# Elektrische Felder in Transformatoren

Autor(en): **Sie, T.H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **66 (1975)**

Heft 4

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915258

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

**Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

**http://www.e-periodica.ch**

# Elektrische Felder in Transformatoren

Von T. H. Sie

621.314.21 : 537.212

*Mit stets höher werdenden Übertragungsspannungen wächst das Bedürfnis, die Isolation im Transformator optimal auszulegen. Dafür ist zunächst die Kenntnis der spezifischen elektrischen Festigkeiten der angewendeten Isolationssysteme erforderlich. Überdies müssen die lokalen Feldstärken bei den vielfältigen Spannungsbeanspruchungen im Transformator bekannt sein. Der vorliegende Aufsatz befasst sich mit den elektrischen Feldern im Transformator zur Erfassung der hochbeanspruchten Stellen sowohl bei quasistationären Vorgängen als auch bei flüchtigen Überspannungen. Er soll Hinweise vermitteln über eine zweckmässige Auslegung der Isolation. Eine Diskussion über die Auslegungskriterien ist nicht sinnvoll, da sie sehr eng verbunden sind mit den Herstellungsmöglichkeiten und der Sorgfalt der Fabrikation.*

*Du fait de l'élévation de plus en plus grande des tensions dans les transports d'énergie électrique, l'isolement dans les transformateurs doit être optimal. Pour cela, il faut tout d'abord connaître les rigidités diélectriques des systèmes d'isolement utilisés. En outre, il faut connaître la répartition du champ électrique pour les différents types de tensions appliquées au transformateur. L'auteur traite des champs électriques pour déterminer les points fortement sollicités dans le transformateur, aussi bien lors de phénomènes quasi stationnaires, que lors de surtensions passagères. Il donne des indications au sujet d'une conception judicieuse de l'isolement. Une discussion sur les critères de conception ne serait guère utile, car ils dépendent très étroitement des possibilités de fabrication et du soin apporté à celle-ci.*

## 1. Einleitung

Transformatoren hoher Leistung für die Energieübertragung haben fast ausschliesslich Mineralöl als Kühl- und Tränkmittel in Kombination mit Zellulose als festem Isoliermaterial. Trotz der ungerechten Feldstärkeverteilung in der Isolation – das feste Material mit seiner höheren elektrischen Festigkeit wird infolge der grösseren Dielektrizitätszahl weniger beansprucht als das Öl – hat das Isolationssystem Mineralöl–Zellulose sich gut bewährt. Den nachfolgenden Betrachtungen liegt daher das System Mineralöl – Zellulose zugrunde. Insbesondere bei hohen Nennspannungen ist der Volumenanteil der Isolation gross. Da grosse Ölstrecken eine geringere spezifische elektrische Festigkeit aufweisen als kleinere Ölkanäle, werden sie, falls erforderlich, durch Isolierbarrieren unterteilt. Fig. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Isolation bei Transformatoren mit Zylinderwicklung und anliegendem Ölkanal. Sie lässt sich wie folgt unterteilen:

a) Windungsisolation;
b) Spulenisolation;
c) Hauptisolation;
d) Endabstand.

## 2. Windungsisolation

Die höchstbeanspruchte Partie der Windungsisolation einer gesteuerten Wicklung [1] [1]) bei betriebsfrequenter Wechselspannung wird rechnerisch untersucht. Fig. 2 zeigt den interessierenden Teil eines Längsschnitts der Wicklung durch eine Distanzierung zwischen zwei Scheibenspulen. Der Symmetrie wegen konnte die Untersuchung auf die Windungsisolation und Ölspickel einer der beiden Spulen beschränkt werden. Dabei gilt für das Verhältnis der Dielektrizitätszahlen von Öl, Papier und Transformerboard 1 : 1,5 : 2. Der beidseitige Papierauftrag sei 2 mm, Rundungsradius des Flachkupfers 1 mm und der Abstand zwischen den Scheibenspulen gleich 5 mm angenommen.

Das Papier wird im planen Teil mit 50 % der Windungsspannung $U_w$/mm beansprucht. Im gekrümmten Teil ist die maximale Feldstärke im Papier 69 % $U_w$/mm, d. h. um 38 % höher als im planen Teil. Normalerweise liegen die maximalen Feldstärken im Papier sowohl bei Stoss- als auch bei Wechselspannung weit unterhalb der entsprechenden zulässigen Werte. Die Berechnung ergab ferner, dass die Beanspruchung im Ölspickel zwischen den Feldlinien 1 und 2 bis 33 % grösser sein kann als die im planen Teil zwischen den Windungen. Die Erfahrung hat auch gezeigt, dass für die Isolation zwischen Windungen der Ölspickel die kritische Stelle darstellt [2].

Eine Entlastung des Ölspickels ist nur dann möglich, falls die Dielektrizitätszahlen der festen Isoliermaterialien jener des Tränkmittels angepasst werden können. Ist bei der untersuchten Anordnung das Verhältnis der Dielektrizitätszahlen überall gleich 1, so ist eine Verbesserung der elektrischen Festigkeit um ca. 30 % zu erwarten. Die Beanspruchung des festen Materials wird dabei kaum beeinflusst.

## 3. Spulenisolation

Die Auslegung der Spulenisolation hängt eng zusammen mit der Berechnung der elektrischen Festigkeit längs der Wicklung. Dabei ist in erster Linie die Stossbeanspruchung massgebend. Bei der Stossprüfung von Transformatoren tritt

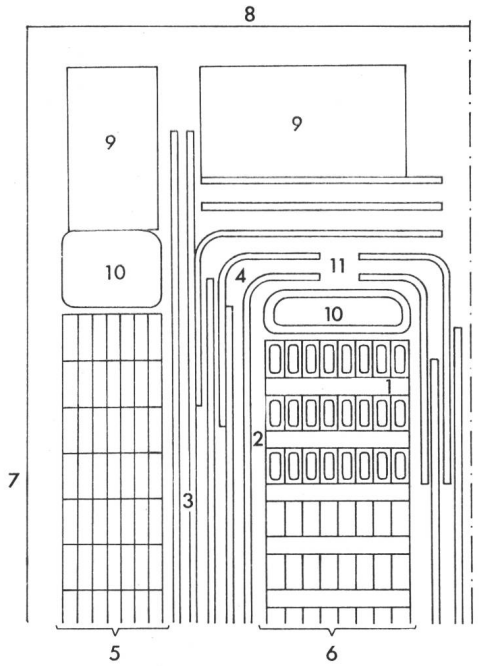


**Fig. 1 Prinzipieller Aufbau der Transformatorisolation**

*1* Windungsisolation
*2* Spulenisolation
*3* Hauptisolation
*4* Endabstand
*5* Unterspannungswicklung
*6* Oberspannungswicklung
*7* Kern
*8* Joch
*9* Pressring
*10* Schutzring
*11* Kappe

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

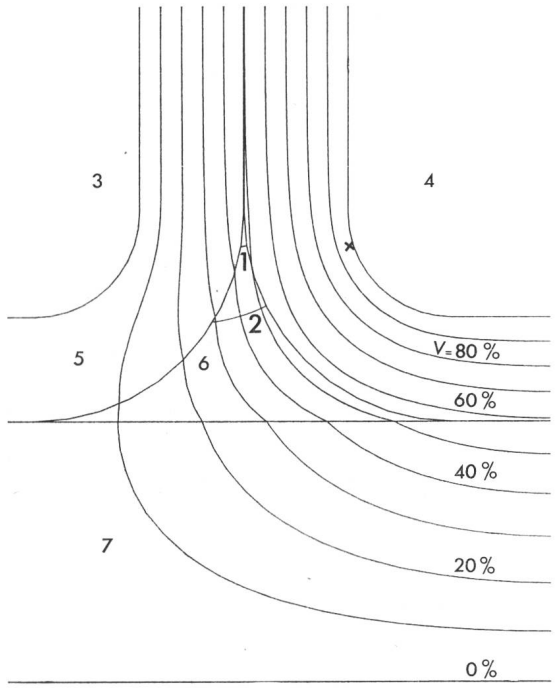


**Fig. 2 Elektrisch höchstbeanspruchter Teil der Windungsisolation**

| | |
|---|---|
| × | maximal beanspruchte Stelle im Papier |
| *V* | Potentiale bezogen auf die Windungsspannung |
| *1* und *2* | Feldlinien senkrecht zu den Äquipotentiallinien im Ölspickel |
| *3* | Kupferleiter 0 % |
| *4* | Kupferleiter 100 % |
| *5* | Papierisolation |
| *6* | Öl |
| *7* | Transformerboard-Distanzstück |

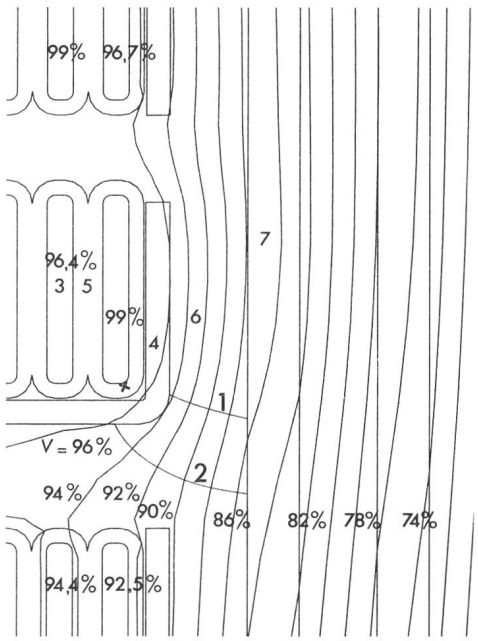


**Fig. 3 Achsialer Schnitt des Wicklungseinganges und elektrisch höchstbeanspruchte Spulenkante**

Äquipotential- und Feldlinien 2,5 µs nach Stossbeginn

*V* Potentiale bezogen auf die Eingangsspannung
*4* Transformerboard-Käppchen
*7* Transformerboard-Hülse

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 2

am Anfang der Stoßspannung längs der Wicklung eine nicht lineare Spannungsverteilung auf, wobei die Eingangsspulen stärker beansprucht sind als jene in der Mitte oder am Ende der Wicklung. Dies ist auf den ungünstigen Einfluss der Kapazitäten gegen Erde zurückzuführen. Um den schlechten Einfluss der Erdkapazitäten klein zu halten, wird durch besondere Massnahmen die kapazitive Kopplung zwischen den Wicklungsteilen unter sich erhöht. Dies kann u. a. dadurch erreicht werden, dass die Windungen ineinander verschachtelt gewickelt werden [1] [1]). Es wird eine gleichmässigere Spannungsverteilung längs der Wicklung angestrebt, um einerseits die Beanspruchung zwischen Spulen herabzusetzen und andererseits die Festigkeit längs der Wicklung zu erhöhen.

Für die Auslegung der Spulenisolation sind oft einfache Bemessungsregeln ausreichend. Zur Beurteilung der Längsfestigkeit einer Wicklung aber sind überdies noch Potentialfelder und lokale Feldstärken an der höchstbeanspruchten Spulenkante im kritischen Zeitpunkt erforderlich. Dieser Zeitpunkt tritt auf, sobald die örtliche Feldstärke an der Spulenkante im Öl ihren Höchstwert erreicht. Dies kann entweder durch die maximale radiale Beanspruchung oder durch das maximale Längsfeld oder durch das Zusammenwirken beider Komponenten verursacht werden. Die maximale Beanspruchung längs der Wicklung muss nicht unbedingt mit der sog. Anfangsverteilung zusammenfallen [3]. Die Wicklungsanordnung und Schaltung bei der Stossprüfung spielen dabei eine wesentliche Rolle. Ist nun aus der Geometrie und Materialeigenschaften die zeitabhängige Potentialverteilung im interessierenden Bereich bekannt, so können die elektrischen Felder in der Isolation in einem beliebigen Zeitpunkt berechnet werden.

Fig. 3 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Isolation am Wicklungseingang im interessierenden Bereich. Die hochbeanspruchte Spulenkante wird durch eine Transformerboardkappe direkt abgeschirmt. Das elektrische Feld wurde für den Zeitpunkt 2,5 µs nach Beginn der Stoßspannung berechnet. Sie gilt demnach für die Anfangsverteilung. Dabei ist die maximale Spannungsdifferenz zwischen zwei Spulen 6,5 % der Prüfspannung. Auch bei Stossbeanspruchung gilt wiederum für das Verhältnis der Dielektrizitätszahlen von Öl, Papier und Transformerboard 1 : 1,5 : 2.

Fig 4. zeigt das elektrische Feld für die gleiche Anordnung aber 15 µs nach Stossbeginn. In diesem Zeitpunkt ist die Prüfspannung bereits auf ca. 84 % des Scheitelwertes gesunken. Infolge des Überschwingens am Wicklungsende beträgt aber die maximale Spannungsdifferenz zwischen zwei Spulen 12,5 %. Dadurch ergibt sich eine stärkere Feldkonzentration an der Spulenkante, trotzdem dass das mittlere radiale Feld um 17 % geringer ist. 15 µs nach Anfang der Stoßspannung ist die maximale Feldstärke im Papier um ca. 30 % und die im anliegenden Ölkanel (Feldlinie 1) um ca. 7 % höher als jene bei der Anfangsverteilung. Dieses Ergebnis erklärt zum Teil die Feststellung, dass ein Überschlag längs der Wicklung niemals im Scheitel der Stoßspannung auftritt, sondern erst im Zeitintervall zwischen ca. 5 und 20 µs nach Stossbeginn. Waren die für die Längsfestigkeit

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

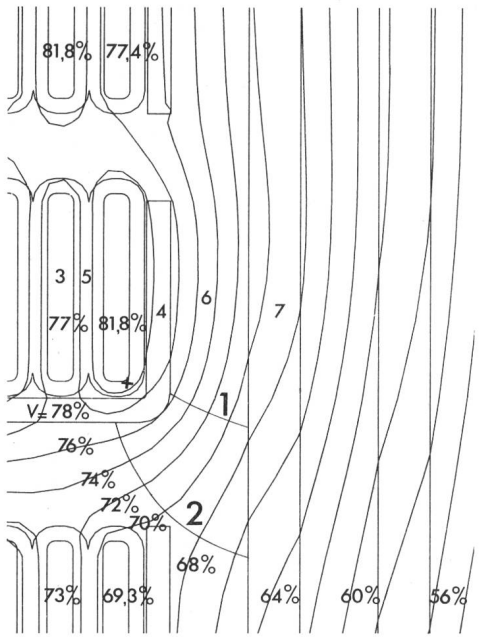


**Fig. 4 Achsialer Schnitt des Wicklungseinganges und elektrisch höchstbeanspruchte Spulenkante**
Äquipotential- und Feldlinien 15 µs nach Stossbeginn
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 2 und 3

massgebenden Feldlinien am Anfang vorwiegend radial gerichtet, so macht sich die Längsbeanspruchung im Verlauf des Stossvorganges bemerkbar, indem die erwähnten Feldlinien mit der Zeit stets vermehrt axial gerichtet werden. Dieser Vorgang darf aber nicht verallgemeinert werden. Es gibt Hinweise dafür, dass in einigen Fällen gerade das maximale Radialfeld massgebend ist für die Längsfestigkeit. Aber auch dann liegt der kritische Zeitpunkt im Bereich zwischen ca. 5 und 20 µs. Mit der Anfangsverteilung hat er wenig zu tun.

Daraus ist ersichtlich, dass eine Erhöhung der Längsfestigkeit eine Entlastung der höchstbeanspruchten Spulenkante bedingt, die u. a. durch eine gleichmässigere Spannungsverteilung längs der Wicklung, d. h. bessere Steuerung, erreicht werden kann. Aber auch eine Verkleinerung der Spannungsdifferenz zwischen gegenüberliegenden Wicklungen ist für die Längsfestigkeit von wesentlicher Bedeutung.

## 4. Hauptisolation

Die Auslegung der Isolation im Zylinderfeld zwischen Isolierbarrieren stellt kein Problem dar. Etwas Mühe bereitet hingegen die Bemessung der an den Wicklungen anliegenden Kühlkanäle. Dies ist darauf zurückzuführen, dass infolge der Fabrikationstoleranzen, radialen Kühlkanäle zwischen Spulen und Lücken oder gar vorstehenden Teilen bei Spulenübergängen, Feldkonzentrationen an den Spulenkanten unumgänglich sind. Hinzu kommt noch der Spannungsabbau längs der Wicklung, der die Feldkonzentration noch mehr erhöht. In der Praxis werden dafür einfache Bemessungsregeln aufgestellt. Fig. 5 und 6 vermitteln den Einfluss einer 5 mm tiefen Lücke bei einem Spulenübergang mit 12 mm Ölkanal zwischen Spulen und 6 mm zwischen Wicklung und Isolierbarriere. Eingetragen wurden die Äquipotentiallinien mit jeweils 2 % Spannungsdifferenz und die massgebenden Feldlinien an der höchstbeanspruchten Spulenkante. Dabei gilt für das Verhältnis der Dielektrizitätszahlen von Öl, Papier und Transformerboard wiederum 1 : 1,5 : 2. Der Spannungsabbau längs der Wicklung wurde berücksichtigt. Als Folge der 5 mm tiefen Lücke steigt die maximale Feldstärke im Papier um ca. 11 % und die Beanspruchungen im anliegenden Ölkanal um ca. 9 %. Bei 20 mm tiefen Lücken sind mit Feldstärkenerhöhungen um ca. 17 % im Papier bzw. um ca. 15 % im anliegenden Ölkanal zu rechnen. Die entsprechende Potentialverteilung ist in Fig. 7 ersichtlich. Sind vorgenannte Lücken oder vorstehende Spulenübergänge nicht zu vermeiden, so sind besondere Vorkehrungen notwendig, um die erhöhten Beanspruchungen zu mildern.

## 5. Endabstand

Die Isolation zwischen Wicklungsstirnflächen und Joch wird als Endabstand bezeichnet. Zur Erhöhung der elektrischen Festigkeit wird auch hier die Ölstrecke durch ein Barrierensystem in kleineren Ölkanälen unterteilt. Der Isolationsaufbau ist komplizierter als jener der Hauptisolation. Das

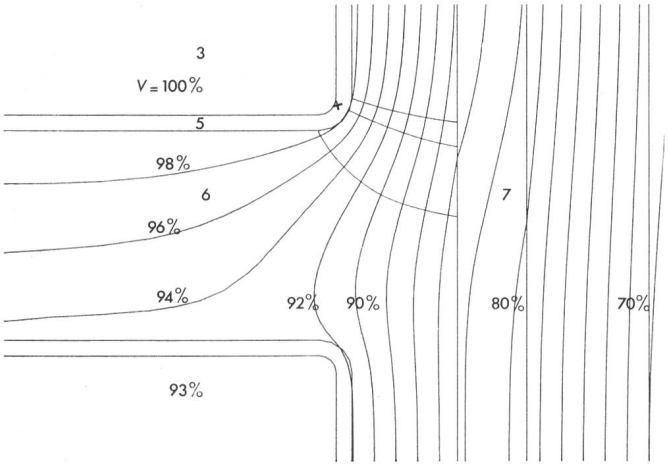


**Fig. 5 Elektrische Beanspruchung an der Wicklung im Hauptstreukanal**
*V* Potentiale bezogen auf maximale Leiterspannung
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 2 und 3

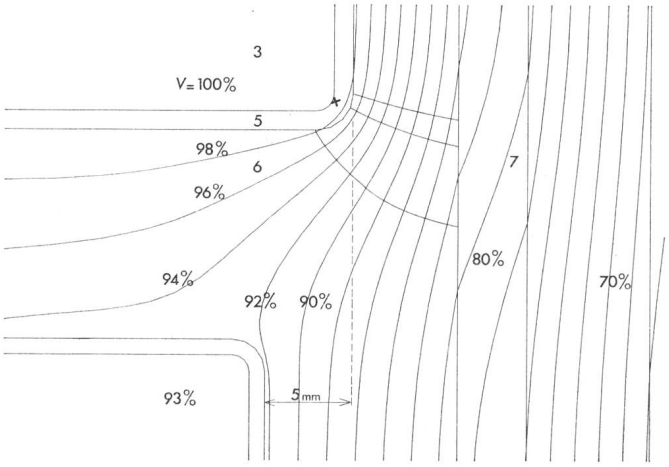


**Fig. 6 Einfluss einer 5 m tiefen Lücke auf die elektrische Beanspruchung an der Wicklung**
Bezeichnungen siehe Fig. 2, 3 und 5

elektrische Feld ist nicht homogen. Überdies sind breitere Kühlkanäle für den Ein- und Austritt des Öles notwendig. Zur Milderung der Inhomogenität des elektrischen Feldes an den Wicklungsenden dienen sog. Schutzringe, die elektrisch direkt mit den Endspulen verbunden werden. Bei einem zweckmässig ausgebildeten Schutzring ist die maximale Beanspruchung am isolierten Schutzring um höchstens 20 % höher als die im Zylinderfeld der Hauptisolation.

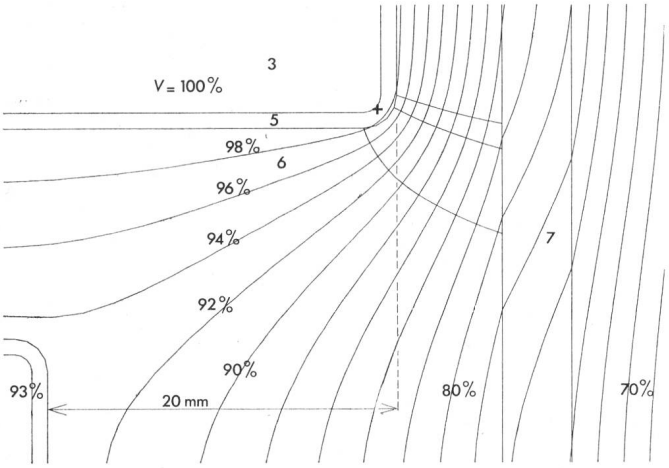


**Fig. 7 Einfluss einer 20 mm tiefen Lücke auf die elektrische Beanspruchung an der Wicklung**
Bezeichnungen siehe Fig. 2, 3 und 5

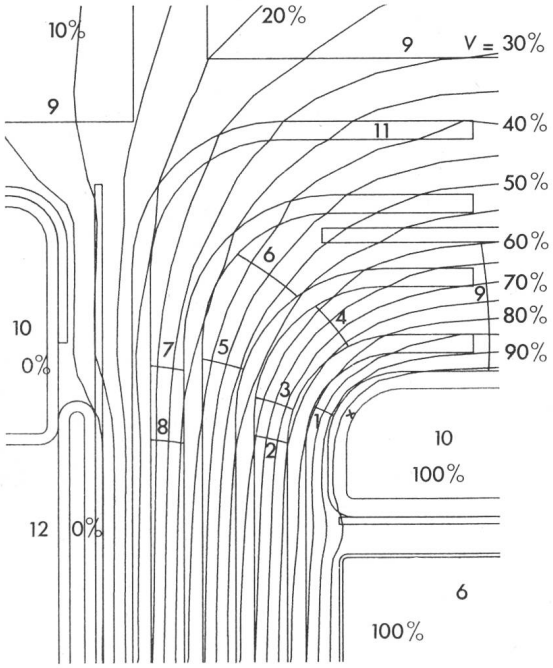


**Fig. 8 Ausschnitt des elektrischen Feldes im Bereich der Enddistanz**

| | |
|---|---|
| × | maximal beanspruchte Stelle im Papier |
| *1* bis *9* | Feldlinien senkrecht zu den Äquipotentiallinien in den Ölkanälen |
| *12* | Schirm |
| *V* | Potentiale bezogen auf Eingangsspannung |

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 3

Die Isolationsauslegung im Bereich der Enddistanz ist deshalb mühsam, weil nebst der Zusammenstellung auch die Randbedingungen öfters kompliziert sind. Eine optimale Bemessung ist nur mittels Feldbilder möglich. Fig. 8 zeigt einen Ausschnitt des Potentialfeldes mit den Höchstbeanspruchungen. Für das Verhältnis der Dielektrizitätszahlen von Öl, Papier und Transformerboard gilt wiederum 1 : 1,5 : 2. Eingetragen wurden die Äquipotentiallinien mit jeweils 5 % Spannungsdifferenz und die massgebenden Feldlinien in den Kühlkanälen. Die Feldlinien, in Fig. 8 z. B. mit 1 bis 9 bezeichnet, müssen möglichst senkrecht zu den Isolierbarrieren verlaufen, damit hohe Längsgradienten weitgehend vermieden werden. Bei der Anpassung der Barrierenkonturen an die Äquipotentiallinien muss selbstverständlich die mechanische Festigkeit des Barrierensystems stets berücksichtigt werden. Das Feldbild ermöglicht eine optimale Unterteilung des Isolationsraumes in schmalen Ölkanälen.

Eine Entlastung der Ölkanäle kann ausserdem dadurch erreicht werden, indem ein festes Material gewählt wird mit einer Dielektrizitätszahl, die nicht zu weit von jener des Kühlmittels abweicht. In nicht homogenen Feldern ist die Entlastung der Ölkanäle durch Anpassung der Dielektrizitätszahlen wirksamer als in homogenen, weil an Orten mit stärkeren Feldkonzentrationen die Elektrodenverkleidungen mehr Spannung aufnehmen.

## 6. Schlussbetrachtungen

Eine optimale Auslegung der Isolation im Transformator ist in vielen Fällen nur mittels Feldbilder möglich. Dafür stehen heute leistungsfähige Computerprogramme zur Verfügung, so dass auch lokale Feldstärken ziemlich genau berechnet werden können. Nach wie vor sind aber dielektrische Versuche notwendig zur Ermittlung der Beurteilungskriterien. Feldbilder und lokale Feldstärken sind lediglich Verbindungsglieder zwischen bekannten und neu zu konstruierenden Transformatoren hinsichtlich ihrer elektrischen Beanspruchungen. Viele aufwendige Versuche können auf das äusserst Notwendige beschränkt werden.

**Literatur:**


[1] *A. T. Chadwick* e. a.: Nouveau type d'enroulement pour transformateurs, améliorant la répartition des tensions de choc. Rapport CIGRE N° 107, 1950.

[2] *T. Bertula, Y. Saunamäki* et *N. Östman:* Vieillissement de l'isolation papier-huile vue plus spécialement sous l'angle de l'influence du champ électrique sur les impuretés contenues dans l'huile. Rapport CIGRE N° 15–06, 1970.

[3] *H. Brechna:* Stoßspannungssichere Transformatorwicklungen. Bulletin Oerlikon -(1958)328/329, S. 89...101.



**Adresse des Autors:**

*T. H. Sie,* Ingenieur der BBC AG Brown, Boveri & Cie., Abt. AGM, Baden (AG).