Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 18 (1927)

Heft: 3

Artikel: Ueber den Parallelbetrieb von Transformatoren mit ungleicher Kurzschlusspannung

Autor: Aemmer, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060443

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: 05.12.2025

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

Ueber den Parallelbetrieb von Transformatoren mit ungleicher Kurzschlusspannung [1]).

Von *F. Aemmer*, Ingenieur, Baden.

621.314(0064)

Für einen vollkommenen Parallelbetrieb von Transformatoren ist es nötig, dass die Sekundärspannungen bei jeder Belastung, sowohl der Grösse, als auch der Richtung nach, gleich sind. Diese Bedingung kann aber nur erfüllt werden, wenn bei den Transformatoren, ausser der Schaltungsart und dem Uebersetzungsverhältnis, auch der ohmsche und der induktive Spannungsabfall gleich sind. Bei der Fabrikation von Transformatoren in Serien können aber alle diese Bedingungen gleichzeitig nicht einmal für die Transformatoren verschiedener Leistung einer Firma, geschweige denn für Transformatoren verschiedener Firmen eingehalten werden. In der Praxis begnügt man sich in der Regel mit der Forderung gleicher Kurzschlusspannungen, was durch Einschalten von Drosselspulen erreicht werden kann. Der Autor zeigt nun, dass es in vielen Fällen, insbesondere bei kleinen Leistungen, genügt, wenn die Lastverteilung bei einer Belastung richtig ist. Diese Bedingung lässt sich nur durch Veränderung des Uebersetzungsverhältnisses, also ohne Drosselspule, einhalten.

Le fonctionnement parfait de transformateurs en parallèle exige l'égalité des tensions secondaires (même grandeur et même direction). Cette condition nécessite non seulement des connexions et un rapport de transformation identiques, mais aussi la même chute de tension ohmique et inductive. Une maison qui fabrique en série n'arrivant pas à remplir simultanément ces diverses conditions pour des transformateurs de puissances différentes, il est clair que des transformateurs de provenance diverse y satisferont encore moins. Dans la pratique on se contente généralement d'exiger des tensions de court-circuit égales, ce qu'on peut obtenir à l'aide de bobines de self. L'auteur montre qu'il suffit dans bien des cas, principalement où il s'agit de faibles puissances, que la répartition de la charge soit correcte pour une valeur particulière de cette charge. On y arrive sans le secours d'une bobine de self, en changeant simplement le rapport de transformation.

Es ist bekannt, dass Transformatoren, die sowohl primär- als auch sekundärseitig parallel geschaltet werden, gewissen Bedingungen genügen müssen, damit der Parallelbetrieb bei allen Belastungsverhältnissen einwandfrei ist. Wie unten erläutert, kann ein theoretisch richtiger Parallelbetrieb nur erreicht werden, wenn neben dem Uebersetzungsverhältnis und der Schaltgruppe auch die Kurzschlusspannungen der beiden Transformatoren übereinstimmen. Aber gerade die Einhaltung einer bestimmten Kurzschlusspannung bietet oft Schwierigkeiten und es soll nun im nachfolgenden gezeigt werden, dass sich auch bei Transformatoren mit wesentlich verschiedenen Kurzschlusspannungen ein praktisch einwandfreier Parallelbetrieb erreichen lässt.

Für einen theoretisch richtigen Parallelbetrieb ist in erster Linie zu verlangen, dass sowohl bei Vollast, als auch bei beliebiger Teilbelastung jeder der Transformatoren den seiner maximalen Belastbarkeit entsprechenden Anteil der totalen *Strom-* und *Leistungsbelastung* übernimmt. Ist dies nicht der Fall, so ist der Totalstrom nicht mehr die algebraische Summe der Teilströme, sondern dieselben addieren sich geometrisch. (Fig. 1).

OA sekundäre Klemmenspannung.
OB Strom im Transformator I.
OC Strom im Transformator II.
OD Totaler Belastungsstrom.
S^1 Phasenwinkel im Transformator I.
S^2 Phasenwinkel im Transformator II.

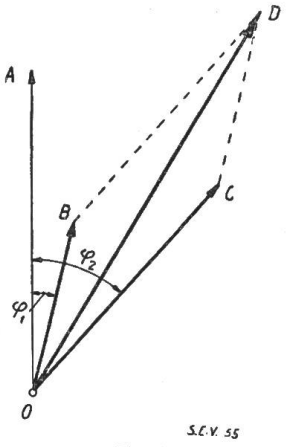

Fig. 1.

Dabei ist jeder dieser Teilströme grösser, als er es bei gleichem Leistungsfaktor aller parallel geschalteten Transformatoren sein müsste, und es findet eine gewisse Vergrösserung der Kupferverluste statt.

Im folgenden sollen die Bedingungen untersucht werden, denen die Transformatoren entsprechen müssen, damit der oben geschilderte ideale Parallelbetrieb

[1]) Siehe auch den Aufsatz über das gleiche Thema von Dr. ing. *E. Wirz* im Bulletin des S. E. V. 1923, No. 1, Seite 25 u. ff. (Die Red.).

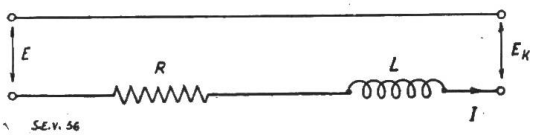

Fig. 2.

erreicht wird. Dabei vernachlässigen wir den Einfluss des Magnetisierungsstromes, sodass sich das Ersatzschema des Transformators zu untenstehender Schaltung vereinfachen lässt. (Fig. 2).

Dabei sind alle Werte auf die Sekundärseite bezogen und es ist:

E'	die primäre Klemmenspannung.
$E = E'\frac{Z_2}{Z_1}$	die auf die Sekundärseite bezogene Primärspannung oder die sekundäre Leerlaufspannung.
E_K	die sekundäre Klemmenspannung.
I	der Sekundärstrom.
R' resp. R''	der Widerstand der Primär- resp. der Sekundärwicklung.
L' resp. L''	die Induktivität der Primär- resp. der Sekundärwicklung.
$\frac{Z_1}{Z_2}$	das Uebersetzungsverhältnis des Transformators.

Der auf die Sekundärseite bezogene Widerstand ist dann:

$$R = R'' + \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 R'$$

und die auf die Sekundärseite bezogene Induktivität:

$$L = L'' + \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 L'.$$

Betrachten wir eine Gruppe von zwei parallel geschalteten Transformatoren (Fig. 3), so ist die Grundbedingung für einen richtigen Parallelbetrieb die vollständige Gleichheit beider Sekundärspannungen bei jeder Belastung, sowohl der Grösse als auch der Richtung nach. Andernfalls müsste ja in dem Stromkreis $A'\ A''\ B''\ B'$ ein Ausgleichsstrom hervorgerufen werden, durch den eine zusätzliche Erwärmung beider Transformatoren erzeugt würde.

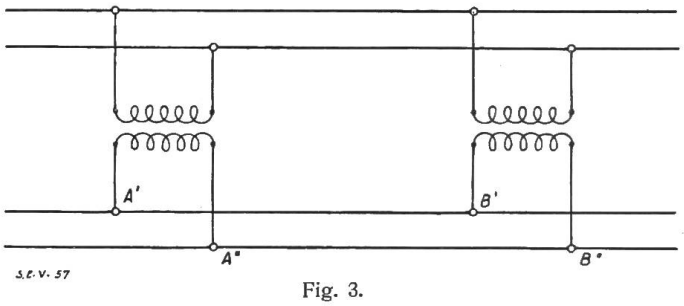

Fig. 3.

Für den Leerlauf werden diese Verhältnisse erreicht durch Uebereinstimmung des Uebersetzungsverhältnisses, sowie der Schaltgruppe aller parallel geschalteten Transformatoren. Ueber die Herleitung des Schaltvektordiagrammes, sowie über seine experimentelle Nachprüfung, wurde an anderer Stelle[2]) früher eingehend berichtet, sodass es sich erübrigt, hier darauf nochmals näher einzugehen.

Bei Belastung hingegen erhält man die Klemmenspannung unter Berücksichtigung des ohmschen sowie des induktiven Spannungsabfalles im Transformator nach untenstehendem Diagramm (Fig. 4).

Darin bedeutet:

$OA = E$ die sekundäre Leerlaufspannung.

BA den ohmschen Spannungsabfall von der Grösse IR, der gleichgerichtet ist mit dem Strom $I = OD$.

CB den induktiven Spannungsabfall.

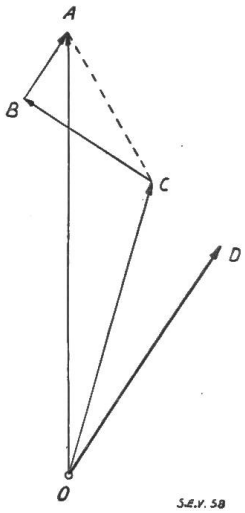

Fig. 4.

[2]) B. B. C.-Mitteilungen, Juli-August 1917.

Der induktive Spannungsabfall CB eilt dem Stromvektor OD um $\frac{\pi}{2}$ voraus und hat die Grössen $I\omega L$, wo $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz der dem Transformator aufgedrückten Spannung ist. Der Vektor CA ist gleich der Summe aus dem ohmschen und dem induktiven Spannungsabfall und stellt somit den totalen Spannungsabfall im Transformator dar. Die sekundäre Klemmenspannung E ist nun gleich der Differenz des totalen Spannungsabfalles CA von der Leerlaufspannung OA und ist somit gleich dem Vektor OC.

Eine Uebereinstimmung der Sekundärspannungen von zwei parallel arbeitenden Transformatoren nach Grösse und nach Richtung ist somit nur möglich, wenn ausser dem Uebersetzungsverhältnis und der Schaltgruppe sowohl der ohmsche als auch der induktive Spannungsabfall bei beiden Transformatoren gleich sind.

Wir haben nun gesehen, was für Forderungen vom Konstrukteur erfüllt werden müssten, wenn an diesen die Aufgabe herantritt, zu einem bereits bestehenden Transformator einen ebensolchen für Parallelbetrieb zu entwerfen. Die Einhaltung des genauen Uebersetzungsverhältnisses, sowie bei Dreiphasen-Transformatoren der Schaltgruppe, werden keine Schwierigkeiten bereiten. Anders verhält es sich hingegen mit dem *ohmschen* Spannungsabfall. Dieser ist ein direktes Mass für die Kupferverluste, sowie für das Kupfergewicht des Transformators, und steht somit im engsten Zusammenhang mit dem wirtschaftlichen Aufbau der Maschine. So müssen mit Rücksicht auf minimale Material- und Herstellungskosten in einer ausgeglichenen Typenreihe die Transformatoren kleiner Leistung mit einem grösseren prozentualen ohmschen Spannungsabfall ausgeführt werden als die Typen grösserer Leistung, sodass sich nicht einmal bei Transformatoren desselben Fabrikates, aber verschiedener Leistung, die Bedingungen für den theoretisch richtigen Parallelbetrieb mit denjenigen für den wirtschaftlichen Aufbau in Einklang bringen lassen.

Nicht viel besser verhält es sich mit der Forderung nach Gleichheit des *induktiven* Spannungsabfalles. Dieser ist in weitem Masse von der räumlichen Wicklungsanordnung abhängig. Bei Transformatoren mit Scheibenwicklung allerdings lässt sich die Streuspannung durch Aenderung der Spulenzahl in weiten Grenzen variieren. Bei der heute allgemein üblichen einfach- oder doppelkonzentrischen Wicklungsanordnung hingegen kann eine Aenderung der Streuspannung nur durch eine tiefgreifende Umgestaltung des Eisengestelles erreicht werden. Eine solche Massnahme wird aber fabrikationstechnisch im höchsten Grade störend empfunden, da eine Firma mit Rücksicht auf eine wirtschaftliche Herstellung mit möglichst wenig normalen Typen auszukommen sucht.

Da, wie wir gesehen haben, einige dieser theoretischen Parallelschaltbedingungen nicht oder nur schwer einzuhalten sind, interessieren uns die Zustände die auftreten, falls Transformatoren parallel geschaltet werden, die diesen oben erwähnten Voraussetzungen nicht genügen. Wie schon angedeutet, wird bei Verschiedenheit der Sekundärspannungen im Stromkreise $A' A'' B'' B'$ (Fig. 3) ein Ausgleichsstrom $I_A = AC = BD$ erzeugt. Dieser überlagert sich dem Normalstrom $I_I = OA$ resp. $I_{II} = AB$ (Fig. 5) in der Wicklung zum Totalstrom $I_{I\,tot} = OC$ resp. $I_{II\,tot} = AD$.

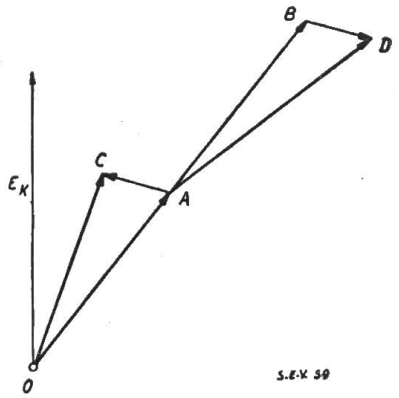

Fig. 5.

Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, äussert sich also dieser Ausgleichsstrom in einer ungleichen Strom- und Leistungsverteilung auf die beiden Transformatoren.

In der Praxis begnügt man sich in der Regel mit der Uebereinstimmung der Kurzschlusspannungen, d. h. mit gleichem totalen ohmschem und induktivem Spannungsabfall, da ein ungleiches Verhältnis der ohmschen zu den induktiven Spannungsabfällen nur von sehr geringem Einfluss auf die Lastverteilung ist. Im nach-

stehenden Diagramm (Fig. 6) sind die Spannungsdiagramme zweier parallel geschalteter Transformatoren mit gleicher Kurzschlusspannung, aber ungleichen ohmschen und induktiven Spannungsabfällen einander überlagert. Da der Stromvektor mit dem Vektor des ohmschen Spannungsabfalles richtungsgleich ist, arbeiten die beiden Transformatoren mit verschiedenem Leistungsfaktor. Der Strom in jedem Transformator ist somit grösser als er es bei Belastung unter dem gleichen Leistungsfaktor wäre, und es treten somit zusätzliche Verluste gegenüber dem idealen Parallelbetrieb auf. Diese sind jedoch zahlenmässig so gering, dass sie ohne Bedenken in Kauf genommen werden können.

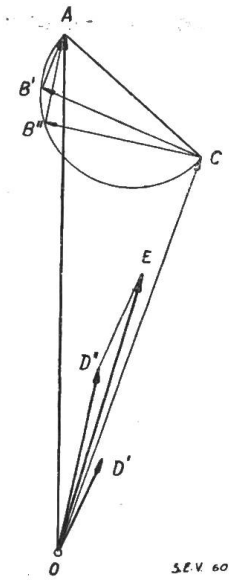

Fig. 6.

OA = sekundäre Leerlaufspannung.
$B'A$ resp. $B''A$ = ohmscher Spannungsabfall im Transformator I resp. II.
CB' resp. CB'' = induktiver Spannungsabfall im Transformator I resp. II.
OC = sekundäre Klemmenspannung.
OD' resp. OD'' = Strom im Transformator I resp. II.
OE = totaler Belastungsstrom.

Oft sollen jedoch Transformatoren parallel geschaltet werden, deren Kurzschlusspannungen nicht übereinstimmen. In diesem Falle stehen uns zur Verbesserung der Belastungsverteilung verschiedene Mittel zur Verfügung, von denen die beiden unten besprochenen in der Praxis hauptsächlich Verwendung finden.

Der dem Transformator mit der kleineren Kurzschlusspannung fehlende Anteil des Spannungsabfalles kann ausserhalb des Transformators durch einen demselben vorgeschaltete Drosselspule erzeugt werden. Dabei ist es mit Rücksicht auf den Parallelbetrieb gleichgültig, ob diese Spule oberspannungsseitig oder unterspannungsseitig vorgeschaltet wird, und die Entscheidung hierüber kann allein mit Rücksicht auf minimale Anschaffungskosten gefällt werden. Ein solcher Transformator mit zugehöriger Drosselspule verhält sich in bezug auf den Parallelbetrieb genau gleich wie ein Transformator, dessen Impedanz gleich der Summe der Impedanzen von Drosselspule und Transformator ist. Auf diese Art lässt sich durch geeignete Dimensionierung der Vorschaltdrosselspule ein sehr genauer Parallelbetrieb erreichen.

Bei kleinen Ortstransformatoren jedoch, die oft in grosser Anzahl parallel geschaltet werden, muss nach Mitteln gesucht werden, um den Parallelbetrieb ohne Anschaffung besonderer Vorschaltdrosselspulen zu ermöglichen. Eine Anpassung der Kurzschlusspannung an diejenige der bereits vorhandenen Typen ist aber gerade bei diesen Transformatoren, die in sehr grosser Zahl gebraucht werden, mit Rücksicht auf eine rationelle Herstellungsweise sehr oft nicht möglich. In vielen Fällen ist es auch vollständig genügend, wenn die Transformatoren bei einem bestimmten Belastungszustand z. B. bei Vollast und $\cos\varphi = 0{,}8$, gleichmässig beansprucht sind. Auch bei verschiedenen Kurzschlusspannungen kann das leicht durch entsprechende Wahl des Uebersetzungsverhältnisses erreicht werden, also ohne dass am Eisengestell oder an der Wicklungsanordnung irgendwelche Aenderungen anzubringen sind. Diese Abstimmung des Uebersetzungsverhältnisses besteht darin, dass die beiden Transformatoren für gleiche Sekundärspannung bei einem mittleren Belastungszustand, z. B. bei Vollast und $\cos\varphi = 0{,}8$ des Totalstromes, anstatt wie normalerweise für Spannungsgleichheit bei Leerlauf ausgeführt werden. Es wird also notwendig sein, den Transformator mit der grösseren Kurzschlusspannung infolge seines grösseren Spannungsabfalles für eine etwas grössere Sekundärspannung bei Leerlauf vorzusehen, d. h. ihn für ein kleineres Uebersetzungsverhältnis zu berechnen.

In Fig. 7 sind die Spannungsdiagramme zweier aufeinander abgestimmter Transformatoren mit verschiedener Kurzschlusspannung einander überlagert. Dabei ist O L die für beide Transformatoren gleiche sekundäre Klemmenspannung, L A′ der totale Spannungsabfall des Transformators I, bestehend aus den beiden Komponenten, dem ohmschen Spannungsabfall H′A′ und dem induktiven Spannungsabfall L H′. Analog ist L A″ der totale Spannungsabfall des Transformators II, der eine kleinere Kurzschlusspannung als I besitzt, zusammengesetzt aus seinen beiden Komponenten L H″ und H″A″. Die sekundäre Klemmenspannung O L und der totale Spannungsabfall L A′ bezw. L A″ addieren sich zur Leerlaufspannung O A′ bezw. O A″. A′A′ ist die Spannungserhöhung des Transformators I gegenüber II, gemessen bei Leerlauf.

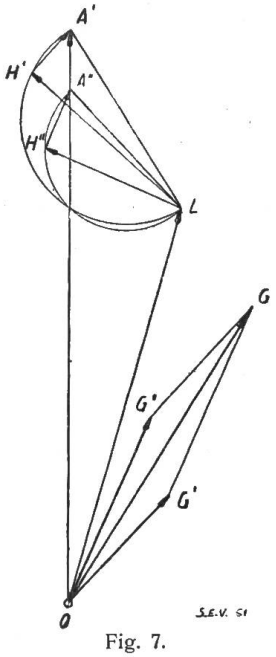

Fig. 7.

Der Strom in jedem der Transformatoren ist gleichgerichtet mit dem durch ihn erzeugten Spannungsabfall. Gemäss unserer Voraussetzung, dass das Diagramm für volle Belastung der beiden Transformatoren gezeichnet werde, ist somit O G′ sowohl der Grösse als auch der Richtung nach gleich dem maximalen Belastungsstrom im Transformator I. Analog ist O G″ der Maximalstrom des Transformators II. OG′ und OG″ addieren sich zum Totalstrom O G, durch den die aus den beiden Transformatoren I und II bestehende Transformatorgruppe belastet ist. Im allgemeinen werden die beiden Ströme O G′ und O G″ nicht richtungsgleich sein, sodass durch die Abstimmung des Uebersetzungsverhältnisses nur die Forderung nach einer der maximalen Belastbarkeit entsprechenden *Stromverteilung* nicht aber nach einer ebensolchen *Leistungsverteilung* erfüllt werden kann. Aber auch diese gleichmässige Stromverteilung wird nur bei dem bestimmten Belastungszustand, für den die Transformatoren abgestimmt sind, erhalten bleiben. Aendert sich hingegen die Totalbelastung der Transformatorengruppe, so wird sich der Totalstrom nach einem andern Gesetz auf die beiden Transformatoren verteilen und diese ungleichmässig belasten. Wie wir früher gesehen haben, ist eine solche ungleichmässige Strom- und Leistungsverteilung gleichbedeutend mit einem die Transformatoren durchfliessenden Ausgleichstrom, der zusätzliche Verluste zur Folge hat. Das gleiche tritt auf, falls der Leistungsfaktor der Totalbelastung vom Wert, auf den der Parallelbetrieb abgestimmt ist, abweicht.

Den Betriebsingenieur interessiert in erster Linie die Grösse dieser zusätzlichen Verluste, um daraus die Wirtschaftlichkeit seiner Verteilanlage beurteilen zu können. Als Beispiel seien deshalb im folgenden die Verhältnisse beim Parallelbetrieb zweier Transformatoren mit ungleicher Kurzschlusspannung zahlenmässig untersucht. Um einen extremen Fall herauszugreifen, werden zwei Transformatoren gewählt die nicht nur in der Kurzschlusspannung, sondern auch in der Leistung stark von einander abweichen. Ihre charakteristischen Grössen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Transformator I		*Transformator II*	
Nennspannung	10 000 V	Nennspannung	10 000 V
Leistung	160 kVA	Leistung	50 kVA
Kurzschlusspannung	3,8 %	Kurzschlusspannung	2,8 %
Leerlaufverluste	940 Watt	Leerlaufverluste	522 Watt
Kupferverluste	3 500 Watt	Kupferverluste	1 022 Watt
Vollaststrom	9,25 A	Vollaststrom	2,9 A

Durch geeignete Wahl des Uebersetzungsverhältnisses sind diese beiden Transformatoren für Parallelbetrieb auf Vollast und $\cos\varphi = 0{,}8$ abgestimmt. Um dies zu erreichen, ist es notwendig, den Transformator I für eine um 1,04 % grössere Leerlaufspannung auszuführen als den Transformator II.

In Fig. 8 ist nun die Stromverteilung auf die beiden Transformatoren in Abhängigkeit des Totalstromes aufgetragen, wobei vorausgesetzt ist, dass der $\cos\varphi$ zwischen Totalstrom und Sekundärspannung den konstanten Wert 0,8 beibehält. Wie leicht zu ersehen, liefert bei Totalbelastungen der Transformator I prozentual einen grösseren Anteil des Stromes, als ihm gemäss seiner Nennleistung zufallen sollte. Umgekehrt bleibt beim Transformator II die Strombelastung hinter derjenigen, die bei richtiger Belastungsverteilung auftreten würde, zurück. Durch diese ungleiche prozentuale Stromverteilung entstehen Mehrverluste, die ebenfalls in Fig. 8 in Prozenten der Totalverluste bei Vollast aufgetragen sind.

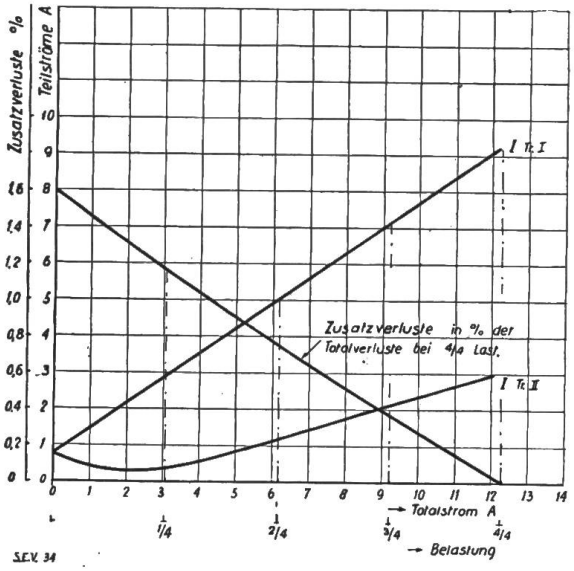

Fig. 8.

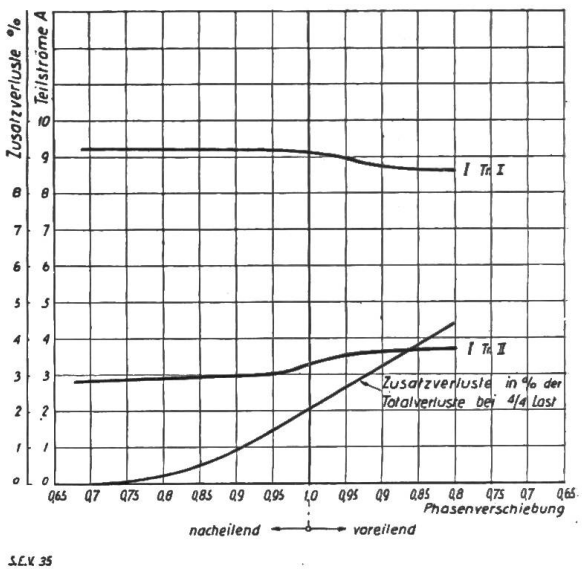

Fig. 9.

Analog sind die Verhältnisse bei konstant bleibendem totalem Belastungsstrom und veränderlichem Leistungsfaktor (Fig. 9). Während bei nacheilendem Strom nur eine ganz unbedeutende Stromverschiebung vom Transformator II zum Transformator I auftritt, gibt bei voreilendem Strom der Transformator I einen Teil seines Belastungsstromes an den Transformator II ab. Auch hier sind die durch die ungleiche Stromverteilung bedingten Mehrverluste in Prozenten der Totalverluste bei Vollast aufgetragen.

Wie aus den Kurven Fig. 8 und 9 zu entnehmen ist, treten die grössten zusätzlichen Verluste bei Leerlauf der beiden Transformatoren auf, *und zwar betragen sie im vorliegenden Falle 1,6 % der Verluste bei Vollast. Da nun die Vollastverluste 2,8 % der totalen Transformatorenleistung betragen, erreichen die Zusatzverluste die Höhe von nur 0,045 % der Transformatorenleistung, ein Betrag der ohne Bedenken in Kauf genommen werden kann.* In der Praxis gestalten sich die Verhältnisse dadurch noch günstiger, dass Ortstransformatoren nur in seltenen Fällen direkt auf die gleichen Sammelschienen parallel geschaltet werden. Sie sind vielmehr örtlich mehr oder weniger weit von einander entfernt aufgestellt, sodass der Ausgleichstrom zwischen den beiden Transformatoren noch einen bedeutenden Teil des Verteilnetzes zu durchfliessen hat. Die Induktivität, sowie der ohmsche Widerstand der zwischenliegenden Leitungsstücke, werden aber eine weitere Verminderung des Ausgleichstromes zur Folge haben, sodass die zusätzlichen Verluste auf noch kleinere Beträge reduziert werden.

Die durch Abstimmung des Uebersetzungsverhältnisses erreichte Genauigkeit des Parallelbetriebes von Transformatoren mit ungleicher Kurzschlussspannung wird also den praktischen Anforderungen in weitaus den meisten Fällen genügen.