Sekundärseite bezogene Kapazität

$$C_{res} = \frac{2}{\pi}\,\frac{\delta}{\delta + \ddot{u}}\left(C_2 + C_{12} + \frac{\pi^2}{4}\,C_{s2}\right) \qquad (15)$$

In unserem Falle wird $\delta = 1{,}09$, $C_{res} = 627$ pF und die Schwingungsdauer

$$T = 2\,\pi\sqrt{\lambda'\cdot C_{res}} = \underline{24{,}5\ \mu s} \qquad (16)$$

Für die *Schaltung Stern/Gegenstern* sind an Hand der Fig. 10 die entsprechenden Beziehungen abzuleiten und es ergibt sich:

$$\delta = \frac{u_2''}{u_1''} = \frac{C_{11} + \frac{\pi^2}{4}\,C_{s1} + (1-\ddot{u})\,C_{12}}{\ddot{u}\left(C_2 + \frac{\pi^2}{4}\,C_{s2}\right) - (1-\ddot{u})\,C_{12}} \qquad (17)$$

Wegen der gegenseitigen Kopplung von u_2'' und u_1'' über C_{12} müssen wir hier aus den entsprechenden Grössen u_2'', u_1'' und i_2'', i_1'' die in die Frequenzberechnung einzuführenden Ersatzkapazitäten $\overline{C}_1$ und $\overline{C}_2$ ausrechnen. Es wird:

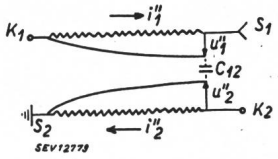


Fig. 10.
Spannungsverlauf für die Streufeldschwingung und Schaltung Stern/Gegenstern

$$\overline{C}_2 = \frac{2}{\pi}\left[C_2 + \frac{\pi^2}{4}\,C_{s2} + C_{12}\,\frac{1+\delta}{\delta}\right] \qquad (18)$$

$$\overline{C}_1 = \frac{2}{\pi}\left[C_{11} + \frac{\pi^2}{4}\,C_{s1} + C_{12}\,(1+\delta)\right]$$

und daraus

$$C_{res} = \frac{\overline{C}_2 \quad \frac{\overline{C}_1}{\ddot{u}^2}}{\overline{C}_2 + \frac{\overline{C}_1}{\ddot{u}^2}}; \quad T = 2\pi\sqrt{\lambda' C_{res}}. \qquad (19)$$

In unserem konkreten Falle ergeben sich folgende Werte

$\delta = 5{,}23$; $\overline{C}_1 = 2600$ pF, $\overline{C}_2 = 990$ pF; $C_{res} = 904$ pF

$$T = \underline{29\ \mu s}$$

Die *Amplituden* der Schwingungen berechnen sich aus den Bedingungen, dass die Summe ihrer jeweils auf die entsprechende Wicklung bezogenen Werte den kapazitiven Anfangswerten entspricht. Dabei ist zu beachten, dass die Amplituden u_1' und u_2' der Hauptfeldschwingungen sich gemäss dem Uebersetzungsverhältnis $\ddot{u}$ übertragen, hingegen diejenigen der Streufeldschwingungen u_1'' und u_2'' entsprechend den in Gleichungen (12) und (17) berechneten Verhältnissen δ. Wird mit u_s der Scheitelwert der primärseitig aufgedrückten Stoßspannung bezeichnet, so sollen die kapazitiven Anfangswerte in der Primärwicklung mit $\alpha_1\ u_s$ und in der Sekundärwicklung mit $\alpha_2\ u_s$ eingeführt werden. Da die Schwingungen in der Primärwicklung um die Endlage u_s erfolgen, so ist die resultierende primärseitige Anfangsamplitude der Schwingungen

$$(1-\alpha_1) \cdot u_s = \beta\, u_s.$$

Damit gelten unter Berücksichtigung der Vorzeichen entsprechend Fig. 7 und 9 bzw. 8 und 10 die Gleichungen

$$\begin{cases} u_1' + u_1'' = \beta u_s & (20) \\ -u_2' + u_2'' = \alpha_2 u_s & (\beta \text{ somit negativ}) \end{cases}$$

für die Schaltung Stern/Stern oder

$$\begin{cases} u_1' - u_1'' = \beta u_s \\ u_2' + u_2'' = \alpha_2 u_s \end{cases} \qquad (21)$$

für die Schaltung Stern/Gegenstern.

Hieraus ergeben sich die Amplituden der beiden Schwingungen für die Schaltung Stern/Stern zu

$$\frac{u_1'}{u_s} = \frac{\beta\delta - \alpha_2}{\ddot{u} + \delta}; \quad \frac{u_1''}{u_s} = \frac{\ddot{u}\beta + \alpha_2}{\ddot{u} + \delta}, \qquad (22)$$

und

$$\frac{u_1'}{u_s} = \frac{\beta\delta + \alpha_2}{\ddot{u} + \delta}; \quad \frac{u_1''}{u_s} = \frac{\alpha_2 - \ddot{u}\beta}{\ddot{u} + \delta} \qquad (23)$$

für die Schaltung Stern/Gegenstern.

Für den hier untersuchten Transformator finden sich die ausgerechneten Schwingungsamplituden in Tabelle III.

Tabelle III

Schaltung	Hauptfeldschwingung primär $\frac{u_1'}{u_s}$	Hauptfeldschwingung sekundär $\frac{u_2'}{u_s}$	Streufeldschwingung primär $\frac{u_1''}{u_s}$	Streufeldschwingung sekundär $\frac{u_2''}{u_s}$
Stern/Stern . .	— 0,808	— 0,404	— 0,132	— 0,144
Stern/Gegenstern	— 0,848	— 0,424	+ 0,092	+ 0,474

Für die *Dämpfung* der *Streufeldschwingungen* kann man die im vorhergehenden Abschnitt 2 erhaltenen Werte mit ausreichender Genauigkeit übernehmen, da die Frequenzen nur wenig verschieden sind, und somit die zu berücksichtigenden Widerstände und die massgebende Induktivität praktisch die gleichen sind. Die Berechnung der *Dämpfung der Hauptfeldschwingungen* kann ganz analog erfolgen wie diejenige für die Streufeldschwingungen, nur muss hier noch der dämpfende Einfluss der Eisenverluste berücksichtigt werden. Dabei kann wegen der hohen Frequenz allein auf die Wirbelstromverluste abgestellt werden, welche unter Berücksichtigung der Flussverdrängung zu berechnen sind. Man geht hiebei so vor, dass man für eine bestimmte Schwingungsspannung die mittlere Sättigung des Eisens berechnet und hieraus die Wirbelstromverluste [12]). Diese sind dann zur Berechnung der Dämpfung in einen äquivalenten Widerstand folgendermassen umzurechnen: Der angenommenen Schwingspannung entspricht ein Strom von der Grösse: Spannung dividiert durch Schwingungswiderstand:

$$i = \frac{u}{\sqrt{\frac{L'}{C'}}}$$

der im Ersatzwiderstand R_{Fe} die berechneten Verluste V_{Fe} erzeugen soll. Es ist daher

$$R_{Fe} = \frac{V_{Fe}}{i^2} = \frac{V_{Fe}}{u^2}\left(\frac{L'}{C'}\right) \qquad (24)$$

(Die Abhängigkeit von u^2 ist nur eine scheinbare, da, abgesehen von einer Veränderung der Grösse der Flussverdrängung zufolge veränderter Permeabilität, die Wirbelstromverluste ebenfalls proportional u^2 sind.)

Im vorliegenden Fall haben wir für die Hauptfeldschwingung der Schaltung Stern/Gegenstern ($T_H = 128\ \mu s$, $f = 7800$ Hz) einen den Eisenverlusten entsprechenden und auf die Primärseite bezogenen Dämpfungswiderstand von

$$R_{Fe} = 5800\ \Omega \text{ berechnet.}$$

Hiezu kommen die den Leiterverlusten entsprechenden Widerstände, welche sich zu 1180 Ω [13]) ergaben, so dass der totale Dämpfungswiderstand

$$R = 6980\ \Omega \text{ wird.}$$

Damit ergibt sich ein Verhältnis aufeinanderfolgender Halbwellen von

$$v = \varepsilon^{-\frac{R}{2L'} \cdot \frac{T_H}{2}} = \underline{0{,}84}.$$

[12]) Berechnung z. B. nach Richter, Elektr. Masch., Bd. 1, S. 156; man beachte, dass in den Formeln 210 der Faktor 10^{-16} fehlt!

[13]) Hier ist zu berücksichtigen, dass für die Hauptfeldschwingung die Ströme in beiden Wicklungen gleichphasig sind, daher die zusätzlichen Kupferverluste nicht entsprechend dem üblichen Streufeld zu berechnen sind, sondern grösser werden.

Auf Grund der hier berechneten Grössen können nun die Spannungsverläufe auf der Primär- und Sekundärseite aufgezeichnet werden. In Fig. 11 sind die berechneten und die gemessenen Spannungsverläufe eingezeichnet. Wie man daraus entnehmen

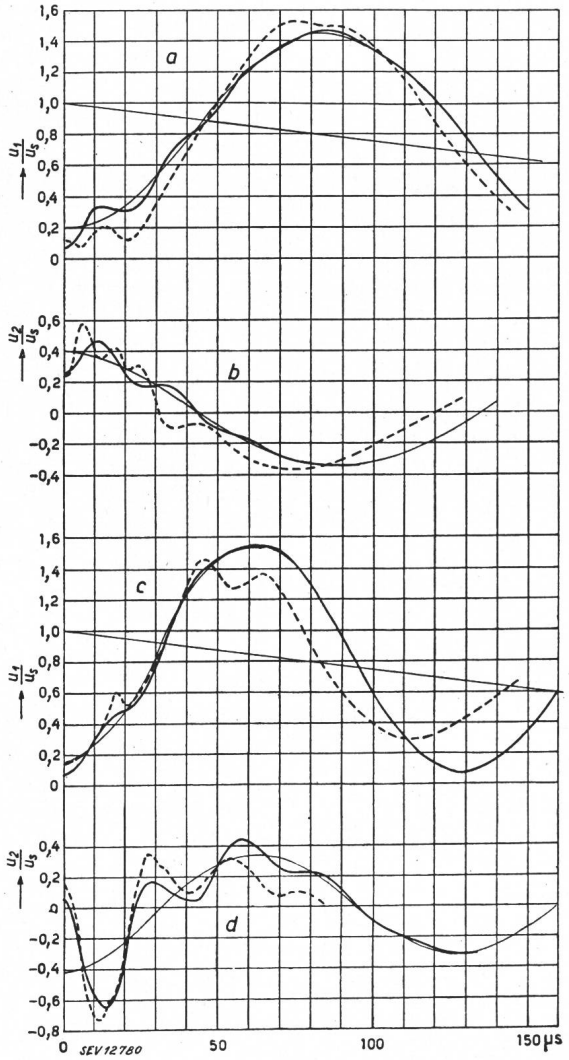


Fig. 11.

Berechneter und gemessener Verlauf der Spannungen u_1 am primärseitigen Sternpunkt u_2 und an der sekundärseitigen Klemme bei dreipoligem Stoss und isoliertem primärseitigem Sternpunkt

a, c Spannung des primärseitigen Sternpunktes bei Schaltung Stern/Stern, bzw. Stern/Gegenstern
b, d Spannung der sekundärseitigen Klemme bei Schaltung Stern/Stern, bzw. Stern/Gegenstern
gestrichelt: gemessener Verlauf
ausgezogen: berechneter Verlauf

kann, ist die Uebereinstimmung im allgemeinen in Anbetracht der komplizierten Verhältnisse befriedigend. Besonders die Frequenzen stimmen recht gut; einzig in der sekundären Spannung bei der Schaltung Stern/Stern, wo das freie US-Wicklungsende unmittelbar dem gestossenen Primärwicklungsende gegenüberliegt, überwiegt wieder die 3. räumliche Oberwelle, wie wir es schon für die Schaltung Stern/Stern mit primär geerdetem Sternpunkt gesehen haben. (Wie die Fig. 9 zeigt, liegen hier für die Grundwelle der Streufeldschwingung die Strombäuche an verschiedenen Enden der Säule, weshalb zum Ausgleich der Amperewindungen eine starke räumliche 3. Oberwelle, welche in dieser Beziehung wie eine Schubwicklung wirkt, erforderlich ist) [14]. Die berechnete Dämpfung für die Streufeldschwingung stimmt hier ebenso wie früher bei der Schaltung Stern/Gegenstern mit primär geerdetem Sternpunkt recht gut; hingegen ist die berechnete Dämpfung der Hauptfeldschwingung etwas zu klein, und es sind in Wirklichkeit noch grössere Eisenverluste vorhanden als nur die von uns berechneten. Dies ist gut erklärlich, da ja der Eisenweg für die Schwingungen nicht geschlossen ist und der Fluss an den Säulenenden und Jochen zum Teil quer zum Blech austreten muss, was in Anbetracht der hohen Frequenzen zu grösseren zusätzlichen Verlusten führt. Beim Vergleich der gemessenen und berechneten Spannungsverläufe für die Fälle mit primär isoliertem Sternpunkt ist ferner zu beachten, dass die Spannungen sich als Superposition zweier Schwingungen aufbauen und ihr charakteristischer Verlauf daher sehr empfindlich ist auf die gegenseitigen Amplitudenverhältnisse. Hierin liegen die

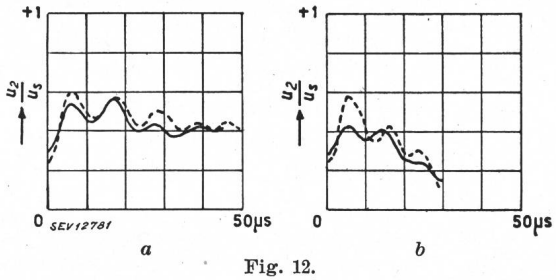


Fig. 12.

Vergleich der mit Berücksichtigung der 3. Oberwelle berechneten (ausgezogen) sekundären Spannungsverläufe mit den gemessenen (gestrichelt) Werten für die Schaltungen Stern/Stern mit primärseitig geerdetem und isoliertem Sternpunkt

grössten Abweichungen von Rechnung und Messung, was aber nicht verwunderlich ist, da, wie wir gezeigt haben, die Berechnung dieser Verhältnisse auf sehr vielen einzelnen Ueberlegungen aufbauen muss. Ferner ist das Verhältnis der Amplituden beider Schwingungen in starkem Masse abhängig von den Anfangsbedingungen, und da wir hierin schon Abweichungen von Rechnung und Messung haben, sind solche im Resultat unvermeidlich.

Zusammenfassend darf immerhin behauptet werden, dass in Anbetracht der schwierig zu erfassenden Vorgänge das Resultat unserer Berechnungen recht befriedigend ist. Vor allem aber haben die theoretischen Betrachtungen, die zu den Berechnungen führten, einen recht guten Einblick in die Vorgänge geboten, so dass man das Wesentliche im Verhalten des Transformators bei Stossvorgängen richtig erkennt. Es hat sich auch gezeigt, dass man mit einigen nur grob verallgemeinerten Ersatzschemata nicht auskommt, sondern dass der im Transformator vorhandenen gegenseitigen Verknüp-

[14]) Ergänzen wir die Berechnung, indem für die Schaltungen Stern/Stern mit primär geerdetem und isoliertem Sternpunkt die dritte Oberschwingung einbezogen wird, so erhalten wir an Stelle der sekundären Spannungen nach Fig. 5a und 11b die Spannungsverläufe nach Fig. 12a und 12b. Wie man sieht, besteht nun auch für diese Fälle eine gute Uebereinstimmung zwischen berechnetem (ausgezogen) und gemessenem (gestrichelt) Spannungsverlauf.

fung der massgebenden Grössen unbedingt Rechnung getragen werden muss.

IV. Zusammenfassung und Folgerungen

Die Uebertragung von Stossvorgängen im Transformator erfolgt durch folgende 4 Komponenten, welche je nach Schaltung entweder alle oder nur vereinzelt auftreten: Vorerst tritt immer die kapazitive Komponente in Erscheinung, denn wie in der gestossenen Primärwicklung kommt auch in der Sekundärwicklung beim Stoss eine kapazitive Anfangsspannungsverteilung zustande. Diese kapazitive Spannung ist identisch mit dem Anfangswert der darauf folgenden elektromagnetischen Ausgleichsvorgänge. Als weitere Komponente ist ein induktiv übertragener Stoss zu betrachten, und zuletzt sind noch die beiden Eigenschwingungen des gekoppelten Systemes der beiden Wicklungen zu berücksichtigen, wobei hier nur die Grundwellen in Betracht gezogen werden. Durch die beiden letzten Komponenten (Eigenschwingungen) vollzieht sich der Uebergang von der kapazitiven Anfangsspannungsverteilung in die Endverteilung, die entweder gleich dem induktiv übertragenen Stoss, wenn dieser wegen der Schaltung überhaupt auftreten kann, oder dann gleich dem stationären Ruhezustand ist. Je nach Schaltung der beiden Wicklungen und der Art des Stosses treten nun alle oder nur einzelne dieser Komponenten in verschiedenem Ausmasse auf und bestimmen die Grösse der auf der Sekundärseite auftretenden höchsten Spannung. Hiebei kommt den magnetisch übertragenen Komponenten gegenüber der kapazitiven Komponente das grössere Gewicht zu, da sie energiereicher sind und durch die sekundärseitig angeschlossene Anlage- und Kabelkapazität nur unwesentlich reduziert werden.

Es hat sich auch gezeigt, dass man mit der Theorie das Verhalten des Transformators recht gut erfassen kann, dass aber hiebei der gegenseitigen Verknüpfung aller Grössen im Transformator sehr sorgfältig Rechnung getragen werden muss und man sich nicht nur auf einzelne grob vereinfachte Ersatzschemata stützen kann.

Aus den Messungen und theoretischen Betrachtungen können folgende Schlüsse gezogen werden:

a) Es findet im Transformator eine Uebertragung von Ueberspannungen statt, welche durch das Zusammenwirken verschiedener Komponenten zustande kommt und von der Schaltung des Transformators und der Art und Form der primären Ueberspannung abhängt.

b) Am ungünstigsten ist das Verhalten der Schaltungen Stern/Gegenstern mit primär geerdetem oder isoliertem Sternpunkt, besonders im Leerlauf.

c) Wenn von diesen ungünstigsten Schaltungen abgesehen wird, so überschreitet die sekundäre Spannung gegen Erde und zwischen Phasen die nach der stationären Uebersetzung umgerechnete Spannungshöhe im allgemeinen nicht wesentlich, und bei den günstigsten Schaltungen Stern/Dreieck und Dreieck/Stern liegt sie bei belasteter Sekundärwicklung unterhalb der nach der Uebersetzung umgerechneten Ueberspannungswerte.

d) Für die Transformatoren selber sind die übertragenen Ueberspannungen praktisch nicht gefährlich.

e) Für auf der Unterspannungsseite angeschlossene Maschinen und Apparate ist bei der genannten günstigen Schaltung Stern/Dreieck und bei auf der OS-Seite vorhandenen Ableitern ein genügender Schutz vorhanden, weil die übertragene Ueberspannung kleiner ist als entsprechend der Uebersetzung und weil die Ableiter höherer Nennspannung im Verhältnis zur Nennspannung tiefere Schutzwerte aufweisen.

f) Die höheren Werte der US-seitigen Spannungen kommen durch Ueberlagerung von Schwingungen zustande, so dass sie flacher sind als übliche Stosswellen und somit auf Steilheit des Spannungsanstieges empfindliche Apparate und Maschinen weniger hoch beanspruchen.

g) Bei Stern/Stern-Schaltung und kapazitiver Belastung (Kabel) wäre es nur mit Rücksicht auf die Uebertragung von Ueberspannungen besser, eine event. Erdung des Netzsternpunktes der US-Seite nach Möglichkeit *nicht* an solchen Transformatoren vorzunehmen, welche auf der OS-Seite an Freileitungsnetze angeschlossen sind, weil dann wegen der kapazitiven Spannungsteilung zwischen Kabel- und Transformatorenkapazität das Netz gegen Erde weniger hoch beansprucht würde; praktisch sind jedoch im allgemeinen in dieser Frage noch andere Gesichtspunkte entscheidend.

h) Im Prinzip steht einer zusätzlichen Verwendung von Ableitern auf der US-Seite nichts entgegen, doch ist diese bei den günstigsten Transformatorenschaltungen unseres Erachtens nicht notwendig, sofern die US-Seite nicht selber atmosphärischen Ueberspannungen ausgesetzt ist.

i) Beim Auftreten von Ueberspannungsstörungen auf der US-Seite, für die als Ursache von der OS-Seite übertragene Ueberspannungen vermutet werden, ist eine besonders eingehende Untersuchung zu empfehlen, weil auch noch andere Vorgänge als Ursache in Frage kommen. So sind uns keine Störungen bekannt, die auf übertragene Ueberspannungen zurückzuführen sind, hingegen deren einige mit anderen Ursachen, z. B. kapazitiver Uebertragung von 50periodiger Erdschlussverlagerungsspannung oder Kipperscheinungen zufolge Ferroresonanz mit Erdungsdrosselspulen. Solche Arten von Ueberspannungen sind natürlich mit Ableitern nicht zu beheben und erheischen andere Massnahmen.

Adresse des Autors:
Dr. *H. Meyer*, Ingenieur der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden.