

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 58 (1967)
Heft: 7

Artikel: Thermische Probleme bei Hochspannungsdurchführungen
Autor: Krasser, G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916237>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Thermische Probleme bei Hochspannungsdurchführungen

Von G. Krasser, Zürich

621.315.626

Mit dem immer weiteren Ansteigen der Spannung und Leistung bei grossen Transformatoren der Übertragungs- und Versorgungsnetze gewinnen auch die bei Hochspannungsdurchführungen auftretenden thermischen Probleme an Bedeutung, und werden in vielen Fällen schon massgebend für die Bemessung und Konstruktion dieser wichtigen Bauteile elektrischer Anlagen. Es werden die Eigenarten dieser Probleme im Durchführungsbau im Hinblick auf die besondere Art der Temperaturverteilung und der Wärmeströmung in Hochspannungsdurchführungen beschrieben und gezeigt, was für konstruktive Lösungen für deren Kühlung daraus entwickelt wurden und heute der Anwendung offen stehen. Ausgehend von der rechnerischen Vorausbestimmung von Temperaturverteilungen wird auf die Probleme zeitlich begrenzter Überlastbarkeit von Durchführungen ausführlich eingegangen und ein Verfahren angegeben, die Überlastverhältnisse mittels Kennlinien einfach und übersichtlich darzustellen. Wie anhand von Beispielen erläutert wird, erlaubt diese Darstellung den direkten Vergleich der von den Normen einiger Länder vorgeschriebenen Daten für die strommässige Überlastbarkeit von Transformatoren mit der zulässigen Überlastbarkeit der in die Transformatoren einzubauenden Durchführungen. Schliesslich wird der Weg zur Erstellung solcher Überlastdiagramme mit Hilfe elektronischer Digitalrechner in groben Zügen beschrieben und auf weitere Anwendungen, insbesondere auf die thermische Berechnung von Hochspannungsdurchführungen für wasserstoffgekühlte Generatoren hingewiesen.

Par suite de l'accroissement continu de la tension et de la puissance des grands transformateurs des réseaux de transmission et d'alimentation, les problèmes thermiques relatifs aux traversées pour haute tension gagnent également de l'importance et constituent dans bien des cas déjà un critère déterminant du dimensionnement et de la construction de ces éléments importants des installations électriques. L'exposé décrit toutes les particularités de ces problèmes relatifs à la construction de traversées par suite du genre spécifique de répartition de température et de l'écoulement de chaleur dans les traversées à haute tension et indique les solutions développées et actuellement applicables afin d'assurer leur refroidissement. Partant d'une détermination mathématique des répartitions de température, les problèmes d'une capacité de surcharge temporairement limitée des traversées sont analysés de manière détaillée en indiquant un procédé de représentation graphique simple et claire des rapports de surcharge au moyen de lignes caractéristiques. Illustrée par des exemples, cette représentation permet d'effectuer une comparaison directe des données prescrites par les normes de certains pays au sujet de la capacité de surcharge des transformateurs avec la capacité de surcharge admissible des traversées aménagées dans ces transformateurs. La manière d'établir de tels diagrammes de surcharge à l'aide d'ordinateurs électroniques est enfin esquissée dans les grandes lignes en signalant d'autres applications, en particulier le calcul thermique de traversées à courant maxima pour générateurs, refroidies à l'hydrogène.

1. Einleitung

Thermische Probleme spielen neben elektrischen und mechanischen bei Entwurf und Berechnung elektrischer Grossanlagen, besonders bei grossen Generatoren, Transformatoren, Wandlern usw. seit jeher eine massgebende Rolle. Einen noch zusätzlichen Akzent erfahren sie bei Durchführungen für hohe und höchste Spannungen, und zwar von zwei Gesichtspunkten her.

Zunächst wird bei Hochspannungsdurchführungen die gesamte Spannung von gesteuerten Isolierkörpern aus harz- oder ölgetränktem Papier gehalten, von festen Körpern also, deren Wärmeleitfähigkeit um Grössenordnungen tiefer liegt als die (konvektive) Wärmeleitfähigkeit flüssiger Isolierstoffe, z. B. der Transformatorenöle. Der grosse Vorteil des Öls, gleichzeitig als Isoliermittel und als Kühlmittel zu dienen, kann den Durchführungen daher nicht zugute kommen. Vielmehr benötigen diese auch bei vorzüglicher Potentialsteuerung und hoher elektrischer Ausnützung ein Mehrfaches der Isolierdicke aus festem Isoliermaterial als für die anderen Teile eines Transformators erforderlich ist. Die Folgen sind schlechte Wärmeabfuhr und hohe Temperaturdifferenzen im Isolierkörper.

Hinzu kommt, dass die dielektrische Verlustwärme, die bei anderen Anlageteilen hinter den Jouleschen Stromwärme-

verlusten zurücktritt, bei Durchführungen über 245 kV Nennspannung immer bedeutender, und schliesslich für das Wärmegleichgewicht massgebend wird. Zudem haben die dielektrischen Verluste die unangenehme Eigenschaft, mit steigender Temperatur zuzunehmen, und zwar meist stärker als die Jouleschen Verluste, die bekanntlich mit dem Temperaturkoeffizient des Ohmschen Widerstandes ebenfalls ansteigen. Dies führt bei grossen Durchführungen sehr bald zu thermisch instabilen Verhältnissen; damit wird das Erfassen des Wärmeverhaltens von Durchführungen, das zunächst als Problem eines Temperaturfeldes erscheint, bei grossen Durchführungen zu einem Stabilitätsproblem.

Im folgenden soll gezeigt werden, was für thermische Probleme im Durchführungsbau im einzelnen auftreten und wie sie heute — theoretisch und praktisch — gelöst werden.

2. Stromwärme und Stromdichte in Durchführungen

Bei Durchführungen bis 245 kV Betriebsspannung ist der *Leiterstrom* die für das thermische Verhalten wichtigste Grösse. Die als Wärme in Erscheinung tretende Verlustleistung ist bei einem Strom I und einem Widerstand R bekanntlich:

$$P = I^2 R \quad (1)$$

Die Übertemperatur dagegen stellt sich dar als Verlustleistung mal Wärmewiderstand, also:

$$\Delta \theta = I^2 R R_w \quad (2)$$

wenn R_w den Wärmewiderstand zwischen Leiter und umgebendem Medium bezeichnet.

Im Elektromaschinenbau und im Apparatebau wird nun seit langem die *Stromdichte* J (A/mm²) in vielen Fällen als massgebende Grösse für die thermische Belastung von Leitern benützt. Diese Festlegung ist zweifellos sehr zweckmässig. Wie. Gl. (2) zeigt, stimmt sie dann genau, wenn sowohl R als auch R_w bei k -fachem Strom durch Vergrösserung des Leiterquerschnittes auf den k -ten Teil verkleinert werden. In diesem Falle nämlich bleibt bei unveränderter Stromdichte auch die Übertemperatur unverändert. Dies trifft z. B. immer dann zu, wenn ein Strom durch eine Anzahl gleicher, parallel geschalteter Leiter mit bestimmtem (evtl. genormtem) Querschnitt geführt werden soll, die alle in einem Kühlmedium liegen. Kommen weitere Leiter gleicher Stromdichte hinzu, so ändert sich an der Übertemperatur nichts, da die hinzukommende Verlustwärme durch die ebenfalls hinzukommenden Leiteroberflächen abgeführt wird.

Ganz anders liegt der Fall aber, wenn ein Leiter durch eine Durchführung Strom führen soll. Bringt man hier einen zweiten Leiter gleichen Querschnittes und gleicher Stromdichte in die Durchführung, so steht für die Ableitung der nunmehr doppelten Verlustwärme jetzt nicht mehr das doppelte Wärmeableitvermögen zur Verfügung. Dieses bleibt vielmehr *praktisch gleich*, da es nicht mehr durch die Leiteroberflächen, sondern durch den viel grösseren Wärmewiderstand des Isolierkörpers bestimmt wird. Die Durchführung würde also trotz gleicher Stromdichte um rund 100 % überlastet und bei längerer Dauer der Überlastung schwer beschädigt. Die Stromdichte bildet somit kein brauchbares Mass für die Strombelastbarkeit einer Durchführung. In allen Fällen, in denen Durchführungen mit einem höheren Strom als vom Hersteller angegeben belastet werden sollen, ist vielmehr bei k -fachem Strom der k^2 -fache Leiterquerschnitt erforderlich.

3. Temperaturverteilung in Transformatordurchführungen

Die Temperaturverteilung in Transformatordurchführungen wird im wesentlichen durch den Umstand bestimmt, dass der untere, im Transformator befindliche Teil und der äussere, in die Umgebungsluft ragende Teil einer solchen Durchführung in Medien von sehr unterschiedlichen Temperaturen und Wärmeableitvermögen zu liegen kommen: das Transformatorenöl einerseits mit seinem relativ hohen Wärmeableitvermögen, das überwiegend durch Konvektion ermöglicht wird, hat hohe Betriebstemperatur, und zwar nach in Geltung befindlichen Vorschriften bis 95 °C. Die Umgebungsluft andererseits hat ein schlechtes Wärmeableitvermögen bei Temperaturen von (je nach Klima und Witterungsverhältnissen) —20 °C und darunter bis +40 °C. Es bildet sich daher nicht nur eine radiale, sondern auch eine achsiale Wärmeströmung bei beträchtlichem Temperaturgefälle in der Achsialrichtung aus. Diese Achsialströmung setzt die maximalen Temperaturen erheblich herab, erschwert allerdings andererseits die rechnerische Erfassung des Temperaturfeldes, sodass diese mit elementaren Methoden nicht mehr

möglich ist. Immerhin kann man durch vereinfachende Annahmen die Durchführung sich durch Querschnitte in eine Anzahl Elemente unterteilt denken, die dann mit guter Näherung als lineares Netzwerk aufzufassen sind. Auf diese Weise lässt sich der Temperaturverlauf längs der Trennfläche zwischen Leiterrohr und Isolierkörper, d. i. der Trennfläche zwischen guter und schlechter achsialer Leitfähigkeit, mit guter Näherung berechnen. Solche Rechnungen sind mit Hilfe eines Computers schon in grösserer Zahl ausgeführt und die Resultate im Versuch weitgehend bestätigt worden.

Mit solchen Methoden wurde gefunden, dass die höchste Temperatur im Inneren einer Transformatordurchführung am Isolierrohr in einer Höhe knapp unterhalb des Flansches auftritt. Der Ort wie auch die Höhe dieser höchsten Temperatur hängen aus naheliegenden Gründen stark davon ab, wie weit die Durchführung mit ihrem unteren Teil ins heisse Transformatorenöl eintaucht. Durchführungen mit besonders langem Unterteil, wie sie für den Einbau von Stromwandlern in vielen Fällen verlangt werden, erreichen daher höhere Temperaturen und sind unter sonst gleichen Umständen strommässig weniger belastbar als solche mit normalem oder gar extrem kurzem Unterteil.

4. Thermische Belastbarkeit von Transformatordurchführungen

4.1 Grundsätzliches

Eine Transformatordurchführung darf strommässig so stark belastet werden, dass das Isoliermaterial an der heissesten Stelle unter den ungünstigsten Einflüssen von Stromwärme, dielektrischer Verlustwärme, Öl- und Lufttemperatur die zulässige Temperaturgrenze höchstens erreicht. Ein grosser Teil der in der Durchführung entstehenden und der zum Teil aus dem heissen Transformatorenöl zugeführten Wärme wird über den metallischen Durchführungskopf abgeführt. Dieser steht mit dem Trägerrohr in metallischer Verbindung. Dem achsialen Wärmestrom wird daher ein viel kleinerer Widerstand entgegengesetzt als dem radialen Wärmestrom quer durch Isolierkörper und Porzellanüberwurf. Dem Bestreben, die thermische Belastbarkeit und Ausnutzung einer Durchführung zu erhöhen, bietet sich daher die Möglichkeit, die achsiale Wärmeleitfähigkeit weiter zu verbessern. Eine wichtige, auf diesem Prinzip gründende Lösung besteht in der Anwendung der sog. *thermo-labilen Ölsäule*.

4.2 Erhöhung der thermischen Belastbarkeit mittels thermo-labiler Ölsäure

4.2.1 Wärmeleitfähigkeit

Bekanntlich zeigen Flüssigkeitssäulen in senkrechter oder schräger Aufstellung eine hohe Wärmeleitfähigkeit, allerdings nur in Richtung von unten nach oben. Diese Leitfähigkeit wird durch Konvektion bewirkt, d. h. durch Transport von Flüssigkeitsteilchen, und ein solcher kann wegen der Wärmedehnung von Flüssigkeiten nur stattfinden, wenn ein Wärmestrom in Richtung von unten nach oben fliessen soll (Prinzip der Warmwasserheizung). Um die gute Wärmeleitfähigkeit von solchen Flüssigkeitssäulen für die Wärmeabfuhr bei Transformatordurchführungen ausnützen zu können, muss man zunächst diese Wärmeleitfähigkeit zahlenmässig kennen. Leider gibt es dafür keine allgemein gültigen Werte. Man ist vielmehr darauf angewiesen, die Wärmeleit-

fähigkeit mittels Modellen ähnlicher Abmessungen, wie sie bei Durchführungen in Frage kommen, direkt zu messen. Solche Messungen an Modellen wurden bereits ausgeführt, und zwar mit Isolieröl als Flüssigkeit. Dies kommt für die Verwendung in Durchführungen am ehesten in Frage. Als Wärmeleitfähigkeit ergaben sich beträchtlich hohe Werte. Sie liegen jedenfalls höher als z. B. jener von Kupfer, der, von Silber abgesehen, als höchster metallischer Wärmeleitwert gilt.

4.2.2 Konstruktive Probleme

Nachdem feststand, dass thermo-labile Ölsäulen eine genügend grosse Wärmeleitfähigkeit besitzen, um zur Kühlung von Durchführungen herangezogen zu werden, ergab sich die Frage nach ihrem rationellen konstruktiven Einbau. Es läge zunächst nahe, das Trägerrohr selbst mit Öl zu füllen und als thermo-labile Ölsäule zu verwenden. Dann müsste das Trägerrohr nach unten abgeschlossen und gegen das Transformatorenöl abgedichtet werden. Ferner würde dies besondere Anschlusselemente zwischen Durchführungsleiter und Wicklungsende erfordern, die unter Umständen auch noch elektrisch abgeschirmt werden müssten. Anschlüsse dieser Art wurden mehrfach ausgeführt, sind aber heute, von etlichen Spezialfällen abgesehen, wieder verlassen worden. Viel einfacher und auch für die Montage vorteilhafter ist die heute meist angewandte Methode, die Wicklungsableitung so lang zu machen, dass sie durch das Trägerrohr bis in den Kopf der Durchführung durchgezogen und dort befestigt werden kann. Will man auch in diesem Fall eine thermo-labile Ölsäule anordnen, so kann man das Leiterrohr als Doppelrohr ausführen, das aus zwei konzentrischen Rohren zusammengesetzt ist. Der Zwischenraum zwischen den beiden Rohren wird dann mit Öl gefüllt und nach unten abgedichtet. Solche Lösungen wurden in vielen Fällen ausgeführt und haben sich gut bewährt. Sie erfordern allerdings einigen konstruktiven und fabrikatorischen Aufwand, und kommen daher nur für besonders grosse Durchführungen in Betracht, wo das Problem der Wärmeabfuhr kritisch werden kann (z. B. bei Durchführungen für 400-kV-Netze). Durchführungen für tiefere Spannungen bemisst man vorteilhafter von vornherein so, dass sie den Betriebsstrom mit einer angemessenen Reserve für Überlastungen auch ohne thermo-labile Ölsäule aufnehmen können.

4.3 Erhöhung der thermischen Belastbarkeit bei Unterteilung des Isolierkörpers

Bei Durchführungskörpern, die im Prinzip durch Aufwickeln von Papierbahnen hergestellt werden, bildet die verfügbare Breite der Papierbahn die natürliche Grenze für die Länge der Körper. Die grösstmögliche Körperlänge beträgt damit bei den heute üblichen Papierbreiten rund 3 m; diese Länge ist für Spannungen bis 400 kV ausreichend. Isolierkörper für höhere Spannungen müssen unterteilt und aus mindestens 3 Teilkörpern zusammengesetzt werden. Bei 3 Teilkörpern werden 2 «innere Teilkörper» mit gleichen Aussen- und gleichen Innendurchmessern der Länge nach aneinandergefügt. Der dritte Teilkörper wird über die beiden ersten geschoben und überdeckt den zwischen diesen verbleibenden Spickel. Zwischen inneren und äusseren Teilkörpern sind längsgerichtete Spalten angeordnet, die nach dem Zusammenbau der Durchführung mit Öl gefüllt werden. Dieses Füllöl ist mit dem zwischen Isolierkörper und Por-

zellanüberwurf befindlichen Öl verbunden und wird (mit Ausnahme des Bereichs im Spickel, der aber mit Barrieren unterteilt wird) ebenso wie dieses elektrisch nur mässig beansprucht. Dagegen kann es um die Teilkörper herum zirkulieren und bewirkt so eine Art innere Kühlung des zusammengesetzten Isolierkörpers. Erst die Mitwirkung dieser inneren Kühlung hat es ermöglicht, bei Durchführungen für die höchsten bisher verwendeten Spannungen mit ihren grossen Abmessungen die thermische Stabilität zu garantieren.

5. Überlastprobleme bei Transformatordurchführungen

5.1 Allgemeines

Der heutige Netzbetrieb bringt es mit sich, dass Freilufttransformatoren häufig mit Überlast arbeiten müssen. Zur Zeit der Spitzenlasten in den Versorgungsnetzen werden den Transformatoren für begrenzte Zeit, je nach der Dauer der Spitzenlast (z. B. einige Stunden), Ströme entnommen, die erheblich über den jeweiligen Nennströmen liegen. Die Transformatoren müssen daher thermisch so ausgelegt sein, dass bei solchen Überlasten die für die Isolation noch zulässige Grenztemperatur an keiner Stelle überschritten wird. Dies gilt natürlich auch für die Durchführungen, auch sie müssen den durch Überlasten bedingten thermischen Beanspruchungen gewachsen sein.

Der Notwendigkeit zeitweiliger Überlastung tragen auch verschiedene Vorschriften für Transformatoren Rechnung, indem sie eine Reihe von Überlastfällen definieren und dafür Werte vorschreiben, denen die Transformatoren mindestens entsprechen müssen.

5.2 Definition. Einflussgrössen bei Überlastbetrieb

Jede Überlastbarkeit setzt eine gewisse thermische Reserve voraus, d. h. die Betriebstemperatur im Isolierkörper muss bei Nennlast unter normalen Bedingungen (Lufttemperatur unter 40 °C, Öltemperatur im Transformator unter 90 °C) um einen gewissen Betrag unter der zulässigen Höchsttemperatur liegen. Tritt nach längerem Betrieb mit Nennlast oder einer anderen, kleineren Vorbelastung plötzlich eine Überlast auf, so sind zwei Fälle möglich:

Fall 1: Die Gesamtlast ist kleiner oder gleich der thermisch zulässigen Höchstlast. Dann kann die Durchführung zeitlich unbegrenzt überlastet werden. Liegt diese Gesamtlast schon nahe der zulässigen Höchstlast, so ist eine weitere Laststeigerung allerdings nicht mehr zulässig, auch nicht für kurze Zeit.

Fall 2: Die Gesamtlast ist grösser als die zulässige Höchstlast. Hier darf die Durchführung nur eine begrenzte Zeit überlastet werden. Während dieser Zeit steigt die Temperatur im Isolierkörper bis zu ihrem höchstzulässigen Wert an.

Um Überlastbetrieb im engeren Sinn handelt es sich nur im zweiten Fall, dann also, wenn die auftretende Überlast nur während begrenzter Dauer (meist einige Stunden) auf die Durchführung einwirken darf. Die massgebende Grösse für diesen Fall ist die *zulässige Überlastungsdauer*. Sie wird von folgenden Einflussgrössen bestimmt:

1. Thermische Konstanten der Durchführung;
2. Grösse der Überlast;
3. Grösse der Vorbelastung;
4. Öltemperatur im Transformator;
5. Temperatur der Umgebungsluft.

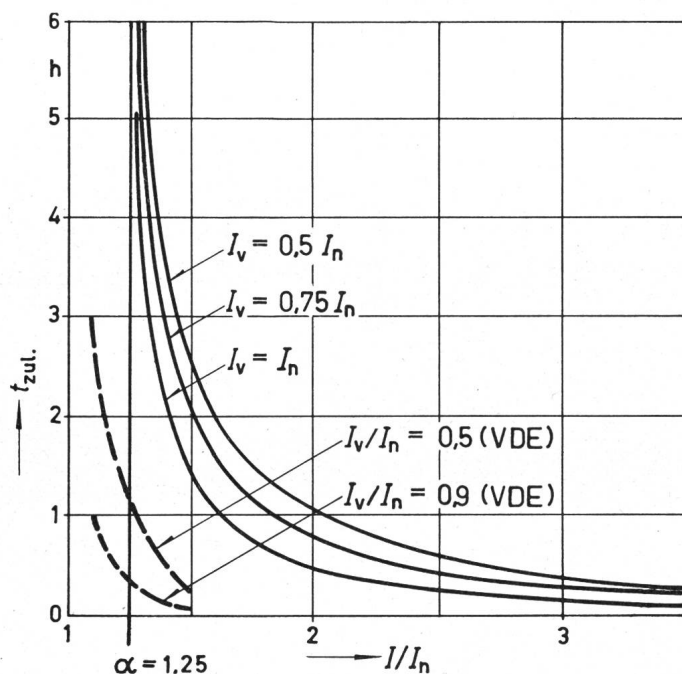


Fig. 1

Überlastkennlinien einer Transformatordurchführung für 52 kV/800 A mit 500 mm Unterteilverlängerung

I/I_n Überlastfaktor; $\alpha = I_{zul.}/I_n$ höchstzulässiger Dauerüberlastfaktor; I_v Vorbelastung bei Eintritt der Überlast; $t_{zul.}$ zulässige Überlastungsdauer in Stunden

— Überlastkennlinien der Durchführung; --- vom VDE geforderte Mindestwerte; Temperaturen: Öl 90 °C, Luft 40 °C

5.3 Graphische Darstellung der Überlastbarkeit

Die Überlastverhältnisse einer Durchführung wie auch eines Transformators lassen sich übersichtlich und sinnfällig mittels Kennlinien in Überlastdiagrammen graphisch darstellen. Diese Diagramme sollen es gestatten, für beliebige Betriebsfälle die zulässige Überlastungsdauer direkt abzulesen.

In einem Diagramm stellt eine einzelne Kennlinie bekanntlich den Zusammenhang zwischen zwei Variablen dar, wobei gewöhnlich der unabhängigen Variablen die Abszisse,

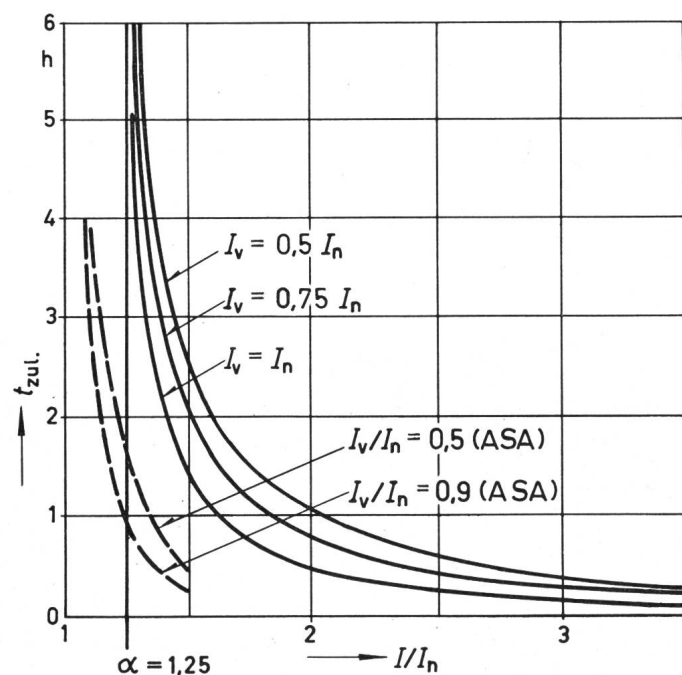


Fig. 2

Wie Fig. 1, aber mit den von der ASA geforderten Mindestwerten

Bezeichnungen und Temperaturen siehe Fig. 1

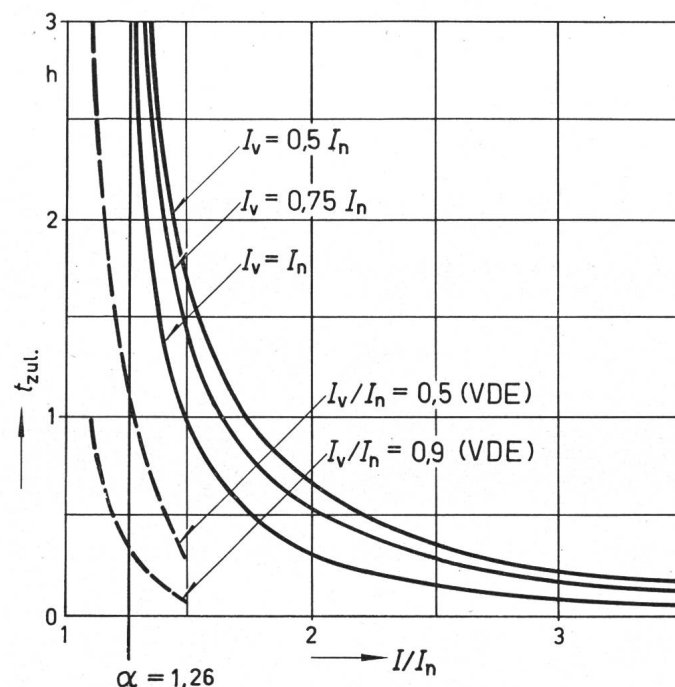


Fig. 3

Überlastkennlinien einer Transformatordurchführung für 36 kV/1000 A

Bezeichnungen und Temperaturen siehe Fig. 1

der abhängigen Variablen die Ordinate zugeordnet wird. Wählt man für die Darstellung anstatt einer einzelnen Kennlinie eine ganze Kennlinienschar mit einem Parameter, so lassen sich zwei unabhängige Variable wiedergeben, wobei eine davon zum Scharparameter gemacht wird. Für die fünf Einflussgrößen, die hier vorliegen, hat man daher zu entscheiden, welche beiden von ihnen sich für die Darstellung in Kurvenblättern am besten eignen. Die thermischen Konstanten der Durchführung kommen hierfür kaum in Betracht, vielmehr wird man zweckmässig für jeden Durchführungstyp ein eigenes Diagramm erstellen. Hingegen erweist

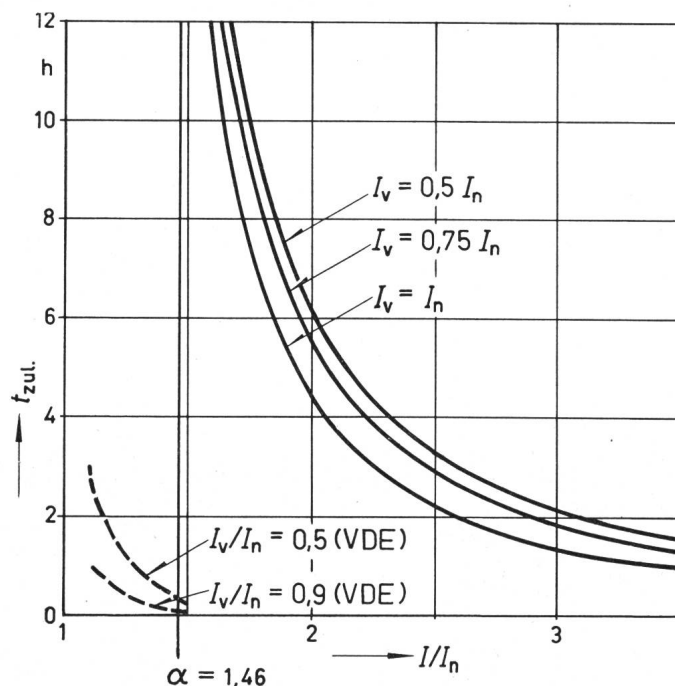


Fig. 4

Überlastkennlinien einer Transformatordurchführung für 170 kV/630 A

Die Nennspannung gegenüber Fig. 3 ist etwa 4,7mal höher; der Ordinatenmaßstab ist vervierfacht

Bezeichnungen und Temperaturen siehe Fig. 1

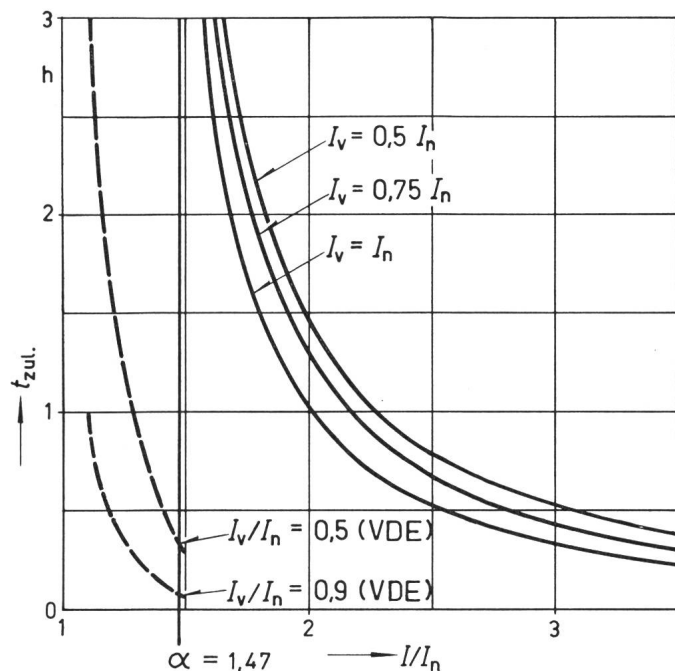


Fig. 5

Überlastkennlinien einer Transformatordurchführung für 73 kV/800 A
Bezeichnungen und Temperaturen siehe Fig. 1

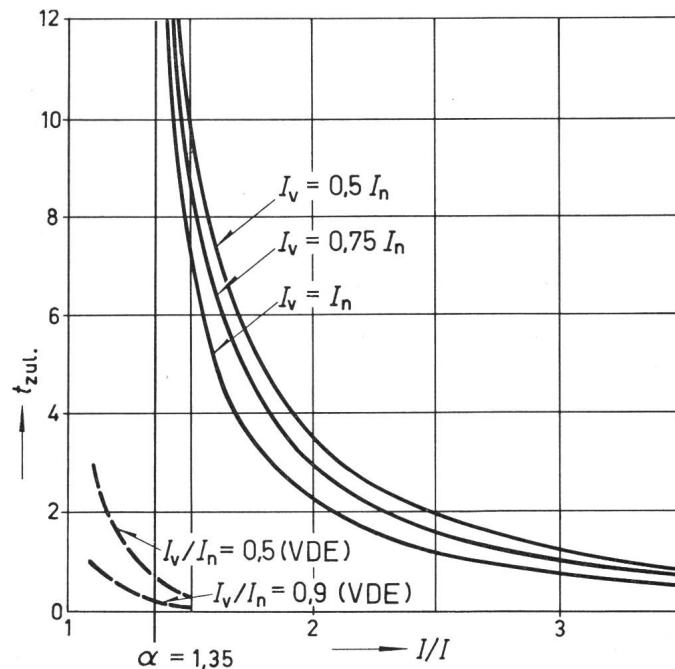


Fig. 7

Überlastkennlinien einer Transformatordurchführung für 145 kV/630 A
Bezeichnungen und Temperaturen siehe Fig. 1

es sich als praktisch, die Grösse der Überlast und die Grösse der Vorbelastung als unabhängige Variable für die Darstellung zu wählen, wobei die Vorbelastung zum Scharparameter gemacht wird. Der Öltemperatur im Transformator und der Lufttemperatur wird dagegen je ein Maximalwert vorgeschrieben und dieser als konstant angenommen. Für diese beiden Grössen sind in den Normen ohnehin Maximalwerte vorgeschrieben. Die Diagramme Fig. 1...8 wurden daher für 90 °C Öltemperatur im Transformator und 40 °C Lufttemperatur ausgelegt. Auf jedem Diagramm ist die zulässige Überlastungsdauer in Stunden über dem Überlastfaktor

(= Überlaststrom/Nennstrom) aufgetragen. Die drei Kurven gelten für je drei verschiedene Vorbelastungen: 0,50 I_n , 0,75 I_n und für 1,0 I_n .

Die Vorbelastung tritt also als Parameter der Kurvenschar auf. Es wäre im Prinzip möglich und für den praktischen Gebrauch durchaus sinnvoll, nicht die Vorbelastung, sondern die Lufttemperatur als Scharparameter zu wählen, was im Transformatorenbau gelegentlich auch schon geschehen ist. Eine solche Darstellung hätte den Vorteil, die Steigerung der Überlastbarkeit bei tiefen Temperaturen (z. B. im Winter) erfassen und für den Betrieb ausnützen zu kön-

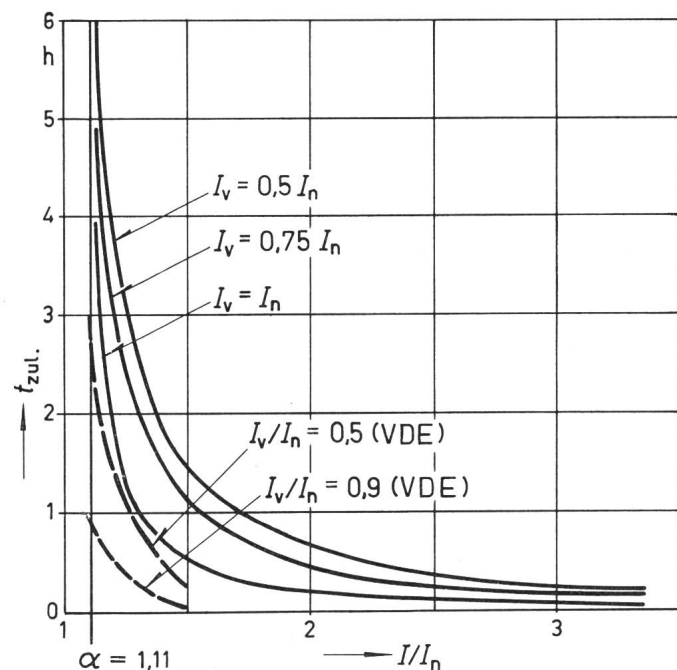


Fig. 6

Überlastkennlinien der gleichen Durchführung wie in Fig. 5, aber mit 500 mm Unterteilverlängerung
Die Überlastkennlinien sind gegenüber Fig. 5 nach links verschoben und verformt
Bezeichnungen und Temperaturen siehe Fig. 1

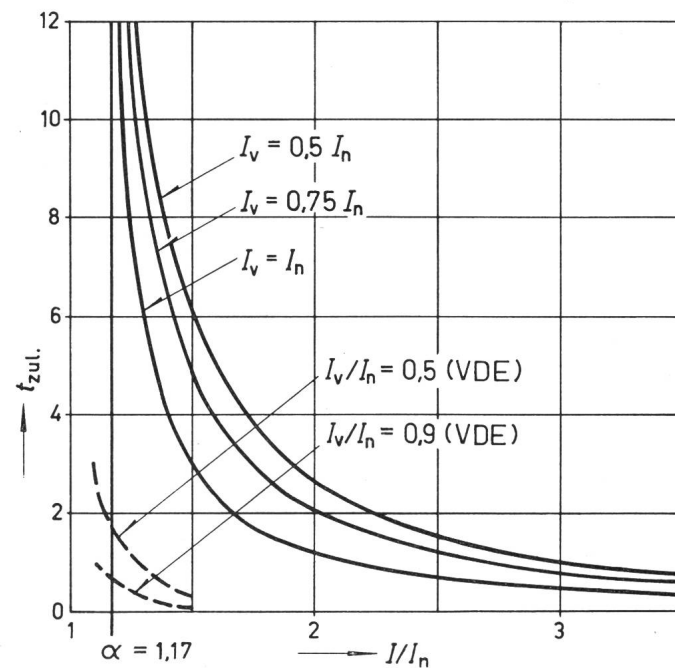


Fig. 8

Überlastkennlinien der gleichen Durchführung wie in Fig. 7, jedoch mit 500 mm Unterteilverlängerung
Die Überlastkennlinien sind nach links verschoben und verformt, aber bei doppelter Nennspannung schwächer als in Fig. 6
Bezeichnungen und Temperaturen siehe Fig. 1

nen. Sie würde jedoch nicht erlauben, die aus dem Diagramm abgelesenen Überlastwerte direkt mit jenen zu vergleichen, die von den Vorschriften gefordert werden. Hiefür wäre vielmehr eine Umrechnung erforderlich, was für rasche Ermittlungen unerwünscht sein kann.

Überlastbarkeit ölgekühlter Transformatoren
nach VDE 0532/8.64

Tabelle I

I/I_n	t_{zul} bei $I_V/I_n = 0,9$ min	t_{zul} bei $I_V/I_n = 0,5$ min
1,10	60	180
1,20	30	90
1,30	15	60
1,40	8	30
1,50	4	15

Bezeichnungen: I/I_n Überlastfaktor; I_V Vorbelastung bei Eintritt der Überlast; t_{zul} zulässige Überlastungsdauer

Überlastbarkeit ölgekühlter Transformatoren
nach ASA C 57.32 (e)

Tabelle II

I/I_n	t_{zul} bei $I_V/I_n = 0,9$ min	t_{zul} bei $I_V/I_n = 0,5$ min
1,09	240	—
1,10	—	240
1,14	120	—
1,21	—	120
1,24	60	—
1,34	—	60
1,36	30	—
1,50	—	30

Bezeichnungen siehe Tabelle I.

5.4 Vorschriften für den Überlastbetrieb

Demgegenüber bietet die hier verwendete Darstellungsart den wesentlichen Vorteil, Überlastwerte des Objekts (hier der Durchführung) mit jenen Überlastwerten direkt vergleichen zu können, die von geltenden Vorschriften für Transformatoren vorgeschrieben werden.

In den Normen ASA C 57.32 (e) und VDE 0532/8.64 werden eine Reihe von Überlastungsfällen in folgender Weise definiert: Bei vorgegebener Öl- und Lufttemperatur werden jedem Wert einer Reihe von Gesamtlasten zwischen $1,1 I_n$ und $1,5 I_n$ je zwei Überlastungsdauern zugeordnet, und zwar je eine für die Vorbelastung $0,5 I_n$ und $0,9 I_n$. Die entsprechenden Werte nach VDE sind in Tabelle I eingetragen, die analogen Werte nach ASA in Tabelle II. Man erkennt leicht, dass sich diese Tabellenwerte direkt als Punkte in die beschriebenen Diagramme eintragen und zu Linienzügen verbinden lassen. Somit sind die von den Normen vorgeschriebenen und die tatsächlich zulässigen Überlastwerte einer Durchführung im gleichen Kurvenblatt graphisch dargestellt. In der hier verwendeten Darstellungsart sind die zulässigen Überlastungsdauern mit ausgezogenen, die von den Vorschriften verlangten mit gestrichelten Kurven eingetragen. So zeigt z. B. Fig. 1 für eine Durchführung für 52 kV/800 A mit 500 mm Unterteilverlängerung die verlangte Überlastbarkeit nach VDE, Fig. 2 jene nach ASA, jeweils im Vergleich zu der tatsächlich zulässigen Überlastung.

Aus der beschriebenen Darstellungsart folgt, dass die Überlastkennlinien jeder Durchführung auf eine ordnatensparallele Asymptote zulaufen. Deren Schnittpunkt mit der

Abszisse markiert auf dieser den jeweils *höchstzulässigen dauernden Überlastfaktor* I_{zul}/I_n . Er wird in jedem Diagramm eingetragen und hier z. B. mit α bezeichnet. Hingegen laufen die gestrichelten Überlastkennlinien nicht auf eine bestimmte Asymptote zu, weil die genannten Vorschriften für Überlastfaktoren unter 1,1 keine bestimmte Überlastungsdauer vorschreiben.

Eine Durchführung entspricht somit den Vorschriften bezüglich Überlastbarkeit dann, wenn ihre Überlastkennlinien im Diagramm oberhalb derjenigen der Vorschriften liegen. Die Überlastkennlinien der Transformatorwicklung müssen im Diagramm selbstverständlich ebenfalls oberhalb der gestrichelten Linien liegen, welche die von den Vorschriften verlangten Mindestwerte der Überlastbarkeit darstellen. Im allgemeinen werden die Wicklungskennlinien in den Diagrammen zwischen den durch die Vorschriften definierten und denjenigen der Durchführungen liegen, das heisst, dass im Überlastungsfall die thermische Reserve der Wicklung früher erschöpft wird als jene der Durchführungen. Ausnahmen hievon können bei einigen thermisch besonders hoch ausgenützten Durchführungen vorkommen, deren thermische Reserve somit kleiner wäre als jene der Wicklung. Sie sind jedoch immer noch grösser als der von den Vorschriften verlangte Mindestwert.

5.5 Einfluss der Durchführungsgrösse und der Unterteilverlängerung auf die Überlastbarkeit

Die thermischen Zeitkonstanten von Durchführungen werden von verschiedenen Faktoren bestimmt, sind aber jedenfalls annähernd ihrem Gewicht proportional. Andererseits haben Durchführungen mit Seilleiter für einen bestimmten Nennstrom bei allen Spannungen üblicherweise die gleichen Seilquerschnitte und folglich auch die gleiche Verlustwärme pro Längeneinheit. Daher erwärmen sich grosse Durchführungen langsamer als kleine und haben unter sonst gleichen Voraussetzungen eine höhere Überlastungsdauer. Dies zeigt als Beispiel der Vergleich der Fig. 3 mit 4. Die Kurven in Fig. 4 würden viel höher liegen als jene von Fig. 3. Um jedoch mit der gleichen Bildfläche auszukommen, wurde in Fig. 4 der Ordinatenmaßstab vervierfacht. Durchführungen für 170 kV/630 A, deren Überlastkennlinien Fig. 4 zeigt, sind in Fig. 9 im eingebauten Zustand zu sehen.

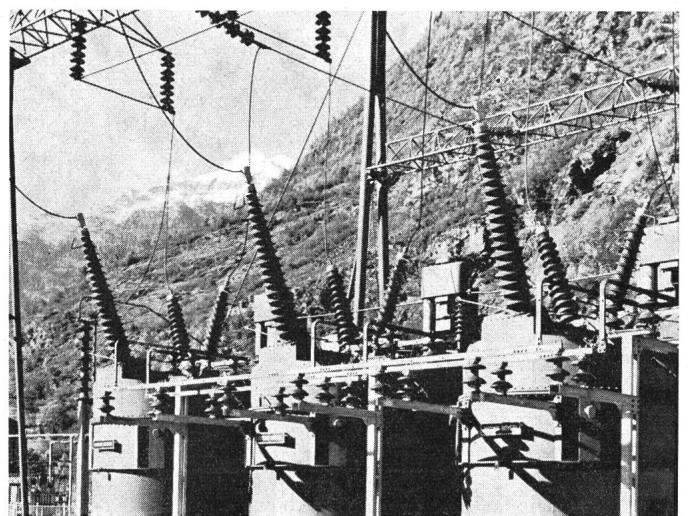


Fig. 9
Kondensatordurchführungen für 245 kV und 170 kV im Betrieb
Transformatoren in einem Tessiner Unterwerk

Tabelle III

I_v/I_n	Ausgangsttemperatur in °C bei Kühlungsart	
	S, F	SU, FU, WU
0,5	55	49
0,75	68	60
0,9	78	68

S Selbstkühlung; F erzwungene Luftkühlung; SU Selbstkühlung und Ölumlaufl; FU erzwungene Luftkühlung und Ölumlaufl; WU Wasserkühlung und Ölumlaufl.
Weitere Bezeichnungen siehe Tabelle I.

Durchführungen, die mit Unterteilverlängerung für Stromwandleranbau ausgeführt sind, haben stets bedeutend kleinere thermische Reserven als die gleichen Durchführungen ohne Verlängerung. Dies rührt daher, dass der ins heisse Öl tauchende Teil der Durchführung erheblich verlängert wird, der Luftteil jedoch gleich bleibt. Der höchstzulässige Dauerstrom wird also herabgesetzt, die Kennlinien werden samt Asymptote nach links verschoben und überdies in der Weise verformt, dass sie in den von der Asymptote und der Abszisse gebildeten Winkel hineingedrückt werden. Sind die Kurvenblätter eines bestimmten Durchführungstyps sowohl für die Ausführung ohne Unterteilverlängerung als auch für jene mit grösstmöglicher Unterteilverlängerung verfügbar, so können Werte mit beliebiger Unterteilverlängerung mit genügender Genauigkeit interpoliert werden.

Auf die Gesamtlänge bezogen, machen Unterteilverlängerungen bei kleinen Durchführungen mehr aus als bei grossen. Daher ist auch ihr Einfluss auf die strommässige Überlastbarkeit bei kleinen Durchführungen grösser, bei grossen Durchführungen kleiner. Dies veranschaulicht der Vergleich der Fig. 5 und 6 mit 7 und 8. Beide Durchführungen weisen eine Unterteilverlängerung von 500 mm auf. Bei der kleineren Durchführung sinkt der höchstzulässige Dauerstrom um 36 %, bei der grösseren um 18 % des Nennstromes.

5.6 Abweichungen der Rechnungsgrundlagen von den Vorschriften

Die Vorschriften legen bezüglich der Öl- und Lufttemperatur etwas andere Voraussetzungen fest, als den hier gerechneten Kennlinien aus praktischen Gründen zugrunde gelegt wurden. Die folgende Betrachtung zeigt jedoch, dass trotzdem sowohl verlangte wie auch tatsächlich gerechnete Überlastwerte von Durchführungen im gleichen Kurvenblatt dargestellt werden können.

Während den hier gerechneten Kennlinien konstante Öl- und Lufttemperaturen von 90 bzw. 40 °C zugrunde liegen, setzen die Normen folgendes fest:

a) *Öltemperatur:* Sowohl ASA als auch VDE legen für den heissesten Punkt 95 °C als Maximalwert fest. Bei Überlastbetrieb gilt dies für das Ende der Überlastungsdauer. Die Öltemperatur zu Beginn der Überlastung muss natürlich niedriger sein, wobei die VDE-Normen für verschiedene Vorbelastungen und Kühlungsarten die in Tabelle III aufgeführten Werte angeben.

b) *Lufttemperatur:* Sowohl ASA wie VDE legen fest: Höchsttemperatur 40 °C; Tagesdurchschnitt 30 °C.

Zu a): Während der Überlastung wurde gemäss 5.3 die Öltemperatur für die Rechnung, der Einfachheit halber, als konstant angenommen. In Wirklichkeit steigt sie aber von einem von der Vorbelastung abhängigen Wert bis auf höchstens 95 °C an, und zwar mit einer anderen Zeitkonstanten als jener der Durchführung. Daraus ergibt sich, dass die Erwärmung der Durchführung nicht genau einer Exponentialfunktion folgt, wie es die Lösung der Erwärmungsgleichungen verlangen würde. Es ist aber leicht zu zeigen, dass die dadurch entstehende Ungenauigkeit sich nach der sicheren Seite hin auswirkt. Und zwar deshalb, weil praktisch in allen Fällen der grössere, anfängliche Teil der Überlastperiode sich bei einer Öltemperatur von unter 90 °C abspielt. Dadurch bleibt die Erwärmung der Durchführung hinter den gerechneten Werten zurück um einen Betrag, der im zweiten, kürzeren Teil nicht mehr eingeholt oder gar überschritten werden kann, zumal auch die Lufttemperatur laut Normen, zumindest für mehrstündige Perioden, mit weniger als 40 °C anzunehmen ist.

Zu b): Da die Normen für die Lufttemperatur 40 °C nur als Maximalwert, als maximalen Tagesdurchschnitt aber nur 30 °C festsetzen, liegen die Rechnungswerte hier ohnehin auf der Seite grösserer Sicherheit.

Aus dieser Betrachtung folgt, dass die hier beschriebenen Überlastdiagramme von der Wirklichkeit insofern abweichen, als sie den Erwärmungsvorgang des Transformatorenöls nicht einbeziehen, sondern von einer konstanten Öltemperatur ausgehen. Man erkennt aber gleichwohl, dass trotz dieser von der Wirklichkeit abweichenden Voraussetzung der Vergleich der in das gleiche Diagramm eingezeichneten Kennlinien von geforderten und errechneten Überlastwerten durchaus zulässig und sinnvoll ist.

5.7 Berechnungsmethoden. Anwendung elektronischer Digitalrechner

Die Berechnung der Überlastkennlinien geschieht im wesentlichen in folgenden zwei Arbeitsgängen.

Im ersten Arbeitsgang wird die Temperaturverteilung längs der inneren Begrenzungsfläche des Isolierkörpers berechnet. Zu diesem Zweck wird die Durchführung in viele kleine Abschnitte unterteilt, die zusammen als «thermisches Netzwerk» aufgefasst und berechnet werden können. Dadurch wird es möglich, mit den Methoden der linearen Netzberechnung sämtliche Wärmeübergänge der Durchführung zu erfassen. Ausser den radialen Wärmeströmen gegen Öl und Luft werden dabei auch die achsialen Wärmeströme im Träger- bzw. Leiterrohr und in einer in manchen Fällen vorhandenen thermo-labilen Ölsäule miterfasst.

Die entstehende Verlustwärme entstammt zwei verschiedenartigen Wärmequellen, nämlich den Jouleschen Wärmeverlusten im Stromleiter und den dielektrischen Verlusten im Isolierkörper. Beide werden von der Rechnung erfasst und verarbeitet. Als Ergebnis dieses Rechnungsganges erhält man die Temperaturverteilung im Isolierkörper längs des Trägerrohres der Durchführung bei bestimmter Spannung und bestimmtem Strom. Sie zeigt an, wo der heisseste Punkt liegt und wie stark er sich erwärmt.

Der zweite Rechnungsgang geht aus von der gegebenen Temperaturverteilung bei bestimmter Belastung, die also in obigen Betrachtungen der sog. Vorbelastung entspricht. Mit Hilfe der thermischen Konstanten der Durchführung und der Grundgleichungen für die Erwärmung und Abkühlung von Körpern mit inliegenden Wärmequellen werden nun alle Kennlinien der beschriebenen Diagramme punktweise gerechnet. Diese Grundgleichungen führen auf lineare Differentialgleichungen erster Ordnung, die sich leicht analytisch lösen lassen.

Beide Rechnungsgänge sind vom mathematischen Standpunkt aus sehr einfach. Sie bestehen aber aus derart vielen elementaren Operationen, dass ihre Ausführung mittels Rechenschieber und Tischrechenmaschine mit vernünftigem Zeitaufwand nicht mehr möglich ist. Aus diesem Grunde wurden für beide Rechnungsgänge Rechenprogramme entwickelt, die es erlauben, diese Rechnungen auf einem elektronischen Digitalrechner auszuführen. Damit steht für den Durchführungshersteller die Möglichkeit offen, für alle listenmässig hergestellten Typenreihen von Transformator-durchführungen solche Kurvenblätter zu erstellen. Aus ihnen kann man das gesamte thermische Verhalten eines beliebigen Durchführungstyps leicht überblicken und die zulässige Überlasterdauer für jeden beliebigen Betriebsfall sofort ablesen. Wie unter 5.5 erwähnt, kann man auch alle Durchführungstypen mit Unterteilverlängerung für Stromwandleranbau hier einbeziehen. Man braucht dafür nur pro Durchführungstyp je ein zusätzliches Kurvenblatt für die Ausführung mit grösstmöglicher Unterteilverlängerung zu erstellen.

5.8 Weitere Anwendungen

Die Programme ermöglichen es auch, ähnliche Kurvenblätter für die verschiedensten Spezialtypen von Durchführungen zu berechnen, auch bei beliebiger Änderung sämtlicher Einflussgrössen. Es lassen sich also z. B. Vorbelastung, Öl- und Lufttemperatur, Wärmeleitfähigkeit von Metallrohr, Isolierkörper und thermo-labiler Ölsäule, Wärmeübergangszahlen gegen Öl und Luft, sämtliche Abmessungen der Durchführungen einschliesslich Unterteilverlängerung usw. unabhängig voneinander variieren. Jede dieser Variationen kann durch einen einfachen Befehl, der in bequemer Weise vor die Eingabedaten gesetzt werden kann, leicht durchgeführt werden.

Ein besonders wichtiges Anwendungsgebiet hat sich für diese Programme bei der Entwicklung von Hochstromdurchführungen für wasserstoffgekühlte Generatoren aufgetan. Bei solchen Durchführungen tritt an die Stelle des Transformatoröls als Umgebungsmedium der Wasserstoff des Generators als Umgebungs- und gleichzeitig als Kühlmedium. Die Probleme werden dabei allerdings insofern noch bedeutend ver-

wickelter, als ausser der Wasserstofftemperatur als entscheidende Einflussgrössen noch der Betriebsdruck und die Strömungsgeschwindigkeit dieses Kühlgases hinzukommen. Es ist aber gelungen, auch für solche Durchführungen unter voller Berücksichtigung dieser zusätzlichen Faktoren das thermische Verhalten zuverlässig vorauszuberechnen. In umfangreichen Versuchen, für deren Durchführung sich verschiedene Hersteller von Turbogeneratoren zur Verfügung gestellt haben, konnten die vorausgerechneten Werte nachgemessen werden. Dabei ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den vorausgesagten Temperaturwerten. Abweichungen davon in der Grössenordnung bis zu 10 % traten ausschliesslich nach der sicheren Seite hin auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die für bestimmte Betriebszustände des Kühlgases massgebenden Wärmeleitwerte eher vorsichtig angenommen wurden. Im ganzen aber lieferten diese Versuche einen Beweis für die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der beschriebenen Methode zur Erfassung des thermischen Verhaltens von Hochspannungsdurchführungen.

Literatur

- [1] H. Gröber, S. Erk und U. Grigull: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. 3. Auflage, Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1955.
- [2] VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. VDI-Verlag, Düsseldorf 1957.
- [3] R. Küchler: Die Transformatoren. Grundlagen für ihre Berechnung und Konstruktion. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1956.
- [4] H. Kappeler: 380-kV-Durchführungen. In: Fortschritte der Hochspannungstechnik. Herausgegeben von W. O. Schumann und H. Prinz. Bd. 2: 380 kV Drehstromübertragung. Geest und Portig, Leipzig 1954, S. 179...199.
- [5] H. Kappeler: Hartpapierdurchführungen für Höchstspannungen. Bull. SEV 40(1949)21, S. 807...815.
- [6] H. Kappeler: Die Bedeutung des Verlustfaktors für die Beurteilung von Kondensatordurchführungen. E u. M 68(1951)3, S. 43...48.
- [7] H. Kappeler: Réalisations récentes de traversées pour transformateurs 380 kV. Rapport CIGRE No. 126, 1958.
- [8] V. Aigner: Aussere Kühlung von Transformatoren. ETZ-A 79(1958)19, S. 680...687.
- [9] A. Melchinger: Beherrschung der Erwärmungs- und Kurzschlussprobleme bei Grosstransformatoren. ETZ-A 81(1960)2, S. 47...52.
- [10] H. Kappeler: Durchführungen für extrem hohe Spannungen. Bull. SEV 55(1964)11, S. 545...548.

Adresse des Autors:

G. Krasser, dipl. Ingenieur, Micafil AG, 8048 Zürich.

Ableitung und praktische Auswertung der Zustandsgleichung eines Seiles mit beliebig vielen Einzellasten

Von J. Hügi, Luzern

624.071.2

Die durchgeführte Ableitung entspricht einem Bedürfnis der Praxis, über eine einfache, dem wirklichen Sachverhalt jedoch möglichst nahekommende Gleichung zu verfügen, welche den Einfluss sowohl einer variablen Streckenlast als auch veränderlicher Einzellasten auf den Spannungszustand eines Seiles berücksichtigt. Zur Abschätzung des Gültigkeitsbereiches der Gleichung für die Durchhangsberechnung wird die Arbeit ergänzt durch eine Fehlerbetrachtung, und schliesslich ist im Anhang ein Beispiel aus der Praxis durchgerechnet, welches dem Praktiker die Anwendung der abgeleiteten Formeln erleichtern soll.

Le développement effectué répond à un besoin de la pratique de disposer d'une équation simple, se rapprochant le plus possible de la situation réelle, permettant de déterminer l'état de la tension d'un fil, soumis à l'influence d'une charge variable répartie sur toute la longueur, ainsi qu'à plusieurs charges simples et variables.

Pour l'estimation des limites de validité de l'équation du calcul de la flèche, l'étude est complétée par une considération d'erreur, et finalement, on trouve en annexe un exemple de calcul qui devrait faciliter au praticien l'emploi des formules développées.

1. Einleitung

Der nachfolgenden Ableitung einer Zustandsgleichung eines Seiles mit beliebig vielen Einzellasten liegen folgende vereinfachende Annahmen zugrunde:

a) Das Seil hängt beweglich an zwei gleich hohen, starren Aufhängepunkten.

b) Die Einzellasten sind alle gleich gross und verteilen sich mit untereinander konstanten Abständen symmetrisch zwischen den Seilaufhängepunkten.