

# Thermisches Verhalten und Überlastbarkeit von Leistungstransformatoren

**M. Schäfer**  
Siemens AG  
  
Nürnberg

**K. Feser, E. Cardillo**  
Institut für Energieübertragung und  
Hochspannungstechnik  
Universität Stuttgart

## 1. Einführung

Leistungstransformatoren zählen zu den wichtigsten und zugleich teuersten Betriebsmitteln in einem Energieversorgungsnetz. Seit der Liberalisierung der Strommärkte sind die Netzbetreiber dazu angehalten die Ausnutzung ihrer Betriebsmittel dem Wettbewerb entsprechend zu gestalten. Durchleitungen und veränderte Lastflüsse können zu Belastungen der Betriebsmittel über das ursprünglich vorgesehene Maß hinaus führen (Überlastbetrieb). Um auch in Zukunft weiterhin eine sichere Energieversorgung zu gewährleisten sind sowohl die Netzbetreiber als auch die Hersteller von Leistungstransformatoren gefordert Aussagen über die zu erwartende Lebensdauer unter diesen veränderten Bedingungen zu machen. Der allgemeine Kostendruck zwingt die Hersteller bei neuen Netzausbauten so zu planen, dass trotz erhöhter Ausnutzung der Betriebsmittel ohne Kostensteigerung dieselbe Betriebssicherheit gewährleistet bleibt.

Da in Transformatoren nach wie vor überwiegend Öl/Papier als Isolationsmaterial verwendet wird, spielen die thermischen Verhältnisse für die Abschätzung der Nutzungsdauer und für den laufenden Betrieb eine ausschlaggebende Rolle. Die Bestimmung der Heißpunkttemperatur ist daher von großem Interesse. Im Nennbetrieb darf sie festgelegte Grenzwerte nicht überschreiten um die geforderte Gesamtbetriebsdauer und die Betriebssicherheit des Transformators sicherzustellen. In Leistungstransformatoren werden eine Vielzahl unterschiedlicher Wicklungstypen und Kühlkanalanordnungen in Kombination mit unterschiedlichen Kühlarten verwendet. Derzeit gibt es kein universelles thermisches Transformatormodell. Das heißt, für jeden Wicklungstyp und Kühlart ist ein eigenes thermisches Modell erforderlich. Für ein optimales Wicklungsdesign sind detaillierte Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen den Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf die Temperaturverhältnisse in den Wicklungen bzw. im Transformator unerlässlich. Fertigungstoleranzen und Messungenauigkeiten müssen in Form von Sicherheitsmargen bei der Wicklungsauslegung berücksichtigt werden. Die Abweichungen zwischen Messung und Berechnung werden bei den Herstellern laufend durch den

Abgleich der Auslegungsrechnung mit den Ergebnissen aus Erwärmungsmessungen und Versuchen an Modellwicklungen verringert.

Durch optimierte Kühlkanalgeometrien in den Wicklungen kann ein verbesserter Wärmeübergang erreicht werden, der wiederum kompaktere Bauformen bei gleichem Temperaturniveau ermöglicht. Diese Betrachtungen schließen auch den die Wicklungen umgebenden Isolationsaufbau und die Beschaffenheit der Leiterumspinnung ein.

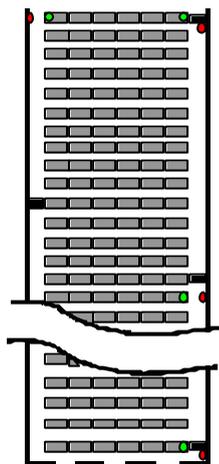
Das Zusammenspiel der Kühlanlage (äußere Kühlung) und der Wicklungen (innere Kühlung) bietet zusätzliche Möglichkeiten der Optimierung sowohl bei der Auslegung als auch beim Betrieb von Leistungstransformatoren. Die Bemühungen um eine optimale thermische Auslegung wird durch den Einsatz von neu entwickelten Lüfter- und Kühlertypen unterstützt.

Die Überlastbarkeit von Leistungstransformatoren ist in IEC 354 bzw. im entsprechenden IEEE Loading Guide beschrieben. Die in diesen Publikationen genannten Last- und Temperaturgrenzen sollen einen sicheren Betrieb von Transformatoren gewährleisten. Wirtschaftliche Erwägungen für einen Betrieb über die definierte Nennleistung hinaus können in den Loading Guides nicht berücksichtigt werden. Weiterhin wird die Kühlanlagensteuerung und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten für den Überlastbetrieb nicht beschrieben. Durch eine günstige Wahl der Steuerungsparameter der Kühlanlage können sowohl kleinere Gesamtverluste des Transformators, eine höhere kurzfristige Überlastbarkeit und gleichzeitig eine höhere Nutzungsdauer erreicht werden.

## **2. Thermische Beanspruchung von Transformatorwicklungen**

In den Wicklungen eines belasteten Transformators treten ohmsche Verluste durch die Wicklungsströme und durch Wirbelströme im Leitermaterial auf. Durch diesen lastabhängigen Wärmestrom treten Temperaturgradienten innerhalb des festen Isolationssystems der Wicklung und in der Grenzschicht an der Wicklungsoberfläche zum Öl in den Kühlkanälen auf. Der Temperaturgradient im festen Isolationssystem wird durch die Dicke des Kupferdrahtlackes, die Papierdicke und die durch Aufbauschungen der Papierschichten bedingte Bildung von ruhenden Ölschichten (Öltaschen) bestimmt. An der Wicklungsoberfläche wird der konvektive Wärmeabtransport maßgeblich von der Kühlart, dem Wicklungstyp und vom gesamten Kühlölkreislauf bestimmt. Das Wärmeabfuhrvermögen über die Wicklungsoberfläche in das umgebende Kühlmedium durch natürliche oder erzwungene Konvektion kann mit Wärmeübergangszahlen beschrieben werden. Bei forcierter Ölströmung ist die

Wärmeübergangszahl durch die Ölströmungsgeschwindigkeit, die sich anhand hydraulischer Widerstandsnetzwerke berechnen lässt, bestimmbar. Bei natürlicher Kühlung (ON) hängt sie jedoch wesentlich von der durch die Wicklungsfläche tretenden Wärmestromdichte ab, die den Flächenschub für den Antrieb der Strömung liefert. Mit der in Bild 1 gezeigten Versuchswicklung wurden zahlreiche Erwärmungsversuche mit natürlich konvektiver Kühlung (ONAN - Kühlung) durchgeführt um die Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen und den thermischen Auswirkungen auf die Wicklung genauer zu untersuchen.



**Bild 1a:**  
Schematisch  
dargestellter  
Querschnitt durch die  
Versuchswicklung  
(Scheibenwicklung).



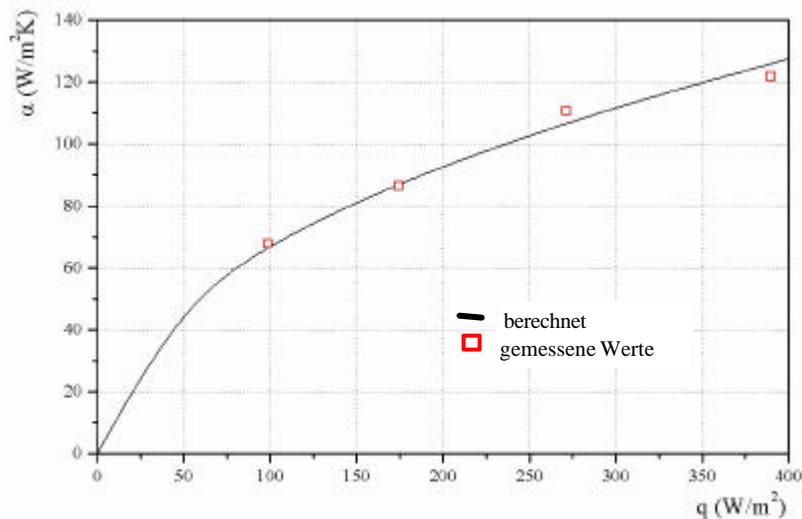
**Bild 1b:**  
Mit PT 100 –  
Sensoren zur lokalen  
Temperaturmessung  
an bestimmten  
Messstellen ausge-  
stattete Wicklung.

Bei der Versuchswicklung handelt es sich um eine Scheibenwicklung mit insgesamt 62 Scheiben zu je 6 Windungen. Zwischen je zwei übereinanderliegenden Scheiben befindet sich ein radialer Kühlkanal von 5 mm Höhe. Innerhalb der Wicklungsscheiben gibt es keine weiteren axialen Kühlkanäle. Ölumlenkungen unterteilen die Wicklung in mehrere Kühlkanalabschnitte. Die wichtigsten Daten der Versuchswicklung sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Nennstrom	52,9 A
Gesamte Anzahl von Wicklungsscheiben	62
Windungen je Scheibe	6
Höhe der radialen Kühlkanäle	5 mm
Wicklungshöhe	827 mm
Vertikale Kühlkanäle innerhalb der Wicklungsscheibe	0
Ölumlenkungen an der Innenseite, positioniert an Scheibenummer (nummeriert von unten nach oben)	12, 32, 42, 52
Äußere Ölumlenkungen, positioniert an Scheibenummer	1, 22, 38, 48, 62

**Tabelle 1:** Daten der verwendeten Versuchswicklung.

Die Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl von der Wärmestromdichte ist in Bild 2 dargestellt. Die durchgezogene Kurve zeigt den durch Interpolation der Messpunkte angenäherten Verlauf. Das erhöhte Wärmeabfuhrvermögen der Wicklung bei höherer Wärmestromdichte ist durch die ansteigenden Auftriebskräfte, die bei natürlicher Kühlung den Ölfluss zustande bringen, begründet.



**Bild 2:**

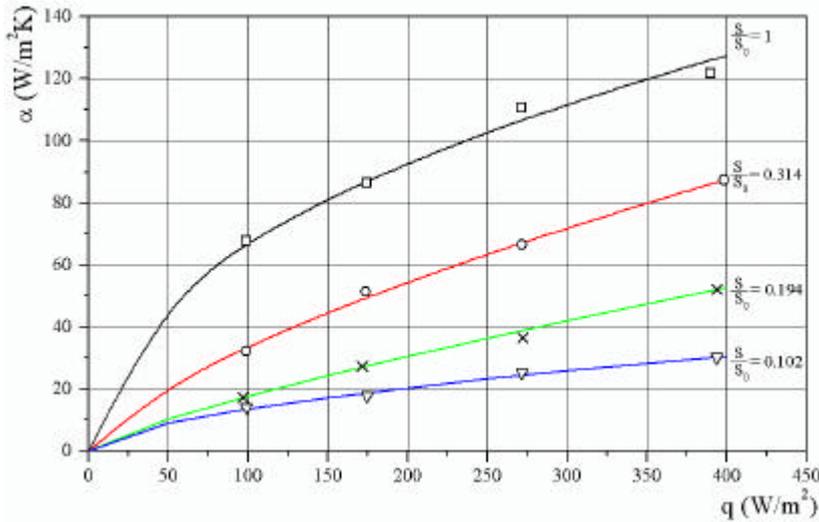
Berechnete und gemessene Wärmeübergangszahl in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte  $q$ .

Praktische Erfahrungen haben zudem gezeigt, dass das thermische Verhalten von ON - gekühlten Wicklungen ebenfalls von der geforderten Spannungsfestigkeit der Wicklung abhängt. Dies liegt daran, dass sich zusätzliche hydraulische Widerstände durch umfangreiche Isolationsaufbauten im Ölkreislauf den Ölstrom durch die Wicklung begrenzen. Sowohl die Temperaturgradienten entlang der Wicklungsachse als auch die Wärmeübergangszahl der Grenzschicht sind bei Wicklungen mit hohem Isolationspegel ungünstiger als bei Wicklungen mit kleineren Prüfspannungen.

In Bild 3 ist dargestellt, wie sich die Wärmeübergangszahlen bei unterschiedlichen hydraulischen Widerständen im Ölkreislauf an derselben Wicklung verhalten. Die Vergrößerung der hydraulischen Widerstände wurde durch eine Reduzierung der Öleinlassöffnungen an der Unterseite der Wicklung vorgenommen. Der maximale Öleinlassquerschnitt der Wicklung beträgt  $S_0 = 3972 \text{ mm}^2$ .

Der Öleinlassquerschnitt wurde bei den einzelnen Messungen auf ca. 30 %, 20 % und 10 % des Maximalwertes  $S_0$  reduziert; dies ist in Bild 3 als Kurvenparameter  $S/S_0$  angegeben.

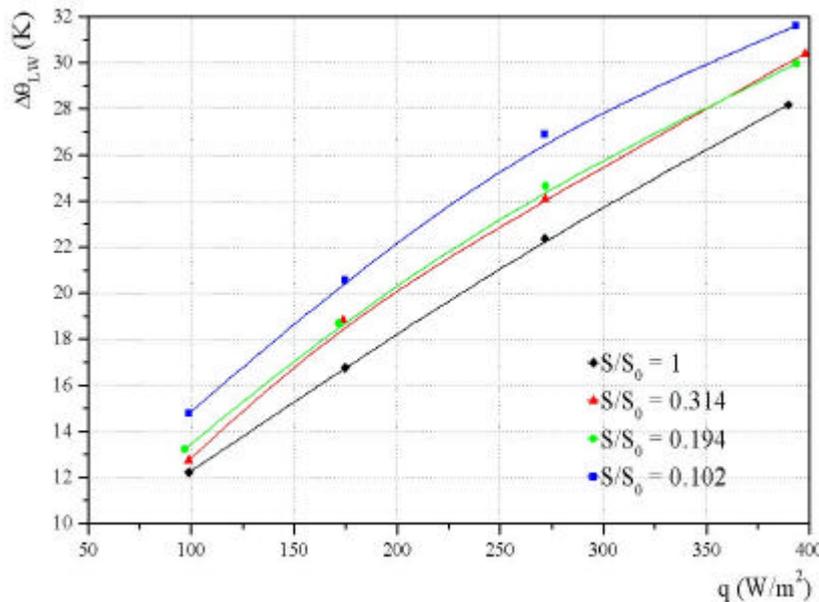
Es ist ersichtlich, dass sich bei konstanter Wärmestromdichte aber erhöhtem hydraulischen Widerstand die Wärmeübergangszahl deutlich verkleinert, d.h. die Wärmeübertragung an der Wicklungsoberfläche in das umgebende Kühlöl wird deutlich vermindert. Dadurch wird das Temperaturniveau der Wicklung angehoben.



**Bild 3:**

Wärmeübergangszahl bei vermindertem Öleintrittsquerschnitt der Wicklung.

Durch den verringerten Öldurchfluss und den damit verbundenen geringeren Wärmeabtransport erhöht sich die Temperaturdifferenz zwischen ein- und ausfließendem Kühlöl in der Wicklung zwangsläufig. Dieser Temperaturgradient ist für die thermische Auslegung der Wicklung eine bedeutende Größe. Die mittlere Kupfertemperatur bildet sich aus der Summe der mittleren Öltemperatur und dem Kupfer - Öl - Temperatursprung der von der Wärmeübergangszahl abhängt.



**Bild 4**

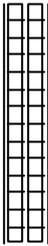
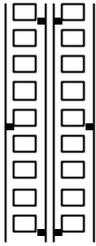
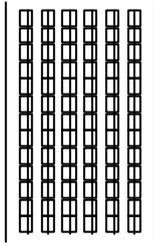
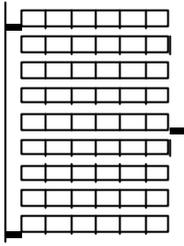
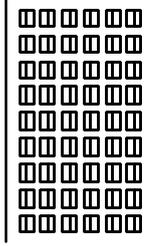
Vertikaler Temperaturgradient des Kühlöls in der Wicklung. Bestimmt aus lokal gemessenen Öltemperaturen innerhalb der Wicklung.

### 3 Innovationen bei der thermischen Auslegung

Die Weiterentwicklung der thermischen Auslegung von Transformatoren zielt auf ein kompakteres Wicklungsdesign und damit auf Material- und Gewichtseinsparungen ab. Ein Schritt in diese Richtung ist die Untersuchung verschiedener Wicklungsarten und Kühlarten hinsichtlich ihrer Effizienz bei der Wärmeabfuhr.

### 3.1 Wärmeübergang Wicklung - Öl

Die gebräuchlichsten Wicklungsarten sind in Tabelle 3 dargestellt. Generell können die Wicklungen in Transformatoren in Lagenwicklungen und Scheibenwicklungen unterteilt werden.

	Axial	Radial	axial+radial
Lagen- Wicklungen			nicht betrachtet
Scheiben- Wicklungen			

**Tabelle 2:** Wicklungsarten und Kühlkanalgeometrien.

Ein allgemeiner Ansatz zur Berechnung des Leiter - Öl Temperaturgradienten unabhängig von der Wicklungs- und Kühlart ist:

$$\Theta_{Cu\_oil} = q_{th} \cdot \left( \frac{d}{I} + \frac{1}{a} \right) \quad (1)$$

$q_{th}$  ist die Wärmestromdichte durch die Wicklungsoberfläche,  $\delta$  ist die Dicke der Leiterisolation,  $\lambda$  ist die spezifische Wärmeleitfähigkeit der Leiterisolation und  $\alpha$  ist die Wärmeübergangszahl an der Leiteroberfläche.

Eine direkte Berechnung der Wärmeübergangszahl  $\alpha$  ist praktisch aufgrund der komplexen Geometrie von Transformatorwicklungen nicht möglich. Die Ähnlichkeitstheorie aus der Thermo- und Fluidodynamik ermöglicht es aus Messungen an Versuchswicklungen ermittelte Wärmeübergangszahlen auf ähnliche Wicklungen übertragen zu können. Ausschlaggebend ist dabei die Darstellung der Ergebnisse anhand der dimensionslosen Nusselt - Zahl als Kenngröße, woraus sich dann die Wärmeübergangszahl nach folgender Beziehung mit  $L_c$  als charakteristischer Länge berechnen lässt:

$$a = \frac{I \ Nu}{L_c} \quad (2)$$

Für die Wicklungsarten in Tabelle 1 wurden Funktionen für die Nusselt - Zahlen erstellt. Dazu wurden Erwärmungsmessungen an einer Vielzahl von Transformatoren ausgewertet und miteinander verglichen.

Für Wicklungen mit erzwungenem und natürlichem Ölumlaufl sind zwei verschiedene allgemeingültige Ansätze notwendig.

natürlicher Ölumlaufl (ON)

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^m \cdot k$$

Erzwungener Ölumlaufl (OD)

$$Nu = C \cdot (Re \cdot Pr)^m \cdot k$$

Die Parameter C und m wurden aus Messungen gewonnen. Der Korrekturfaktor k berücksichtigt weitere Aspekte der Wicklungsgeometrie.

Wicklungsart	Erzwungener Ölumlaufl		Natürlicher Ölumlaufl	
	C	m	C	m
Lagenwicklung, axial	0,834	0,213	9,05	0,61
Lagenwicklung, radial	0,834	0,213	8,152	0,191
Spulenwicklung, radial	0,834	0,213	8,152	0,191
Spulenwicklung, axial	0,61	0,210	9,05	0,61
Spulenwicklung, axial + radial	0,0148	0,47	0,262	0,346

**Tabelle 3:** Parameter zur Berechnung der Wärmeübergangszahl.

### 3.2 Kühlanlagen

Kühlanlagen für Großtransformatoren lassen sich in zwei verschiedene Bauformen einteilen. Kreuzstrom-Wärmetauscher sind sehr kompakte Baugruppen in denen beide Medien, zwischen denen der Wärmeaustausch stattfinden soll, mittels Pumpen bzw. Lüfter durch den Kühler gefördert werden um den relativ hohen Druckabfall auszugleichen. Diese Kühler besitzen bei einem Lüfter- oder Pumpenausfall praktisch keine Restkühlleistung. Eine andere Bauform sind Radiatorenkühlanlagen die ebenfalls mit Lüftern und Pumpen versehen werden können. Die maximal erreichbare Kühlleistung von Radiatorenkühlanlagen wird meist durch die Luftmenge begrenzt, die mit Hilfe von Lüftern zwischen die Kühlelemente geblasen wird. Bei stehenden Lüftern und Pumpen bewegt sich die verbleibende Kühlleistung im Bereich zwischen 40 - 60% der maximalen Kühlleistung.

Um bei großen Leistungstransformatoren sehr große Radiatorenkühlanlagen zu vermeiden ist es notwendig die Leistungsdichte dieser Kühlanlagen zu steigern. Dies kann erreicht werden indem Lüfter mit großem Durchmesser zum Einsatz kommen, deren Kennlinie auf die Verhältnisse am Radiator angepasst sind. Um einen höheren

Luftstrom zu erreichen werden Lüfter sowohl horizontal als auch vertikal blasend angebaut.

## **4 Beeinflussung von Gesamtverlusten, Überlastbarkeit und Betriebssicherheit**

Die Gesamtverluste eines Transformators setzen sich aus Leerlaufverluste, Kurzschlussverluste (Lastverluste) und dem Eigenbedarf für die Peripherie zusammen. Der überwiegende Anteil der Eigenbedarfsverluste macht in den meisten Fällen die Leistungsaufnahme von Lüftern und Pumpen der Kühlanlage aus.

### **4.1 Zusammenspiel Transformator - Kühlanlage**

Die Leerlaufverluste sind hauptsächlich durch die Induktion und die Beschaffenheit des Kerns bestimmt und näherungsweise unabhängig von der Betriebstemperatur des Transformators. Die Kurzschlussverluste sind temperaturabhängig und steigen bei konstanter Belastung mit der Temperatur bzw. dem spezifischen Widerstand des Leitermaterials an. Die Leistungsaufnahme der Kühlanlage steigt umgekehrt proportional mit abnehmendem Temperaturgradienten zwischen der mittleren Öltemperatur im Kühler und der Umgebungstemperatur bei sonst gleichen Bedingungen an. Es existiert also für jeden Wert einer mittleren Belastung bezüglich den Verlusten ein optimaler Betriebspunkt. Einerseits führt eine Steigerung der Kühlleistung zwar zu sinkenden Temperaturen, die Gesamtverluste können dabei aber wegen den überwiegenden Kühlanlagenverlusten trotzdem größer ausfallen. Andererseits kann eine Verringerung der Kühlleistung zu kleineren Gesamtverlusten führen, obwohl die Kurzschlussverluste aufgrund einer höheren Leitertemperatur zunehmen. Der optimale Betriebspunkt bezüglich einer Minimierung der Gesamtverluste ist dann erreicht, wenn es sich aufgrund der Gesamtverlustbilanz weder lohnt die Kühlleistung zu erhöhen noch diese zu verringern.

### **Beispielrechnung**

Das Verhalten der einzelnen Verlustanteile soll anhand eines Netzkuppeltransformators mit einer Leistung von 300 MVA und einem Nenn-

Übersetzungsverhältnis von 420/110/15 kV verdeutlicht werden. Die weiteren zugrundeliegenden Daten sind:

Leerlaufverluste	110 kW
Kurzschlussverluste	850 kW
Mittlere jährliche Umgebungstemperatur	20 °C
Leistungsaufnahme Kühlstufe 1	10 kW
Leistungsaufnahme Kühlstufe 2 (inklusive 1)	18 kW

**Tabelle 4:** Daten eines Netzkuppeltransformators 300 MVA 420/110/15 KV

Die Bilanz der Verlustleistungen soll hier bei verschiedenen Lastfällen oberhalb und unterhalb des Optimums verglichen werden. In Tabelle 2 sind die sich einstellenden Öltemperaturen und die dazugehörigen Verluste im Transformator neben den Kühlanlagenverlusten für fünf Lastfälle dargestellt. Die Summe aus beiden Verlusten ergibt die Gesamtverluste. In diesem Beispiel wurde die Hilfsenergie für die Kühlanlage gleich wie die Verluste im Aktivteil des Transformators gewichtet.

	$P_{\text{Kühlanl. [kW]}}$	$P_{V\_Trafo [kW]}$	$P_{\text{gesamt [kW]}}$	Öltemp. [°C]
<b>Last = 80 %</b>				
Stufe 1	10	681	691	80
Stufe 2	18	627	645	50
<b>Last = 60 %</b>				
Stufe 1	10	409	419	58
Stufe 2	18	389	407	39
<b>Last = 50 %</b>				
Stufe 1	10	311	321	50
Stufe 2	18	301	319	35
<b>Last = 40 %</b>				
Stufe 1	10	236	246	43
Stufe 2	18	231	249	31
<b>Last = 30 %</b>				
Stufe 1	10	179	189	37
Stufe 2	18	177	195	29

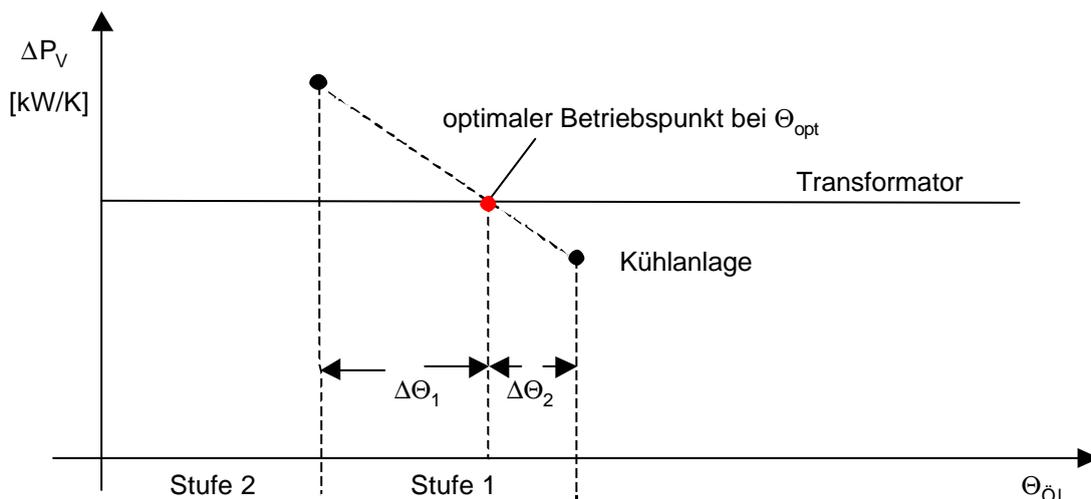
**Tabelle 5:** Gegenüberstellung der Verluste in beiden Kühlstufen bei verschiedenen mittleren Belastungen

Im vorliegenden Beispiel bringt die Zuschaltung der vollen Kühlleistung ab einer Belastung von 46,3% eine Reduzierung der Gesamtverluste. Anders verhält es sich bei kleineren Belastungen. Unterhalb dieses Wertes führt die Zuschaltung der zweiten Kühlstufe zu einer Erhöhung der Gesamtverluste. Bei 40% steht einer Reduzierung der Kurzschlussverluste von 236 kW auf 231 kW ein höherer Eigenbedarf der Kühlanlage von 8 kW gegenüber. Die Gesamtverluste erhöhen sich dadurch um 3 kW.

### Wahl der Einstellwerte für minimale Gesamtverluste

Die optimalen Einstellwerte für die Kühlanlagensteuerung können für eine bekannte Umgebungstemperatur und eine bestimmte Belastung nach der folgenden Vorgehensweise gewählt werden.

- 1) Bestimmung der Änderung der Kurzschlussverluste mit der Leitertemperatur bei der gewählten Belastung  $k$ .
- 2) Bestimmung der Änderung der aufgenommenen Leistung zwischen den Kühlstufen bezogen auf die Temperaturdifferenz, die bei der gewählten Belastung auftreten würde.
- 3) Gleichsetzen der unter 1) und 2) berechneten Ergebnisse liefert den Betriebspunkt der Kühlanlage bei dem die geringsten Gesamtverluste auftreten.



**Bild 5** Charakteristik der Verluständerungen von Transformator und Kühlanlage als Funktion der mittleren Temperatur des Transformators.

Der in der Praxis überwiegend anzutreffende Fall ist in Bild 5 dargestellt. Die Änderung der Kurzschlussverluste des Transformators ist unabhängig von der Temperatur im Transformator und als waagerechte Linie dargestellt. Die Kurve für die Kühlanlage ist durch die aufgenommene Leistung in den einzelnen Kühlstufen und die sich ergebenden Öltemperaturen gegeben. Die Zuschaltung einer Kühlstufe bewirkt eine Reduzierung der mittleren Temperatur und einen Anstieg der Leistungsaufnahme. Zwischen diesen Punkten existieren alle Betriebsfälle der Kühlanlage die sich aus einem abwechselnden Betrieb von zwei Kühlstufen zusammensetzen. Diese Betriebspunkte liegen auf der gestrichelten Linie zwischen den Schaltpunkten. Der optimale Betriebspunkt, bei dem sich die Änderungen der Kurzschlussverluste und der Hilfsenergie für die Kühlanlage gerade ausgleichen, liegt auf dem Schnittpunkt beider Funktionen. In der überwiegenden Zahl der Fälle setzt sich dieser Betriebspunkt aus dem Zusammenspiel von zwei Kühlstufen mit den Temperaturdifferenzen zur optimalen mittleren Öltemperatur  $\Delta\theta_1$  und  $\Delta\theta_2$  zusammen. Die optimale Kühlstufe ist diejenige, welche dem Schnittpunkt der beiden Kurven am nächsten liegt.

## 4.2 Überlastbarkeit und Betriebssicherheit

Es können grundsätzlich zwei verschiedene Arten der Überlastbarkeit von Transformatoren unterschieden werden.

- kurzfristiger Notbetrieb
- kontinuierliche Überlastbarkeit

Ein kurzfristiger Notbetrieb kann zur Abwendung von schweren Störungen im Netz für eine begrenzte Dauer zugelassen werden. Dabei wird eine beschleunigte thermische Alterung aufgrund stark erhöhter Betriebstemperaturen in Kauf genommen. Die geltenden Temperaturgrenzen stellen sicher, dass durch die erhöhten Temperaturen keine dielektrischen Fehler, beispielsweise ausgelöst durch Gasblasen im Öl, zu einer Zerstörung des Transformators führen. Ein kurzzeitiger Notbetrieb stellt immer ein hohes Risiko dar und eignet sich schon deshalb nicht für eine wirtschaftlichere Ausnutzung dieses Betriebsmittels.

Eine kontinuierliche Überlastbarkeit kommt durch günstige Umgebungsbedingungen und Sicherheitsmargen, beispielsweise durch zugeschaltete Reservekühlkreise,

zustande. Bei diesem Überlastbetrieb werden keine Überschreitungen von Grenztemperaturen die für den Nennbetrieb gültig sind zugelassen. Das Betriebsrisiko ist nicht erhöht und die Alterung wird durch die Überlastung nicht beschleunigt. Diese bisher weitgehend ungenutzte Übertragungskapazität steht, beispielsweise zur Abdeckung von Lastspitzen im Winter, zur Verfügung.

Um Transformatoren ohne zusätzliches Risiko gezielt überlasten zu können wird ein Diagnosesystem benötigt. Das Diagnosesystem berechnet anhand einiger Messwerte laufend die aktuelle Überlastbarkeit des Transformators. Wenn diese Angaben für die Netzführung nutzbar gemacht werden besteht die Möglichkeit diese Daten bei der Lastverteilung zu berücksichtigen.

## **5 Zusammenfassung und Ausblick**

Im vorliegenden Beitrag wurde gezeigt, dass bei Transformatoren die Grenzen der Belastbarkeit im Wesentlichen durch die thermischen Verhältnisse festgelegt werden. Eine bessere Ausnutzung dieser Betriebsmittel im laufenden Betrieb und eine effizientere Auslegung kann nur dann gewährleistet werden wenn das thermische Verhalten genau bekannt ist. Dies erfordert Detailwissen ausgehend vom thermischen Verhalten der einzelnen Wicklungen bis hin zur Betrachtung des Gesamtsystems Transformator - Kühlanlage.

Untersuchungen an einer ON -gekühlten Modellwicklung haben gezeigt, dass insbesondere bei dieser Kühlart die Wärmeübertragung in das Kühlöl stark von der Wärmestromdichte abhängt. Des weiteren wurde der Einfluss zusätzlicher hydraulischer Widerstände, die u.a. durch einen erhöhten Isolationsaufbau zustande kommen und damit direkt den Einfluss des Wicklungsdesigns widerspiegeln, aufgezeigt. Die gewonnenen Ergebnisse können auf andere Wicklungen derselben Art durch dimensionslose Kennzahlen übertragen werden, was bei der Vielzahl von unterschiedlichen Wicklungsarten und Kühlkanalgeometrien äußerst vorteilhaft ist.

Weiterentwicklungen im Bereich der thermischen Auslegung von Transformatoren konzentrieren sich auf die Verbesserung der Genauigkeit von Berechnungsverfahren

für die Bestimmung der Temperaturgradienten Leiter-Öl und auf eine Verbesserung der Kühlflächenausnutzung an Radiatorenkühlanlagen.

Die Wahl der Einstellwerte für die Kühlanlagensteuerung mit dem Ziel einer Minimierung der Gesamtverluste führt in den meisten Fällen zu erheblich niedrigeren Temperaturen im Aktivteil als bisher üblich und damit zu einer möglicherweise längeren Nutzungsdauer. In den meisten Fällen müssen jedoch Verluste durch die Bereitstellung von Hilfsenergie gegenüber den inneren Verlusten im Transformator höher bewertet werden. Dies verschiebt die optimale Betriebstemperatur hin zu höheren Werten. Intelligente Monitoringsysteme sind in der Lage den optimalen Einsatz der Kühlanlage in Abhängigkeit von den aktuellen Last- und Umgebungsbedingungen zu bestimmen. Dabei kann auch die Überlastbarkeit des Transformators aufgrund günstiger Umgebungsbedingungen dargestellt und im Überlastfall überwacht werden. Bei Transformatoren mit einer herkömmlichen Zweipunktregelung können die Einstellwerte nur für eine festgelegte mittlere Belastung optimiert werden. Diese Art der Optimierung liefert gegenüber der kontinuierlichen Optimierung immer ein ungünstigeres Ergebnis.

In den meisten Betriebsfällen hat ein Transformator eine höhere Übertragungskapazität als bei Nennbedingungen ermittelt wurde. Mit Hilfe eines Diagnosesystems kann diese Überlastkapazität für eine wirtschaftlichere Ausnutzung der Betriebsmittel genutzt werden.

## **6 Literatur:**

- [1] IEC 354 Loading guide for oil immersed power transformers
- [2] J. Bertsch, F. Oechsle, M. Schäfer, Thermische Überwachung von großen Öltransformatoren, Bulletin SEV/VSE 20/1998, S. 41-44
- [3] S. Tenbohlen, M. Schäfer, H. Matthes, Beurteilung der Überlastbarkeit von Transformatoren mit online Monitoringsystemen, Elektrizitätswirtschaft, Jg 99 (2000), Heft 1-2