

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 23 (1932)
Heft: 13

Artikel: Betrachtungen über Transformatoren, deren Schutz und Lüftung
Autor: Stoecklin, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059326>

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: 16.02.2026

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

2. die beim Versuchsherd gemessene Temperatur des für Reinigungszwecke entnommenen Wassers ist nicht ganz genügend. Sie sollte bei weiteren Ausführungen des Herdes um 10 bis 15 % erhöht werden²⁾;
3. das Anbringen eines Temperaturindikators, an Hand dessen der noch vorhandene Wärmeinhalt des Speicherkörpers abgeschätzt und damit beurteilt werden könnte, ob dieser für das vorgesehene Kochprogramm noch ausreicht, würde bei der praktischen Anwendung des Herdes als vorteilhaft empfunden³⁾;
4. ein automatischer Temperaturbegrenzer bzw. Ausschalter, der bei geringem oder gar keinem Wärmeentzug bei versehentlichem Eingeschaltetbleiben des Herdes ein selbsttägiges Abschalten vom Netze bewirken würde, könnte unützen Energieverbrauch verhüten⁴⁾.

Im Anschluss an diesen Bericht, der eine gekürzte Wiedergabe eines im Druck erschienenen ausführlichen Versuchsberichtes darstellt, sei noch angegeben, wie ein Speicherherd des beschriebenen Systems am Aufstellungsort in kurzer und einfacher Weise auf sein richtiges Funktionieren geprüft werden kann.

³⁾ Die neueren Herdkonstruktionen weisen einen mit dem Druckraum in Verbindung stehenden Temperaturindikator auf.

⁴⁾ Neuere Herdausführungen sind mit einem solchen automatischen Temperaturbegrenzer ausgerüstet, der bei Nichtbenutzung des Herdes während längerer Zeit die Stromzufuhr unterbricht.

VI. Prüfverfahren.

Der Speicherherd wird während 24 Stunden auf der höchsten Heizstufe (ca. 650 W) bei abgestelltem Ventilator und geschlossenen Ventilen aufgeladen (evtl. vorhandene Sperruhru überbrücken).

Nach Ablauf der 24. Stunde wird die Heizstromzufuhr unterbrochen und anschliessend werden auf die Kochplatte I und die Fortkochplatte III je eine unbedeckte Aluminiumpfanne von 2 kg Wasserinhalt (Anfangstemperatur ca. 12° C) aufgesetzt. Nach Ingangsetzung des Ventilators werden die Ventile der Platten I und III vollständig geöffnet.

Bei Erreichen des Siedepunktes des Wassers auf Platte I wird die Pfanne rasch gegen eine zweite bereitgestellte Pfanne gleichen Wasserinhalts ausgewechselt. Diese Prozedur wird solange fortgesetzt, bis auf der Platte I 5 mal 2 kg Wasser zum Sieden gebracht worden sind.

Bei den Versuchen muss darauf geachtet werden, dass die Kochplatten und die Unterseite der Pfannen sauber und trocken sind. Es sollen möglichst nur Pfannen gleicher Höhe mit einem Durchmesser von 220 mm und ebenem Boden verwendet werden.

Wenn der Herd in Ordnung ist, so müssen sich die Kochzeiten für die zwei Liter Wasser auf der Kochplatte I zwischen ca. 8 und 10 Minuten bewegen, während das Wasser auf Kochplatte III knapp zum Sieden kommen oder doch wenigstens eine Temperatur von 80 bis 90° C erreichen muss.

Betrachtungen über Transformatoren, deren Schutz und Lüftung.

Von A. Stoecklin, Ingenieur, Sissach.

621.314.2

Der Autor behandelt eine Reihe von Fragen, welche für die Auswahl von Transformatoren wichtig sind. Besonders eingehend wird der Einfluss der Oelmenge und der Beanspruchung von Kupfer und Eisen auf die Ueberlastbarkeit von Transformatoren behandelt, wozu wertvolle Versuchsergebnisse mitgeteilt werden. Zum Schluss wird der Schutz von Transformatoren gegen Ueberspannungen und die Lüftung von Transformatorenräumen besprochen.

Der Artikel wendet sich in erster Linie an die Betriebsleiter, welche darin interessante Anhaltspunkte zur Beurteilung von Transformatoren mittlerer Grösse finden.

Allgemeines.

Die Theorie und Wirkungsweise des Transformators bildet die Grundlage der Wechselstrommaschinen und Wechselstromapparate. Dem Konstrukteur stehen hierüber Spezialwerke bekannter Autoren¹⁾ zur Verfügung. In nachstehendem Aufsatz sollen mehr praktische Folgerungen Berücksichtigung finden, welche für den Betriebsleiter von

¹⁾ Arnold, Transformatoren, 1910; Vidmar, Transformatoren, 1921 und 1925; Vidmar, Der Transformator im Betrieb, 1927; Benischke, Transformatoren, 1921; Richter, Transformatoren, 1932.

L'auteur traite une série de questions importantes pour le choix des transformateurs. Il s'arrête plus particulièrement à l'influence de la quantité d'huile et de la sollicitation du cuivre et du fer sur la capacité de surcharge des transformateurs, et communique à ce sujet de précieux résultats d'essais. Pour terminer, l'auteur parle de la protection des transformateurs contre les surtensions et de l'aération des locaux dans lesquels sont montés des transformateurs.

Cet article s'adresse en premier lieu aux chefs d'exploitation; ils y trouveront des données intéressantes pour l'appréciation des transformateurs de moyenne puissance.

Interesse sein dürften. Es sind dies zum Teil konstruktive Details, welche trotz ihrer Wichtigkeit oft zu wenig Beachtung finden und daher hin und wieder übersehen werden.

Der konstruktive Aufbau des Transformators ist speziell bei höheren Spannungen und Leistungen, aber auch bei hohen Stromstärken nicht so einfach, wie es zu sein scheint. Er bietet dem Konstrukteur interessante Aufgaben, sei es in elektrischer, mechanischer oder wärmotechnischer Hinsicht.

Den grundlegenden Teil des Transformators bildet der Eisenkern bzw. das aktive Eisen. Von den

Kerndimensionen hängen die meisten übrigen Daten ab. An das aktive Eisen werden grosse Anforderungen gestellt, und es kommen daher bei 50-periodigem Wechselstrom fast durchwegs nur hochlegierte Bleche in Frage. Diese sollen bei möglichst hoher Magnetisierung eine kleine magnetisierende Kraft benötigen; der durch die Ummagnetisierung verursachte Hysteresisverlust soll möglichst klein sein. Der spezifische Widerstand der Bleche muss gross sein, damit die Wirbelströme nicht zu gross werden. Die durch Hysteresis und Wirbelströme sich ergebenden Verluste werden in der Praxis durch die beide Verluste umfassende «Verlustziffer» angegeben; dieselbe entspricht den Verlusten in W pro kg Eisenblech bei einer Sättigung von 10 000 Gauss und beträgt etwa 1,3 bis 1,6 W. Die Verluste nehmen annähernd im Quadrat der Sättigung zu. Hieraus geht hervor, dass die Leerlaufverluste mit höherer Sättigung rasch zunehmen und die Ausnutzung der Eisenbleche daher begrenzt ist. Ferner macht sich auch der Leerlaufstrom, welcher sich aus den Magnetisierungs- und Hysteresis-Komponenten zusammensetzt, rasch bemerkbar, sobald die Sättigung Werte von 13 000 bis 15 000 Gauss erreicht und damit in den flachen Teil der Magnetisierungskurve übergeht.

Die Eisenverluste können ohne weiteres reduziert werden, sei es durch Verwendung hochlegierter Spezialbleche, sei es durch eine niedrigere Beanspruchung der allgemein zur Verwendung kommenden normalen Blechsorten. Beides bedingt eine Preiserhöhung. Bei Verwendung normaler Bleche wird das Eisengewicht und gleichzeitig infolge der sich ergebenden höheren Windungszahl auch das Kupfergewicht grösser. Sollen die ursprünglich zu Grunde gelegten Kupferverluste gleich bleiben, so muss der Kupferquerschnitt der Wicklung verstärkt werden. Ueber die durch die Sättigung beeinflussten Leerlaufströme und Eisenverluste geben die an einem 150-kVA-Transformator gemessenen Daten der Tabelle I Aufschluss.

An einem 150-kVA-Drehstromtransformator gemessene Leerlaufwerte. Tabelle I.

Sättigung der Kerne in Gauss	Mittlerer Leerlaufstrom in % des Vollaststromes	Leerlaufverluste P W	$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot I \cdot U}$
11 800	2,45	620	0,18
12 100	2,72	640	0,164
12 500	3,15	660	0,142
12 800	3,55	700	0,13
13 100	4,1	760	0,118
13 400	4,65	820	0,11
13 800	5,4	900	0,1
14 100	6,2	1000	0,094

Wie aus Tabelle I hervorgeht, sind für den Transformator günstige Verhältnisse gewählt worden. Die Betriebsspannung entspricht einer Sättigung von 12 800 Gauss in den Kernen. Zwischen 11 800 und 14 100 Gauss wachsen der Leerlaufstrom um das 2,5fache und die Leerlaufverluste um das

1,62fache an. Es ergibt sich somit, dass speziell der Leerlaufstrom (hauptsächlich «Blindstrom»), welcher die Generatoren und das Netz (ohne nutzbare Arbeit zu leisten) belastet, leicht reduziert werden kann, ohne dass der Transformator wesentlich teurer wird. Hohe Sättigungen können sich auch weiter nachteilig auswirken. Sie verursachen Verluste in der Ummantelung, d. h. im Oelkessel, und geben Anlass zu höheren Stromstößen beim Zuschalten leerlaufender Transformatoren, wenn im Moment des Nullspannungsdurchgangs geschaltet wird. Das Kupfer kann ruhig höher beansprucht werden, denn die Wicklungsverluste treten nur dann wesentlich in Erscheinung, wenn der Transformator stark belastet ist, während die Leerlaufverluste ungeachtet der Grösse der Belastung bei unter Spannung stehendem Transformator stets gleich bleiben. Diese Tatsachen sind im modernen Transformatorenbau auch berücksichtigt worden.

Wir gehen nun zur Betrachtung der *Bewicklung* über. Wenn im Nachstehenden von wärmetechnischen Verhältnissen gesprochen wird, so handelt es sich nur um Transformatoren mittlerer und grösserer Leistung. Der kleine Oeltransformator hat automatisch genügend Oberfläche, so dass dieser vom wärmetechnischen Standpunkt aus nicht interessant ist. Ferner wurde nur die allgemein übliche konzentrische Wicklungsanordnung ins Auge gefasst.

Beim Entwurf der Wicklung muss der Konstrukteur verschiedene Faktoren berücksichtigen. Es sind dies die Kupferverluste, die Kurzschlußspannung, die elektrische und mechanische Festigkeit und die Kühlung. Der aktive Teil des Transformators muss eine den Verlusten entsprechende Oberfläche erhalten, damit die Wicklung nicht zu warm wird. Das Oel soll überall Zutritt haben. Zu diesem Zwecke müssen zwischen Kern- und Niederspannungsspulen, sowie zwischen den letzteren und den Oberspannungsspulen Kühlkanäle vorgesehen werden. Es genügt nicht, einen zu knapp dimensionierten Transformator in einen auf Grund der Verluste richtig gebauten Oelkessel zu stellen. Der Oelkasten wird in diesem Falle seine Pflicht erfüllen, die Oeltemperatur wird in den normalen Grenzen bleiben, hingegen wird der aktive Teil zu warm werden. Es entstehen Wärmeherde, welche auf die Lebensdauer des Transformators grossen Einfluss haben.

Der Verfasser hatte vor einiger Zeit Gelegenheit, bei der Demontage eines solchen Transformators zugegen zu sein. Die Spulen waren gegenseitig derart ineinander gezwängt, dass das Oel nirgends Zutritt finden konnte. Der Transformator trug schon von Anfang an den Todeskeim in sich. Die Kerne waren kurz und die Spulen erhielten infolgedessen in radialer Richtung eine zu grosse Dicke. Bei der Demontage bröckelte die verbrannte (geröstete) Isolation ab, die blanken Spulendrähte kamen zum Vorschein. Ferner war die Papierisolation der Bleche vollständig verkohlt. Der Kessel war reichlich dimensioniert und enthielt verhältnismässig

viel Oel. Der Transformator musste zu Grunde gehen, weil die Oberfläche des aktiven Teiles im Verhältnis zu den Verlusten viel zu klein war.

Aehnliche Erscheinungen findet man oft auch bei richtig konstruierten Transformatoren. In solchen Fällen tragen gewöhnlich die den Apparaten zugemuteten grossen Ueberlastungen die Schuld. Ueberlastungen von 100 und mehr Prozent waren keine Seltenheiten. Bei den heutigen Typen sind Ueberschreitungen der Nennlast in diesem Masse nicht mehr zulässig. Die Verhältnisse haben sich im Elektromaschinenbau infolge Verwendung hochlegierter Bleche grundsätzlich geändert. Da diese Bleche gegenüber den früheren beinahe um das Doppelte beansprucht werden können, geht die wärmeabgebende Oberfläche automatisch zurück. Bei zweifelhaften Konstruktionen ist es angezeigt, die bei Vollast entstehende mittlere Kupfererwärmung zu messen, was mittels Dauervollastversuch durch Widerstandsbestimmung leicht möglich ist.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass zu grosse Kupferquerschnitte bei den Sekundärspulen vermieden werden sollen, da in grossen Querschnitten sich starke Wirbelströme ausbilden können, die zusätzliche Verluste verursachen. Diese haben schon vielfach zu unliebsamen Ueberraschungen geführt.

Man findet noch oft Transformatoren, bei denen die Hoch- und Niederspannungsspulen direkt den dazwischenliegenden Hartpapierzylinder berühren. Bei kleinen Leistungen und Spannungen ist dies ohne weiteres zulässig. Bei höheren Spannungen und Leistungen ist eine derartige Konstruktion falsch. Trotz der mechanischen Berührung zwischen Wicklungen und Hartpapierzylinder sind nämlich dünne Luft- oder Oelschichten an den Berührungsstellen unausbleiblich. Diese dünnen Zwischenschichten können elektrisch überbeansprucht werden, so dass Glimmerscheinungen auftreten, welche die Struktur der Isolierstoffe gefährden. Diese Tatsache soll an einem einfachen Beispiel erläutert werden:

Legen wir eine Spannung von der Grössenordnung 50 000 V an zwei durch eine Luftstrecke von z. B. 25 mm von einander getrennte Kugeln und stellen die Spannung so ein, dass die Luftstrecke der Spannung gerade noch standhält. Sobald wir nun in diese Luftstrecke eine Hartpapierplatte von z. B. 10 mm Dicke hineinschwingen lassen, entstehen sofort Ueberschläge auf die Platte. Das elektrische Feld hat somit die um 10 mm reduzierte Luftstrecke durchbrochen. Wir stehen vor der eigentümlichen Tatsache, dass durch Einschieben eines hochwertigen Isolierstoffes, welcher eine ca. 15- bis 20fache höhere Durchschlagsfestigkeit aufweist als Luft, die Verhältnisse schlechter geworden sind. Die Beanspruchungen zweier in Serie geschalteter ungleicher Isolierstoffe durch das elektrische Feld verhalten sich nämlich im umgekehrten Verhältnis ihrer Dielektrizitätskonstanten. Da nun die Dielektrizitätskonstante für Luft = 1 und für Hartpapier = 4 bis 4,4 beträgt, so wird uns dieser physikalische Vorgang erklärliech.

Aus obigen Gründen sind wir gezwungen, zwischen der Hoch- und Niederspannungswicklung einen Kühlkanal (Luft- oder Oelmantel) vorzusehen. Derselbe muss so dimensioniert sein, dass die Luft bzw. das Oel in Reihenschaltung mit dem Hartpapierzylinder nicht überbeansprucht wird. Diesem Luft- bzw. Oelmantel ist somit eine doppelte Rolle zugeschrieben, d. h. er ist sowohl in elektrischer als auch in wärmetechnischer Hinsicht unentbehrlich. Es ist von grosser Wichtigkeit, dass die Kühlmedien zum Wärmeschwerpunkt der Wicklung Zutritt haben. Der Hartpapierzylinder kann nicht entbehrt werden; er hat den Zweck, momentane Spannungsstösse aufzunehmen. Die Kühlkanäle haben auch wieder ihre Nachteile; sie nehmen Raum ein und vergrössern dadurch den Spulendurchmesser bzw. das Kupfergewicht und die Kurzschlußspannung. Um diesen Nachteil auszugleichen, müssen die Kerne länger gemacht werden, wodurch die radiale Dicke der Spulen kleiner wird. Beides hilft mit, die Kurzschlußspannung zu verkleinern. Die Oberfläche der Wicklung wird dadurch grösser, was dem Transformator nur nützlich sein kann. Gleichzeitig werden die Eisen- und Kupferverluste grösser. Hier muss der Konstrukteur ausgleichend wirken und die richtigen Verhältnisse herausfinden. Vor allem soll er die Spulen so anordnen, dass er ohne Bedenken das Kupfer gut ausnutzen kann, wobei ihm gerade die kleinere radiale Dicke der Spulen zu Hilfe kommt. Im Transformatorenbau stehen nämlich jedem Vorteil gewöhnlich wieder Nachteile gegenüber.

Es ist übrigens kein Fehler, wenn die Kurzschlußspannung etwas höher ausfällt; dies hat wieder den Vorteil, dass sich Kurzschlüsse elastischer auswirken und die Kurzschluss-Stromkräfte nicht zu stark anwachsen. Aus diesem Grunde wird oft mit Recht bei grossen Transformatoren eine verhältnismässig hohe Kurzschlußspannung verlangt. Dadurch wird der Transformator nicht etwa billiger, sondern teurer, weil zwischen den Spulen oft grössere Zwischenräume angeordnet werden müssen, welche den Kupferaufwand erhöhen.

Bei höheren Spannungen muss der Konstrukteur seine Aufmerksamkeit auch dem in der Höhe der Joche liegenden Randfeld zuwenden. Hiefür bieten über die Eingangsspulen gelegte Metallringe einen guten Schutz. Das Potentialgefälle ist in der Nähe einer grossen Fläche wesentlich kleiner als in der Nähe eines dünnen Drahtes. Diese Tatsache tritt besonders bei niedrigen Frequenzen zutage.

Was die Schaltungen anbetrifft, muss erwähnt werden, dass oft von seiten der Betriebsleiter ganz unrichtige Bedingungen vorgeschrieben werden. Es sind dem Verfasser Fälle bekannt, wo bei Transformatoren für eine Leistung von z. B. 160 und 200 kVA und 6000 V Spannung unverständigerweise Zickzackschaltung verlangt wurde. Die Schaltung ist in diesem Falle nicht am Platze, denn sie gestaltet den Transformator unwirtschaftlich. Bei Zickzackschaltung muss für jede Phase die Sekundärwicklung auf zwei Kerne verteilt werden. Die

Spannungen addieren sich daher nicht algebraisch, sondern geometrisch. Die Sekundärwindungszahl muss um 15 % erhöht werden. Das Kupfergewicht der Sekundärspulen und somit der Spannungsabfall wird um diesen Betrag höher, ferner erfordert diese Schaltung mehr Raum und es stellt sich ausserdem eine zusätzliche Streuung ein. Die Stern-Zickzackschaltung ist eine Aushilfsschaltung und deren Anwendung soll allein dem Konstrukteur überlassen werden. Anders liegen die Verhältnisse z. B. bei einem Transformator für eine Leistung von 30 kVA und 16 000 V Spannung. Hier soll die Stern-Zickzackschaltung in Betracht kommen; sie ist nur dort zweckmässig, wo höhere Spannungen mit geringeren Leistungen zusammenfallen.

Ferner werden oft Umschaltmöglichkeiten für zukünftige Spannungen vorgeschrieben, welche vielfach Schwierigkeiten verursachen. Es sei z. B. ein Transformator für 5000 V mit Anzapfungen $\pm 4\%$ auf 16 000 V umschaltbar auszuführen. Jede Säule ist somit in 3 parallel zu schaltende Spulengruppen zu zerlegen. Da 5000 in 16 000 nicht teilbar ist, so können nur die Windungen (3 · 5000), welche einer Spannung von 15 000 V entsprechen, ausgeführt werden. Die übrige, den restlichen 1000 V entsprechende Windungszahl bleibt unbenutzt. Ausserdem muss zwischen den 3 Spulengruppen ein der Spannung von 5000 V entsprechender Zwischenraum freigelassen werden. Alle diese Massnahmen beanspruchen viel Platz und erhöhen zudem das Streufeld. Ferner entstehen statt nur eine drei Eingangsspulen pro Säule, welche extra behandelt werden müssen. Die Anzapfungen wiederholen sich ebenfalls dreimal. Derartige Umschaltungen sind technisch ausführbar, aber sie sind teuer und für den Konstrukteur unangenehm, da eine einwandfreie Lösung nicht möglich ist. Die Eisenverluste werden hauptsächlich beim 5000-V-Betrieb durch die wesentlich länger werdenden Eisenkerne grösser und müssen auch noch mit in Kauf genommen werden. Ferner wird die Betriebssicherheit derartiger Konstruktionen aus erklären Gründen nicht erhöht; das Gegenteil ist der Fall. Umschaltungsmöglichkeit von 6000 auf 16 000 V würde sich noch wesentlich ungünstiger gestalten.

Die *Gewichte* und der *Oelinhalt* von Transformatoren sollen noch kurz gestreift werden. Die Differenzen sind bei den heutigen Konstruktionen unglaublich gross, wie solche im Elektromaschinenbau sonst nirgends zu finden sind. Auf Grund zweier halbwegs neuerer Preislisten von Weltfirmen wurden folgende prozentuale Gewichtsdifferenzen (bezogen auf die leichteren Typen) festgestellt:

Leistung kVA	Gewichtsdifferenz des Transformators ohne Oel	Gewichtsdifferenz des Oeles
50	18%	23%
100	28%	42%
160	44%	70%

Bei der Einholung von Offerten werden oft nicht zu Unrecht die Gewichte des aktiven Mate-

rials und auch das Gewicht der Oelfüllung angefordert. Wenn auch das Gewicht des Transformators für dessen Beurteilung nicht unbedingt stichhaltig ist (denn bei der leichteren Ausführung kann durch geschickte Anordnung der Spulen usw. und höhere Beanspruchung des Materials der Transformator doch besser gekühlt sein als der schwerere), so ist die Kenntnis desselben doch interessant. Grosse Gewichtsdifferenzen lassen immerhin Schlüsse über die Beanspruchung der wärmeabgebenden Oberfläche und der Materialausnutzung zu. Richtige Kühlanordnungen beanspruchen Raum und verursachen daher auch einen grösseren Materialaufwand. Durch zu grosse Beanspruchungen des Materials wird der Transformator schlechter und seine Lebensdauer kürzer. Wir stehen hier vor einem interessanten Wendepunkt.

Der Konstrukteur kann die Meinung vertreten, dass ein Transformator einer bestimmten Leistung eben für diese und nicht für eine grössere Leistung gebaut ist, wie dies auch bei den heutigen Elektromotoren zutrifft. Diesem Standpunkt kann entgegengehalten werden, dass grössere Ueberlastungsmöglichkeiten des Transformators dem Betriebsleiter schon oft grosse Dienste erwiesen haben, sei es während starker Spitzenbelastungen, sei es beim Defektwerden eines parallel geschalteten Kameraden usw. Wenn ein Transformator überlastet werden muss, so soll dies ohne Misstrauen geschehen können, da die Baumwollumspinnung der Drähte schon bei Temperaturen von 120° C Schaden nehmen kann. Es darf nicht ausser acht gelassen werden, dass die Kupferverluste im Quadrate der Stromstärke zunehmen.

Wenn bei den heutigen Transformatorentypen wesentlich geringere Oelmengen gefordert werden als dies früher der Fall war, so sollte die Sparsamkeit in dieser Beziehung doch nicht zu weit getrieben werden. Das grössere Oelquantum verteurt den Transformator nicht wesentlich. Das Oel hat eine grosse Wärmekapazität und ist für die Ueberlastbarkeit des Transformators mitbestimmend. Es erwärmt sich naturgemäss beim ölarmen Transformator rascher als beim Transformator mit grösserer Oelfüllung. Vor nicht allzu langer Zeit betrug die Oelmenge bei einem 100-kVA-Transformator rund 500 kg, heute ist diese bis auf ca. 200 kg, also um mehr als die Hälfte, reduziert worden.

Die Transformatorengewichte sind unter dem Druck der Preisgestaltung beständig zurückgegangen und der Betriebsleiter muss sich darüber entscheiden, ob er der billiger und leichteren Ausführung oder der schweren und teureren Type den Vorzug geben soll. Er muss sich über die hieraus resultierenden oben erwähnten Vor- und Nachteile Rechenschaft geben, bevor er sich für diese oder jene Ausführung entschliesst. Die Ausnutzung des Materials ist bereits vielfach aufs äusserste getrieben worden; nur noch bessere Transformatorenbleche vermögen eine weitere Gewichtsverminde rung zuzulassen. Die Leerlaufverluste können, wie eingangs erwähnt, auch bei der schwereren Type

niedrig gehalten werden, wenn das Eisen weniger hoch beansprucht wird.

In Anbetracht dieser grösseren Ueberlastbarkeit sowie des kleineren Leerlaufstroms und der geringeren Leerlaufverluste ist der schwerere Transformatoren trotz des höhern Preises eigentlich der billigste, nur der grössere Materialaufwand verteuert den Transformatoren; die Herstellungskosten, welche beim Transformatorenbau stark ins Gewicht fallen, bleiben ungefähr gleich, gleichgültig ob der Apparat etwas schwerer oder leichter wird.

Der Oelkessel.

Der Oelkessel mit Selbstkühlung erheischt wenig Wartung und kommt heute für Leistungen bis zu mehreren 1000 kVA in Frage. Die Kühlung beruht auf dem Wärmeauftriebsprinzip des Oeles und der Luft. Die sich in den Transformatoren erwärmenden Stellen müssem dem Oel Zutritt gewähren und dem Oelkasten soll eine genügende Luftmenge zufliessen und von ihm wieder abfliessen können. Das Oel steigt in den Kühlkanälen der Wicklungen hoch, erwärmt sich und strömt bei gleichzeitiger Abkühlung an den Kesselwänden nach unten. Die Kesseloberfläche überträgt die Wärme durch Strahlung und Mitnahme an die umgebende aufsteigende Luft. Je grösser der Temperaturunterschied zwischen dem Oel im oberen und unteren Teil des Kessels ist, desto wirksamer ist seine Zirkulation, bzw. um so grösser ist seine Wärmeaufnahme. Die Wärmestrahlung des Kessels ist ferner abhängig von der Beschaffenheit der ausstrahlenden Fläche. Sie ist am grössten bei mattschwarzen Flächen und am kleinsten bei glänzenden weissen Flächen.

Um je nach den Verlusten eine entsprechende Kesseloberfläche zu erhalten, kommen Wellblechkessel in Betracht; das Wellenprofil ist hier von Wichtigkeit.

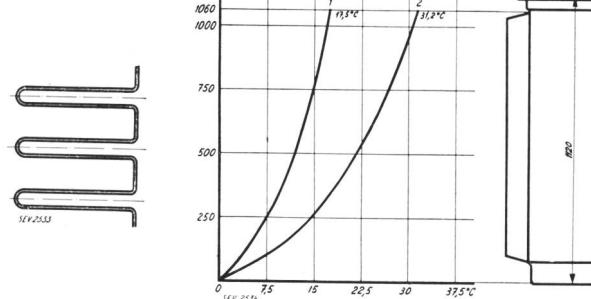


Fig. 1.
Erprobtes
Wellenprofil für
Kühlrippen.

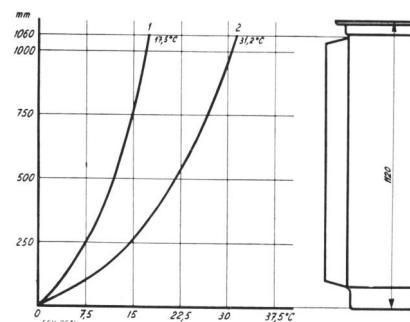


Fig. 2.
1 Luftverwärmung (Uebertemp.) ($^{\circ}$ C) zwischen den Kühlrippen in Funktion der Kesselhöhe (mm).
2 Kesselerwärmung (Uebertemp.) ($^{\circ}$ C) in Funktion der Kesselhöhe.

Das vom Verfasser nach Fig. 1 angewendete Wellenprofil hat gute Resultate ergeben. Die Luftkanäle dürfen, im Gegensatz zu heute noch vielfach existierenden Konstruktionen, nicht zu eng sein, damit sie die nach oben steigende notwendige Luftmenge aufnehmen können. Die Wärmeabgabe

an die Luft ist nicht gleichmässig. Nach Fig. 2 verläuft der Temperaturanstieg den Blechwellen entlang nach einer Parabel. Die Temperatur des etwas wärmeren Oeles verläuft somit nach einer ähnlichen Kurvenform. Die in der Mitte der Wellblechanäle gemessenen Lufttemperaturen geben Anhaltspunkte über die Verteilung der von der Luft aufgenommenen Wärmemenge. Hieraus geht hervor, dass die Temperaturdifferenz der aufsteigenden Luft im untern Viertel des Kessels ca. die Hälfte der Gesamtwärzung ausmacht und somit dieser untere Teil etwa die Hälfte der Wärmemenge aufnimmt. In der oberen Zone des Kessels ist die Wärmeabgabe an die Luft nur noch unbedeutend. Aus diesem Grunde sind niedere Kessel wirtschaftlicher als hohe²⁾.

Ueberlastbarkeit von Transformatoren und Einfluss der Oelmenge und des Gewichtes auf dieselbe.

Um die Ueberlastverhältnisse und die Temperaturverhältnisse der heutigen Transformatortypen mittlerer Leistung feststellen zu können, wurden an einem 100-kVA-Transformator umfangreiche Versuche vorgenommen. Um ferner einen Einblick über den Einfluss der Oelmenge auf die Ueberlastbarkeit des Transformators zu erhalten, wurde ein weiterer Transformator gleicher Leistung, aber anderer Konstruktion, untersucht. Die technischen Daten der beiden Transformatoren, welche mit *A* und *B* bezeichnet seien, sind folgende:

Daten der untersuchten Transformatoren *A* und *B*.
Tabelle II.

	Trans- formator <i>A</i>	Trans- formator <i>B</i>
Dauerleistung	100 kVA	100 kVA
Primärspannung	4000 V	2500 V
Sekundärspannung	270/156 V	380 220 V
Schaltung	Dreieck Stern	Dreieck/Stern
Leerlaufverluste	540 W	540 W
Kupferverluste, warm . . .	2250 W	2100 W
Gesamtgewicht ohne Oel .	620 kg	685 kg
Oelgewicht	200 kg	250 kg
Anzahl Wellen	76	64
Wellenteilung	30 mm	40 mm
Blechoberfläche der Wellen	11,8 m ²	13 m ²
Wellenlänge	675 mm	900 mm

Zuerst wurden die Oelerwärmungen bei verschiedenen Ueberlastungen und verschiedenen diesen vorangehenden Belastungen bestimmt. Diese Uebertemperaturen sind aus Fig. 3 bis 6 ersichtlich. Hierauf wurde die mittlere Erwärmung der Wicklungen mittels Widerstandsmessungen im kalten und warmen Zustand nach der in den VDE-Vorschriften (RET) enthaltenen Formel

$$t = \frac{R_{\text{warm}} - R_{\text{kalt}}}{R_{\text{kalt}}} (235 + T_{\text{kalt}}) - (T_{\text{kühlmittel}} - T_{\text{kalt}})$$

festgelegt.

²⁾ Näheres siehe Kehse, ETZ 1931, Nr. 31.

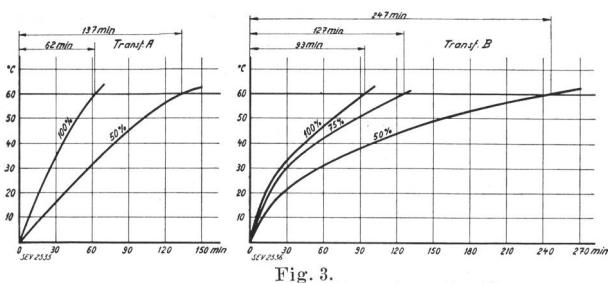


Fig. 3.

Transformer A Transformer B

Zulässige Dauer der Ueberlasten von 50 %, 75 % und 100 %, ausgehend vom kalten Zustand, nach Massgabe der Oelerwärmung.

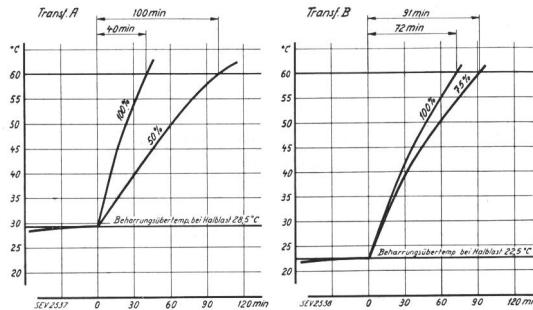


Fig. 4.

Transformer A Transformer B

Zulässige Dauer der Ueberlasten von 50 %, 75 % und 100 %, ausgehend von der Beharrungstemperatur bei Halblast, nach Massgabe der Oelerwärmung.

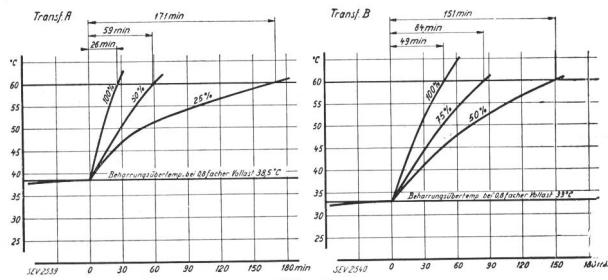


Fig. 5.

Transformer A Transformer B

Zulässige Dauer der Ueberlasten von 25 %, 50 %, 75 % und 100 %, ausgehend von der Beharrungstemperatur bei 0,8 facher Vollast, nach Massgabe der Oelerwärmung.

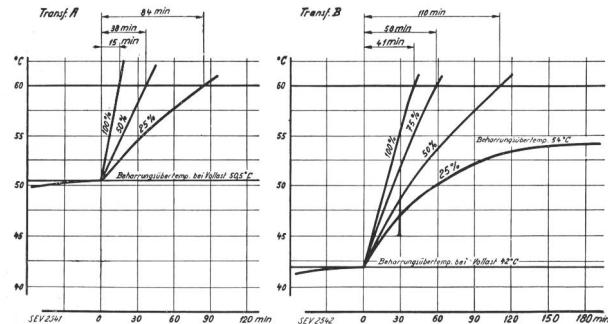


Fig. 6.

Transformer A Transformer B

Zulässige Dauer der Ueberlasten von 25 %, 50 %, 75 % und 100 %, ausgehend von der Beharrungstemperatur bei Vollast, nach Massgabe der Oelerwärmung.

Fig. 3 bis 6.
Ueberlastversuche an zwei 100-kVA-Oeltransformatoren
(siehe Tabelle II).
Oelerwärmungen
(Uebertemperaturen) ($^{\circ}$ C) in Funktion der Zeit (min).
Die Grenzerwärmung ist zu 60° C angenommen.

Nach den RET gelten für die Grenztemperaturen und die Grenzerwärmung (Uebertemperatur) folgende Werte:

Für die Wicklungen in Oel:

$$\begin{aligned} \text{Grenztemperatur} &= 105^{\circ}\text{ C}, \\ \text{Grenzerwärmung} &= 70^{\circ}\text{ C}. \end{aligned}$$

Für das Oel, oben gemessen:

$$\begin{aligned} \text{Grenztemperatur} &= 95^{\circ}\text{ C}, \\ \text{Grenzerwärmung} &= 60^{\circ}\text{ C}. \end{aligned}$$

Die Grenzwerte für die Erwärmung dürfen nur dann überschritten werden, wenn die Kühlmitteltemperatur (Raumtemperatur) stets so niedrig ist, dass die Grenztemperatur nicht erreicht wird und über die Erfüllung dieser Voraussetzung eine Vereinbarung getroffen ist.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass die maximale zulässige Grenzerwärmung von 70° die mittlere Uebertemperatur der Wicklungen darstellt. Im Wärmeschwerpunkt derselben sind diese Uebertemperaturen wesentlich höher. Sie können bei der gewöhnlichen konzentrischen Wicklungsanordnung (Niederspannungsspule innen, Hochspannungsspule aussen) auf der Niederspannungsseite 15 bis 20 % und bei der besser gekühlten Primärwicklung 8 bis 12 % höher sein. Beachten wir ferner, dass die Drahtisolation schon ab 120° C Schaden nehmen kann, so dürfen diese vorgeschriebenen Erwärmungen nicht oder wenigstens nur ausnahmsweise über-

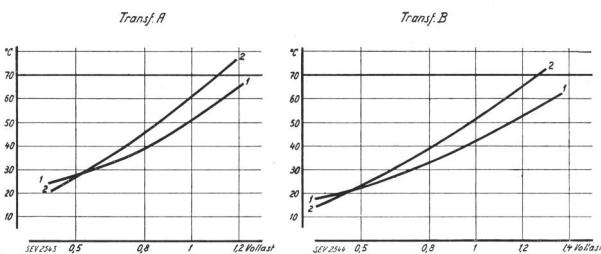


Fig. 7. Transformer A Transformer B

Stationäre Wicklungs- und Oelübertemperaturen ($^{\circ}$ C) in Funktion der Belastung.
1 Oelerwärmung (obere Schicht).
2 Wicklungserwärmung (mittlere).

schritten werden. Es ist von Interesse, die Verteilung der Temperaturen in der Bewicklung selbst zu kennen. Die maximale Erwärmung kann wieder durch Widerstandsmessung ermittelt werden. Zu diesem Zwecke sind bei den Wärmeschwerpunkten der beiden Wicklungen Anzapfungen anzubringen.

Zur Beurteilung der max. zulässigen Ueberlastung ist die mittlere Kupfererwärmung massgebend. Fig. 8 bis 12 geben dem Betriebsleiter Anhaltspunkte über die maximale Ueberlastungsmöglichkeit der heutigen Transformatortypen bei allen Betriebszuständen in die Hand.

Fig. 7 zeigt den Temperatursprung zwischen dem Oel und dem Kupfer. Bei zunehmender Belastung gehen diese beiden Kurven stark auseinander, weil die Kupferverluste im Quadrat der Belastung zunehmen.

Es sei noch speziell hervorgehoben, dass die Oeltemperatur (wie oft irrtümlich angenommen)

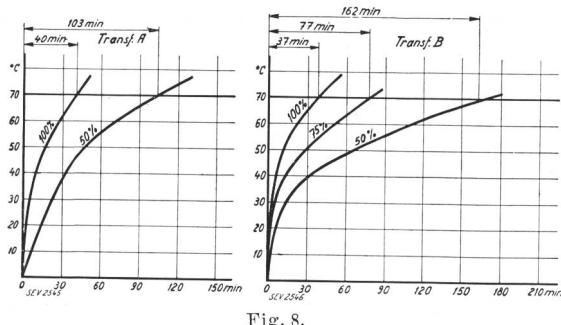


Fig. 8.

Transformator A Transformator B
Zulässige Dauer der Ueberlasten von 50 %, 75 % und 100 %, ausgehend vom kalten Zustand, nach Massgabe der Wicklungserwärmung.

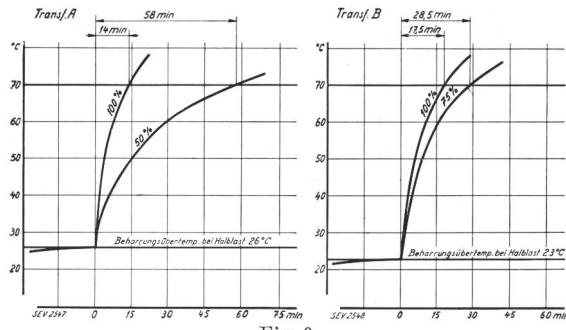


Fig. 9.

Transformator A Transformator B
Zulässige Dauer der Ueberlasten von 50 %, 75 % und 100 %, ausgehend von der Beharrungsübertemperatur bei Halblast, nach Massgabe der Wicklungserwärmung.

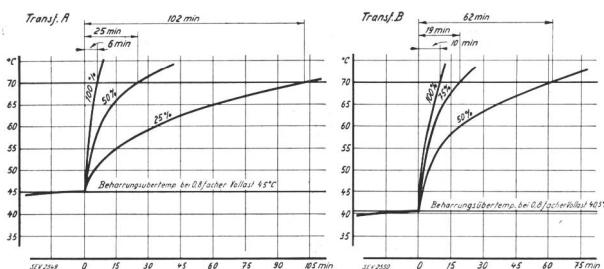


Fig. 10.

Transformator A Transformator B
Zulässige Dauer der Ueberlasten von 25 %, 50 %, 75 % und 100 %, ausgehend von der Beharrungsübertemperatur bei 0,8 facher Vollast, nach Massgabe der Wicklungserwärmung.

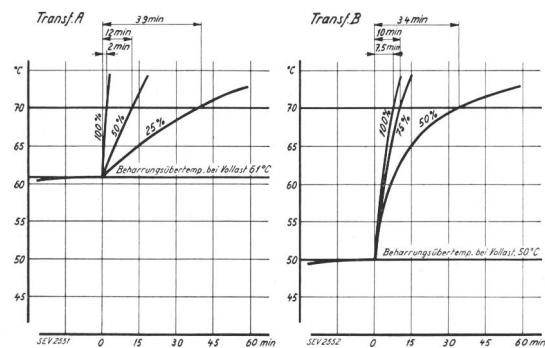


Fig. 11.

Transformator A Transformator B
Zulässige Dauer der Ueberlasten von 25 %, 50 %, 75 % und 100 %, ausgehend von der Beharrungsübertemperatur bei Vollast, nach Massgabe der Wicklungserwärmung.

Fig. 8 bis 11.
Ueberlastversuche an zwei 100-kVA-Oeltransformatoren (siehe Tabelle II).
Wicklungserwärmungen
(Uebertemperaturen) (° C) in Funktion der Zeit (min).
Die Grenzerwärmung ist zu 70° C angenommen.

für die Ueberlastungsmöglichkeit nicht massgebend ist. Dennoch sind diese Temperaturen von Interesse und es wurden dieselben aus diesem Grunde ermittelt. Der Betriebsleiter hat in der Regel nicht die Möglichkeit, die Wicklungswiderstände zu messen, wohl aber die Oeltemperaturen. Wenn diese letzteren bekannt sind, so kann die Temperaturdifferenz zwischen Kupfer und Oel aus Fig. 7 bei jeder beliebigen Belastung entnommen und zur Oeltemperatur addiert werden. Es gilt hier die Voraussetzung, dass die Oeltemperatur bereits den stationären Zustand erreicht haben muss. Während sich das Kupfer sehr rasch erwärmt, erreicht das Oel, infolge seiner grossen Wärmekapazität, je

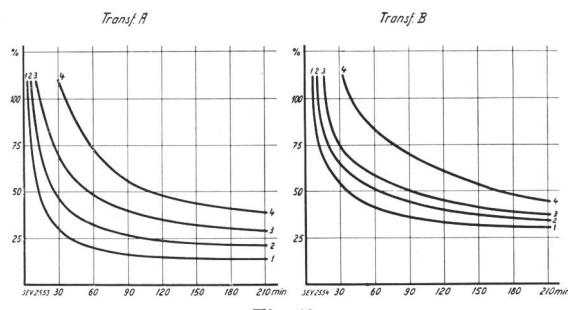


Fig. 12. Transformator A Transformator B

Zulässige Dauer (min) der Ueberlasten (%) bis zur Grenz-erwärmung der Wicklung von 70° C.

- 1 Ausgehend von der Beharrungsübertemperatur bei Vollast.
- 2 Ausgehend von der Beharrungsübertemperatur bei 0,8 facher Vollast.
- 3 Ausgehend von der Beharrungsübertemperatur bei Halblast.
- 4 Ausgehend vom kalten Zustand.

nach der Oelmenge erst nach einer längeren Zeitperiode seine endgültige Temperatur (stationärer Zustand).

Die aus den Versuchen ermittelten Werte wurden übersichtshalber einander gegenübergestellt. Greifen wir die Resultate nach vorangegangenem Vollastbetrieb heraus, so ergibt sich folgendes Bild:

Erwärmungsversuche zur Bestimmung der Ueberlastbarkeit der Transformatoren A und B. Tabelle III.

	Transfor-mator A	Transfor-mator B
1. Stationäre Uebertemperatur des Oeles bei Vollast	50,5° C	42° C
2. Dauer der 50 %igen Ueberlastung bis die zulässige Ueber-temperatur des Oeles 60° C er-reicht wird	38 min	110 min
3. Stationäre mittlere Kupferüber-temperatur bei Vollast	61° C	50° C
4. Dauer der 50 %igen Ueberlastung bis die zulässige Ueber-temperatur des Kupfers 70° C er-reicht wird	12 min	34 min

Wir ersehen nun, dass die Temperaturen beim Transformator B wesentlich niedriger sind als beim Transformator A, bzw. die Type B wesentlich länger überlastet werden kann als die Type A. Die günstigeren Verhältnisse beim Transformator B sind zurückzuführen auf:

1. die grössere Oelmenge und das grössere Gewicht des aktiven Teils,
2. die etwas grössere Oberfläche des Oelkessels, das günstige Wellenprofil, sowie
3. die um 150 W geringeren Verluste.

Aus Fig. 12 geht ferner hervor, dass der Transformator *B* nach vorangegangener Vollast dauernd mit 25 % überlastet werden kann, ohne die Erwärmungsgrenze zu erreichen.

Die beim Transformator *A* ermittelten Daten sind in Anbetracht des verhältnismässig kleinen Gewichtes und der geringeren Oelmenge wesentlich besser, als zu erwarten war. Der Transformator entspricht in allen Teilen den verlangten Anforderungen.

Dessen ungeachtet dürfte bei der Type *B* ein aus dem Mehraufwand an Material resultierender Mehrpreis von rund 8 % infolge seiner grösseren Ueberlastbarkeit und seiner voraussichtlich längeren Lebensdauer (gleiche Betriebsverhältnisse vorausgesetzt) mehr als gerechtfertigt erscheinen.

Die amerikanischen Vorschriften legen eine Raumtemperatur von 40° C (statt 35° C) zu Grunde³⁾. Die Grenzerwärmungen dürfen somit beim Oel nur 55° C und beim Kupfer nur 65° C betragen. Die festgestellten Ueberlastungsmöglichkeiten müssten daher für diesen Fall reduziert werden.

Der Trockentransformator.

Der Trockentransformator gibt seine Wärme im Gegensatz zum Oeltransformator direkt an die Luft ab. Als Hochspannungstransformator dürfte er zum Teil mit Unrecht der Vergangenheit angehören. Bei städtischen Verteilungsnetzen, welche z. B. mit Spannungen von 3000 bis 8000 V arbeiten und Ueberspannungen kaum in Frage kommen, hat der Trockentransformator für Leistungen bis zu ca. 300 kVA immer noch seine Daseinsberechtigung. Er verkörpert in sich den grossen Vorteil stets bequemer Kontrolle und benötigt soviel wie keine Wartung und keinen Unterhalt; auch der Nutzeffekt ist bei mittleren Leistungen höher als bei Oeltransformatoren. Eigentlich sollte man auch hier bestrebt sein, das Oel fernzuhalten, denn es ist nicht absolut notwendig. Diesem Umstand dürfte heute noch zu wenig Rechnung getragen werden. Bei den heutigen dem Konstrukteur zur Verfügung stehenden Baustoffen ist es möglich, Trockentransformatoren betriebssicherer zu bauen, als dies früher der Fall war.

Der Oeltransformator ist auch deshalb durchgedrungen, weil er schon bei 100 bis 150 kVA, trotz der Kosten, welche Kessel und Oel erfordern, den Trockentransformator konkurrenziert. Ueber diese Leistungen hinaus wird letzterer teurer.

Die Eisen- und Kupferverluste gehen beim Trockentransformator nicht derart auseinander wie beim Oeltransformator; dies liegt in der Natur der Sache. Der Trockentransformator braucht zur Ab-

fuhr der Wärme eine grosse Oberfläche, das Kupfer kann bei mittleren Leistungen nicht viel mehr als die Hälfte desjenigen des Oeltransformators beansprucht werden. Diese Tatsache benötigt mehr Wicklungsraum und daher auch ein grösseres Eisen gewicht. Die Luft ist als Kühlmedium viel träge als Oel und es muss daher schon bei kleinen Typen die wärmeabführende Oberfläche rechnerisch nach kontrolliert werden. Bei mittleren Leistungen sind im Kupfer und Eisen reichlich dimensionierte Kühlkanäle notwendig. Die Kerne werden länger und daher die Leerlaufverluste grösser als beim Oeltransformator. Andererseits verringern sich die Kupferverluste infolge der geringen Beanspruchung desselben ganz wesentlich. Ein Transformator von z. B. 200 kVA Leistung weist einen Spannungs abfall von kaum 1 % auf. Hieraus geht hervor, dass sich der Trockentransformator als reiner Licht transformator der grösseren Eisenverluste wegen weniger eignet.

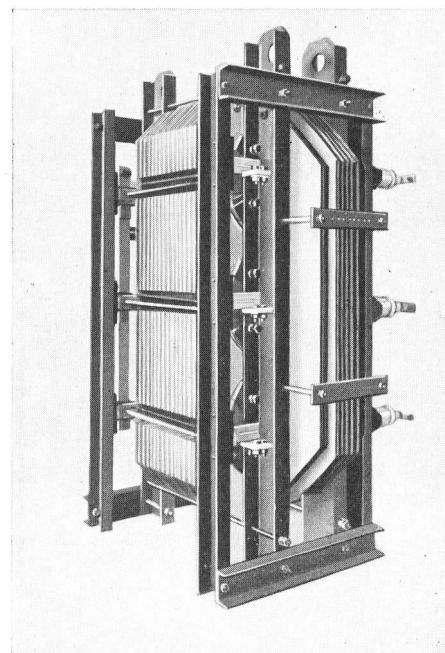


Fig. 13.
Kühlerrippentransformator.

Bei dem durch Pichler erfundenen Kühlerrippentransformator können allerdings die Eisenverluste reduziert werden. Diese Konstruktion ist vom wärmetechnischen Standpunkt aus betrachtet sehr interessant. (Sie wird hier kurz angeführt, weil sie in der Schweiz wenig bekannt ist.) Beim Kühlerrippentransformator kommt nur die Scheibenwicklung in Frage. Zwischen die Hoch- und Niederspannungsspulen werden Kupfer- oder Aluminiumbleche geschoben, welche die Wärme aus den Spulen heraussaugen und an die Luft abgeben. Fig. 13 stellt einen derartigen vom Verfasser entworfenen Transformator für eine Leistung von 250 kVA und 3000 V dar. Die Kupferverluste betragen 2910 W und die Eisenverluste 1525 W, der Wir-

³⁾ Ebenso die Regeln der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (Red.).

kungsgrad 98,2 %. Die Wärme wird einwandfrei abgeführt und die Uebertemperatur erreicht bei Vollast nur 48° C. Der Transformator verträgt auch grössere Ueberlastungen.

Infolge der engen Verkopplung der Hoch- und Niederspannungsspulen werden die Kerne wesentlich kürzer. Diese Tatsache hat bei Parallelschaltung mit anderen Transformatoren den Nachteil, dass die Kurzschlußspannung abnormal klein wird. Sie beträgt bei einem Transformator von z. B. 250 kVA kaum 1,3 bis 1,4 %.

Die *Verlustmessungen* sollen noch kurz gestreift werden. Die Kupferverluste werden durch die Kurzschlussmessung bestimmt, und zwar im betriebswarmen Zustande des Transformators. Hier soll dem Umstand Rechnung getragen werden, dass bei Messung im kalten Zustande so rasch als möglich die Ablesung erfolgt. Das Kupfer erwärmt sich nämlich rasch und die Anrechnung des ganzen Temperaturzuschlages wäre im gegenteiligen Fall nicht richtig. Desgleichen sind zur Bestimmung des Wirkungsgrades eines Transformators die gemessenen Leerlaufverluste einer Reduktion zu unterziehen. Die induzierte, für die Eisenverluste massgebende gegenelektromotorische Kraft eines vollbelasteten Transformators ist mit der normalen Netzzspannung nicht identisch. Diese ist vielmehr um den Betrag «primäre Stromstärke mal Widerstand der Primärwicklung» kleiner. Bei der Messung der Leerlaufverluste sollte somit die Klemmspannung um diesen Betrag reduziert werden.

Ueberspannungen.

Beinahe alle Störungen werden durch Wanderwellenerscheinungen atmosphärischer Natur, sowie solcher, welche durch Schaltvorgänge entstehen, eingeleitet. Besonders beim Abschalten leerlaufender Transformatoren können erhebliche Ueberspannungen auftreten, bedingt durch die starke Kühlung des Unterbrechungslichtbogens im Oelschalter, wodurch ein plötzlicher Stromunterbruch bewirkt wird. Die grundlegenden Arbeiten von K. W. Wagner haben hier weitgehend Aufklärung gebracht.

Beim Zuschalten einer Leitung läuft eine Wanderwelle mit senkrechter Stirn in diese hinein. Diese Wellenstirn dürfte zwar infolge des beim Zuschalten entstehenden Funkens und infolge Passierens von Induktivitäten (Relais, Stromwandler) etwas abgeflacht werden. Es sei hier auf folgende wichtige Tatsachen aufmerksam gemacht:

Läuft die Welle über eine Leitung mit einem bestimmten Wellenwiderstand $= \sqrt{\frac{L}{C}}$ (wo L und C die Induktivität bzw. die Kapazität der Leitung bedeuten) in einen Apparat oder eine Leitung mit grösserem Wellenwiderstand über, so tritt an der Treffstelle eine Stauung ein. Die Spannung wird theoretisch um den doppelten Scheitelwert des Stromerzeugers erhöht und reflektiert (zurückgeworfen). Im umgekehrten Fall wird die Spannung abgesenkt.

Die Spannungserhöhung wird

$$U_1 = U \cdot \frac{w_2 - w_1}{w_2 + w_1}$$

wobei U_1 die Spannungserhöhung bei Reflexion, U die Betriebsspannung und w_1 und w_2 die Wellenwiderstände bedeuten.

Der Wellenwiderstand einer Freileitung beträgt 500 bis 600 Ohm und derjenige einer Kabelleitung 50 bis 60 Ohm.

Beispiel:

- a) Ein Transformator mit einem Wellenwiderstand von $w_2 = 2500$ Ohm sei an eine Fernleitung von $w_1 = 500$ Ohm angeschlossen, die Spannung beträgt 10 000 V. Die Spannungserhöhung an den Klemmen des Transformators beträgt beim Einschalten somit: $U_1 = 10\,000 \cdot \frac{2500 - 500}{2500 + 500} = 6700$ V, somit Spannung U_t der reflektierten Welle $= 10\,000 + 6700 = 16\,700$ V. (Fig. 14.)
- b) Wird der gleiche Transformator durch ein Kabel von $w_1 = 50$ Ohm Wellenwiderstand gespiesen, so wird $U_1 = 10\,000 \cdot \frac{2500 - 50}{2500 + 50} = 9600$ V somit $U_t = 19\,600$ V.

Aus Fig. 14 geht die Gefährlichkeit derartiger Wanderwellen hervor; es liegt nämlich während einem Bruchteil einer Sekunde die volle Spannung U_t zwischen den ersten zwei Windungen der Bewicklung. Beim Vordringen der Welle in die Wicklung wird diese abgeschliffen und es werden speziell die ersten 10 bis 12 Windungen stark beansprucht. Läuft die reflektierte Welle in eine andere Leitung hinein, so können die Verhältnisse noch ungünstiger werden. Die Eingangswindungen müssen entsprechend besser isoliert werden. Es sei hier darauf hingewiesen, dass diese bessere Isolation einen grösseren Isolationsauftrag bedingt und die Spulendrähte weiter auseinander zu liegen kommen. Dadurch entsteht wieder eine andere Feldverteilung. Bei den ersten Windungen treten höhere Spannungsdifferenzen auf, als dies bei normaler Isolation der Fall wäre. Die bessere Isolation kommt also nicht vollständig zur Auswirkung. Bei öfteren Schaltvorgängen und speziell bei intermittierenden Erdenschlüssen treten diese Wanderwellen in rascher Folge auf. Die Eingangswindungen können daher infolge dieser hohen Beanspruchung nach und nach Schaden nehmen, so dass sie schliesslich dieser letztern nicht mehr standzuhalten vermögen. Es betrifft dies speziell Transformatoren kleinerer und mittlerer Leistungen. Bei Grosstransformatoren bereitet die bessere Isolation der Eingangswindungen weitaus weniger Schwierigkeiten.

Ueberspannungsschutzapparate⁴⁾.

Die Urteile über Schutzapparate gehen wohl nirgends derart auseinander wie auf dem Gebiete

⁴⁾ Im Laufe dieses Jahres wird voraussichtlich im Bull. SEV ein eingehender Artikel über Versuche an Ueberspannungsableitern von Dr. K. Berger erscheinen. (Red.)

des Ueberspannungsschutzes. Der Grund dürfte darin zu suchen sein, weil erstens die Verhältnisse überall wieder andere sind und zweitens die ganze Materie theoretisch noch nicht genau erfasst werden kann.

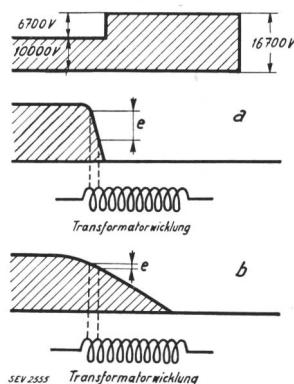


Fig. 14. Spannungserhöhung an den Klemmen eines Transformators durch Reflexion.

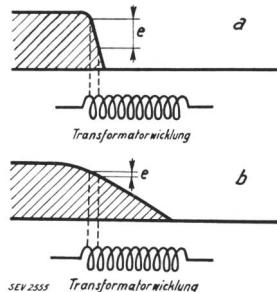


Fig. 15. Eindringen einer Wanderwelle in eine Transformatorwicklung ohne vorgeschaltete Drosselspule.

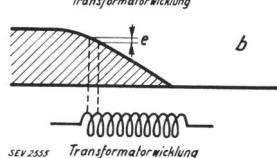


Fig. 16. Eindringen einer Wanderwelle in eine Transformatorwicklung mit vorgeschalteter Drosselspule.

Es ist über Drosselspulen, Kondensatoren und Funkenableiter usw. schon viel geschrieben und deren Nutzen auf Grund umfangreicher Abhandlungen und Betriebserfahrungen als zweifelhaft hingestellt worden. Anderseits wurden derartige Apparate wieder von prominenten Technikern empfohlen und deren Zweckmässigkeit nachgewiesen. Es wurde aber gewöhnlich unterlassen, zu untersuchen, ob die Apparate richtig dimensioniert bzw. den Verhältnissen angepasst wurden. Dort, wo z. B. eine Drosselspule von 0,015 mH eingebaut ist, wo eine solche von mehreren mH (also einige 100-mal mehr Induktivität) am Platze gewesen wäre, kann naturgemäss von einem Schutz nicht mehr die Rede sein. Es betrifft dies die bekannte Lockendrosselspule mit ca. 20 Windungen, welche die zuerst genannte Selbstinduktivität aufweist. Derartige Spulen nützen nichts, sondern sind eher schädlich und können somit ruhig beiseite gelassen werden. Nach den deutschen Leitsätzen sollen die Induktivitäten bei Spannungen bis zu 15 000 V für Nennströme von 2 bis 25 A 15 bis 5 mH betragen.

Bekanntlich haben die Drosselspulen den Zweck, die steile Wanderwellenstirn (Fig. 15) umzubilden (abzuschleifen), damit diese nicht in den Transformator eindringt. Das natürliche Empfinden tendiert schon dahin, Transformatoren nicht direkt an das Netz zu schliessen, und es betrifft dies speziell, wie bereits oben erwähnt, solche kleinerer und mittlerer Leistungen.

Wie aus Fig. 16 ersichtlich, wird durch den Einbau einer Drosselspule der zwischen den ersten Windungen entstehende Spannungssprung e ganz wesentlich reduziert.

Die Induktivität der Drosselspule hängt vom Wellenwiderstand der Leitung und des zu schützenden Apparates ab und soll daher den Verhältnissen angepasst werden.

In speziellen Fällen können zur Vernichtung von Hochfrequenzströmen auch hochohmige, zu den Spulen parallel geschaltete Widerstände gute

Dienste leisten. Zur Bekämpfung der schädlichen Einflüsse der Wanderwellen können auch Kondensatoren in Frage kommen; diese werden hingegen seltener verwendet.

Zur Begrenzung der Spannung gegen Erde dienen *Funkenableiter*, welche folgenden Anforderungen genügen sollten:

1. Rasches Ansprechen und grosses Schluckvermögen, denn durch die auftretenden Wanderwellen werden oft grössere Ladungen herangeführt, welche rasch unschädlich gemacht werden müssen.
2. Sollen die Ableiter nach dem Verschwinden der Ueberspannung ähnlich dem Dampfkesselventil (welches sich nach dem Entweichen des überschüssigen Dampfes sofort wieder schliesst) rasch zur Ruhe kommen.

Der einfachste und bekannteste Schutzapparat ist der Hörnerableiter. Dieser entspricht leider nicht ganz den oben erwähnten Anforderungen. Um ein homogeneres Feld und dadurch ein rascheres Ansprechen zu erreichen, können die Hörner mit Kugeln versehen oder aus dickem Metallrohr hergestellt werden. Sobald der Ableiter infolge Auftretens von Ueberspannungen in Funktion tritt, zeigt er seine nachteiligen Eigenschaften. Der Maschinenstrom folgt dem Ueberspannungsstrom nach. Der Widerstand der Luftstrecke wird um so kleiner, je grösser der die Luftstrecke durchfliessende Strom ist. Die zur Aufrechterhaltung des Funkens nötige Spannung fällt nämlich mit der Zunahme des Stromes hyperbelartig ab. Durch die erhitze Luft und die elektrodynamische Wirkung wird der Lichtbogen bekanntlich nach aufwärts getrieben und dadurch verlängert, bis er abreisst. Durch das Abreissen des Stromes entstehen wieder neue Wanderwellen, denn die magnetische Energie derselben kann nicht ohne weiteres verschwinden, der Spannungszustand wird dadurch beeinflusst. Damit die Ströme begrenzt bleiben, müssen in Serie zu den Hörnern Dämpfungswiderstände geschaltet werden. Diese haben, wie aus folgender Formel hervorgeht, den Zweck, die Entladestromstärke und gleichzeitig die Spannung der Wanderwelle herunterzusetzen:

$$\text{Entladestrom } I = \frac{U}{R + \frac{w_1 \cdot w_2}{w_1 + w_2}}$$

wobei U die Spannung der Welle, R den Widerstand des Dämpfungswiderstandes, w_1 und w_2 die Wellenwiderstände der Leitung bzw. des zu schützenden Apparates, bedeuten.

Beispiel:

Ein Transformator mit einem Wellenwiderstand von $w_2 = 2500$ Ohm sei an eine Freileitung mit einem Wellenwiderstand von 500 Ohm angeschlossen. Die Betriebsspannung betrage 12 000 V. Die Hörner sollen etwas höher als das Zweifache der Spannung gegen Erde, also auf ca. 16 000 V eingestellt werden. Der mit der Hörnerfunkentstrecke in Serie geschaltete Dämpfungswiderstand sei gleich

gross wie der aus der Freileitung und dem Transformatormotor resultierende Wellenwiderstand. Letzterer wird

$$W = \frac{w_1 \cdot w_2}{w_1 + w_2} = \frac{500 \cdot 2500}{500 + 2500} = 416 \text{ Ohm},$$

somit wird die Entladestromstärke

$$= \frac{U}{R + W} = \frac{16\,000}{832} = 19,2 \text{ A.}$$

Es werden vernichtet: $I \cdot R = 19,2 \cdot 416 = 8000 \text{ V}$, somit ist die Entladespannung von 16 000 V um die Hälfte reduziert worden. Diese restliche Entladespannung verschwindet ebenfalls, sobald die Welle über die Leitung hin und wieder zurückgelaufen ist. Die Entladespannung könnte durch Vergrösserung des Dämpfungswiderstandes noch weiter abgebaut werden. Dies ist hingegen nicht zulässig, da die Ladung so rasch wie möglich zur Erde abgeführt werden muss. Der Dämpfungswiderstand muss somit eine gewisse Wärmeaufnahmefähigkeit haben, damit er die abgeführte Ladung in Joulsche Wärme umsetzen kann. Für den Dämpfungswiderstand erhalten wir den günstigsten Wert, wenn wir denselben gleich dem aus Leitung und angeschlossenen Apparat resultierenden Wellenwiderstand setzen. Die in der Schweiz vielfach üblichen Wasserwiderstände können diesen Anforderungen nicht genügen und es ist daher nicht erklärlich, dass diese mit den bekannten Nachteilen behafteten Apparate immer noch zu treffen sind. Es gilt auch hier wieder der Grundsatz, dass Funkenableiter mit entsprechenden Dämpfungswiderständen versehen sein müssen, um ihren Zweck erfüllen zu können. Hierzu eignen sich am besten im Oelbad eingebaute, induktionslose Drahtwiderstände, welche vorteilhaft mit Temperatursicherungen geschützt werden. Bei Kabelnetzen treten Ueberspannungen atmosphärischer Natur gegen Erde nicht auf. Es ist daher nur ein Schutz zwischen den Leitungen notwendig. Wie wir weiter oben gesehen haben, müsste für Kabelnetze der Dämpfungswiderstand 50 bis 100 Ohm betragen. Da bei solchen Netzen der Sicherheitsgrad hoch ist, kann der Widerstand zweimal bis dreimal so gross sein. Für höhere Spannungen als 16 000 V kann die Hörnerfunkenstrecke kaum mehr in Frage kommen, da die Unterbrechung der Entladestromstärke Schwierigkeiten verursacht. Für höhere Spannungen eignet sich der Bendmann-Ableiter besser; er legt die Freileitung vorübergehend über einen Dämpfungswiderstand an Erde und unterbricht den nachfolgenden Maschinenstrom unter Oel.

Die Hörner sollen nicht zu empfindlich eingestellt werden, damit das Abreissen des Maschinenstromes sicher und rasch vor sich geht. Die gegenwärtigen Prüfvorschriften des VDE bieten ausreichende Sicherheit gegen die meisten auftretenden Ueberspannungen, so dass ein zu empfindliches Einstellen der Apparate nicht notwendig ist.

Zur Begrenzung der beim Einschalten von Transformatoren und Fernleitungen entstehenden

Stromstösse und Ueberspannungen eignen sich Vorkontaktwiderstände. Besonders bei grossen Transformatoren, Hochvolt-Freileitungen und Kabelnetzen leisten solche sehr gute Dienste.

Zur Bekämpfung der durch atmosphärische Einflüsse durch Influenz auf den Leitungen erzeugten statischen Ladungen dienen einphasige Erdungsdrosselpulen. Diese haben gegenüber den Wasserstrahlerdern den grossen Vorteil, dass sie keine Wartung benötigen und anderseits der zur Erde fliessende Wechselstrom infolge der hohen Selbstinduktion sehr niedrig ist. Ferner ist der für die Entladung in Betracht kommende Ohmsche Widerstand verhältnismässig gering, so dass die Drosselpulen beträchtliche Ladeströme abführen können. Die Sättigung der Eisenkerne beträgt nur ca. 7000 Gauss und beim Erdschluss einer Phase = ca. 12 100 Gauss. Die Erdungsdrosselpulen sollen aus obigen Gründen stärker gebaut werden als die gewöhnlichen Spannungswandler. Sie eignen sich zugleich zum Anschluss von Signal- und Kontrollapparaten. Man begegnet nicht zu Unrecht dem Hörnerableiter trotz seinen Nachteilen immer noch häufig, und wenn der Apparat richtig gewählt und installiert wird, so wird er zum grossen Teil die an ihn gestellten Anforderungen erfüllen. Funkenstrecken und Erdungsdrosselpulen sollten wenigstens in den Hauptverteilstationen eingebaut werden.

Zum Schluss seien noch die dem Verfasser bekannten praktischen Ergebnisse angeführt:

In einem vor ca. sechs Jahren im Kanton Tessin erbauten Ueberlandwerk von ca. 1000 kVA Leistung und 6000 V Spannung wurden als Schutz Hörner mit Oelwiderständen sowie die gewöhnlichen Lockendrosselpulen eingebaut. Die Freileitung ist zum Teil exponiert angelegt und die Gegend gewitterreich. Beim Auftreten von Ueberspannungswellen wurden am Generator jeweils starke Geräusche wahrgenommen, ohne dass die Hörner angesprochen hätten. Das eine Mal verbrannte eine Spule und das andere Mal wurde der noch neue Generator beschädigt, so dass er neu bewickelt werden musste. Nachdem die Lockendrosselpulen durch solche hoher Induktivität (ca. 7 mH) ersetzt wurden, haben diese Erscheinungen vollständig aufgehört. Die Ueberspannungswellen werden nun durch die Hörner einwandfrei zur Erde abgeführt.

In einem andern Ueberlandwerk machten sich auf den Freileitungen zu einer gewissen Jahreszeit starke Ladeerscheinungen bemerkbar. Die in die Hochspannungsleitung eingebauten Ampèremeter zeigten (Zeiger fibrierten) langsam ansteigende Ströme an; die Automaten lösten dadurch aus und es wurden infolgedessen des öfters Betriebsstörungen verursacht. Nach dem Einbau von Erdungsdrosselpulen mit einer Leistung von ca. je 1 kVA sind diese unliebsamen Störungen vollständig unterdrückt worden.

Es dürfte noch folgender Fall von Interesse sein. Es ist schon vorgekommen, dass zu einer gewissen Jahres- und Tageszeit (speziell im Herbst) durch

Ueberschläge Schalterauslösungen eingeleitet wurden, ohne dass deren Ursache hätte erklärt werden können. Schliesslich konnte zufällig festgestellt werden, dass in einem gewissen Zeitabschnitt leicht überbrückbare Stellen, wie Funkenableiter, ohne oder mit kleinem in Serie geschaltetem Widerstand, von der Sonne beschienen wurden, was Mücken anzug, welche dann diese Ueberschläge verursachten.

Lüftung von Transformatorenräumen.

Eine richtige Lüftung dieser Räume ist von grosser Wichtigkeit. Der Betriebsleiter kann den Transformator nicht richtig ausnützen, wenn er diesen in einem mangelhaft gelüfteten Raum stellt. Dem Verfasser ist ein Fall bekannt, wo stark überlastete Transformatoren alter Konstruktion sozusagen in ungelüfteten Räumen aufgestellt waren. Während der Höchstbelastung mussten jeweils Fenster und Türen geöffnet werden, damit die Transformatoren nicht verbrannten. Dies sind selbstverständlich unhaltbare Zustände. Bekanntlich wiegt 1 m³ Luft ca. 1,25 kg und 1 kg benötigt 1 kW Energie, um sich um 1° C zu erwärmen. Hieraus geht hervor, wie rasch die Raumtemperatur ansteigen würde, wenn die Luft nicht entweichen könnte.

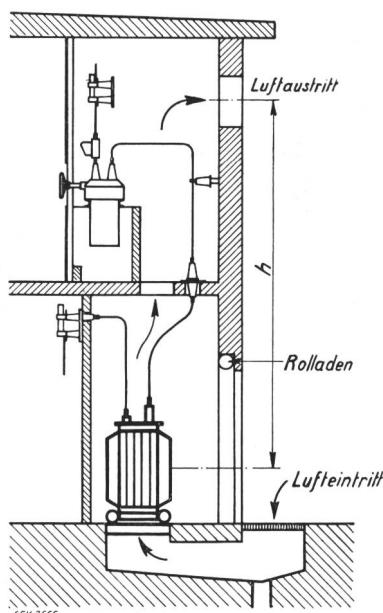


Fig. 17.
Zweckmässig gelüftete Transformatorenstation.

Der Transformator wird vorteilhaft über einem Hohlraum montiert, welcher mit der Außenluft in Verbindung steht (Fig. 17). Sind mehrere Trans-

formatoren nebeneinander aufgestellt, so soll zwischen diesen genügend Raum vorhanden sein, damit eine gegenseitige Wärmebestrahlung nicht stattfinden kann. Ferner dürfen der Luftströmung nicht zuviel Widerstände, wie Richtungs- und Querschnittsänderungen und dergl., entgegengesetzt werden. Die notwendige Luftmenge berechnet sich nach der Gleichung⁵⁾

$$L = 0,875 \frac{1}{\Delta t} \cdot P_v \text{ m}^3/\text{s}, \text{ worin}$$

L = Luftmenge in m³/s,

P_v = Verluste in kW in den Transformatoren,

Δt = Temperaturdifferenz zwischen der ein- und ausströmenden Luft. Diese Differenz beträgt gewöhnlich 10 bis 20° C. Die Luftkanalquerschnitte sind somit abhängig von den Verlusten, der zulässigen Temperaturdifferenz, sowie von der aktiven Zughöhe.

Balfrey⁶⁾ gibt zur Bestimmung der Querschnitte dieser Luftkanäle folgende einfache Faustformel an:

$$q = \frac{P_v}{\Delta t + h} \text{ in m}^2 \text{ worin wieder}$$

P_v = Verluste in den Transformatoren in kW,

Δt = Temperaturdifferenz in °C,

q = Querschnitt der Kanäle in m²,

h = die aktive Zughöhe, gemessen zwischen Mitte Transformatorenhöhe und Luftauswurf in m (Fig. 17).

Diese Formel gibt ungefähre Mittelwerte an, welche auf Genauigkeit keinen Anspruch machen können. Sie dürfte hingegen für die Praxis genügen, da es ja nicht darauf ankommt, ob die Öffnungen etwas grösser oder kleiner werden. Der Einfluss der Zughöhe geht aus folgendem Beispiel hervor: Mit

$P_v = 20 \text{ kW}$,

$\Delta t = 15^\circ \text{ C}$,

$h = 7 \text{ m}$,

$$\text{wird } q = \frac{20}{15 + 7} = 0,91 \text{ m}^2,$$

und bei $h = 2,5 \text{ m}$ wird $q = 1,14 \text{ m}^2$. Hierbei ist vorausgesetzt, dass es sich um normale Anordnungen handelt.

Genauere Angaben finden sich im Aufsatz von Sieber und Heiles⁵⁾; hier dürften die Angaben speziell bei grossen Verlusten bis zu 100 kW von Interesse sein.

⁵⁾ Sieber u. Heiles, ETZ 1929, Nr. 45, S. 1623.

⁶⁾ Balfrey, ETZ 1930, Nr. 15, S. 554.