

# CFD Investigations of Parameters Affecting the Thermal Behavior of Disc Type Winding Transformers

## CFD-Untersuchungen über den Einfluss unterschiedlicher Parameter auf das thermische Verhalten von Scheibenwicklungen in Leistungstransformatoren

M.Sc. Saeed Khandan, Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen

University of Stuttgart, Institute of Power Transmission and High Voltage Technology, Stuttgart, Germany

[saeed.khandan@ieh.uni-stuttgart.de](mailto:saeed.khandan@ieh.uni-stuttgart.de); [stefan.tenbohlen@ieh.uni-stuttgart.de](mailto:stefan.tenbohlen@ieh.uni-stuttgart.de)

### Kurzfassung

Die Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Leistungstransformatoren hängt besonders von den thermischen Bedingungen in den Wicklungen ab. Eine übermäßige Wärmeerzeugung ist der Hauptgrund für die Verschlechterung der Isolationseigenschaften und für die Verringerung der Lebensdauer. Ein optimiertes Design der Kühlung ist so von großer Bedeutung, um Betriebsstörungen und Materialalterung aufgrund von thermischen Schäden zu vermeiden. In diesem Beitrag werden Simulationen durch numerische Strömungsmechanik (engl.: Computational Fluid Dynamic –CFD) und experimentelle Untersuchungen zur Kühlleistung eines Zick-Zack-Wicklungsmodells mit pumpenbetriebenem Ölumlaufl (engl.: Oil-directed –OD) im Transformator vorgestellt. Das thermische Verhalten der Wicklung und die Kühlleistung werden durch die Verwendung verschiedener Parameter bewertet, um signifikante Einflüsse auf die Heißpunkttemperatur (engl.: Hot Spot Temperature –HST) und den Heißpunkt (Hot Spot Location –HSL) in der Wicklung zu prognostizieren. Zu den Konstruktionsparametern einer Wicklung zählen die horizontale Kühlkanalhöhe, die vertikale Kühlkanalbreite sowie die Anzahl der Scheiben pro Passage. Darüber hinaus haben Betriebsparameter, wie Einlassströmungsrate und Einlasstemperatur der Wicklung, einen beträchtlichen Einfluss auf das thermische Verhalten. In diesem Beitrag werden die Auswirkungen der Hauptparameter untersucht und die Kühlungsbedingungen bei unterschiedlichen Konstruktionsrandbedingungen verglichen. Die Ergebnisse der CFD-Simulationen zeigen, dass die Prognose und die Evaluierung der Wicklungskühlleistung angewendet werden kann, um die Kühlung eines ölgefüllten Leistungstransformators zu optimieren.

### Abstract

Lifetime and reliability of power transformers are highly dependent on cooling conditions in the windings. The excessive heat generation is the major cause of deteriorating insulation performance and aging. Therefore, optimal cooling design is necessary to avoid operating faults and materials degradation due to thermal damage. This contribution presents numerical CFD (Computational Fluid Dynamic) investigations and experimental studies on the cooling performance of a zig-zag winding model used direct-oil-forced flow (OD). Winding thermal behavior and cooling performance are assessed by using different parameters to predict significant influences on HST (Hot Spot Temperature) and HSL (Hot Spot Location). Design parameters can be divided into the geometrical structures including horizontal cooling channel height, vertical cooling channel width and number of discs per pass. Furthermore, operating parameters consisting of inlet flow rate and inlet temperature of the winding have considerable influence on thermal behavior. In this study, the effects of the main parameters are investigated and the cooling conditions are compared using different design structures. These results confirm that prediction and the evaluation of winding cooling performance can be applied to optimize the cooling of oil-filled power transformer.

### 1. Einleitung

Leistungstransformatoren gelten als besonders wichtige Betriebsmittel in der elektrischen Energieversorgung. Die Lebensdauer eines Transformators ist maßgeblich abhängig von der thermischen Belastung der Wicklungs-isolation über die Betriebsdauer. Im Nennbetrieb darf die Temperatur festgelegte Grenzwerte nicht überschreiten, um die geforderte Gesamtbetriebsdauer und die Betriebssicherheit des Transformators zu gewährleisten [1]. Je

besser die Kühlung des Aktivteils im Kessel mit natürlicher oder forcierter Ölströmung umgesetzt werden kann, desto geringer ist die Alterungsgeschwindigkeit der Papierisolation. In einem ölgefüllten Transformator werden die elektrischen Verluste der Wicklung und des Kerns durch das Öl als Wärme abgeführt. Hierbei fließt das Öl zuerst unter Wärmeaufnahme durch die Wicklungen nach oben, dann zur Kühlung durch den Wärmetauscher nach unten und schließlich wieder zurück in den Transformator-kessel beziehungsweise direkt in die Wicklungen zurück.

In den letzten Jahren konzentrierten sich die meisten numerischen CFD-Veröffentlichungen auf die Untersuchung des HSL [2-4] oder auf jene Parameter, welche die Temperaturverteilungen und die Ölströmungen in den Wicklungen beeinflussen [5-7]. Außerdem beruht die Kühlung der Wicklungen von Leistungstransformatoren auf der Zirkulation der dielektrischen Kühlflüssigkeit zwischen den Radiatoren und den Wicklungen. Um die Temperaturverteilung innerhalb der Wicklung zu berechnen, ist die Strömungsverteilung innerhalb der Ölkanäle zu ermitteln.

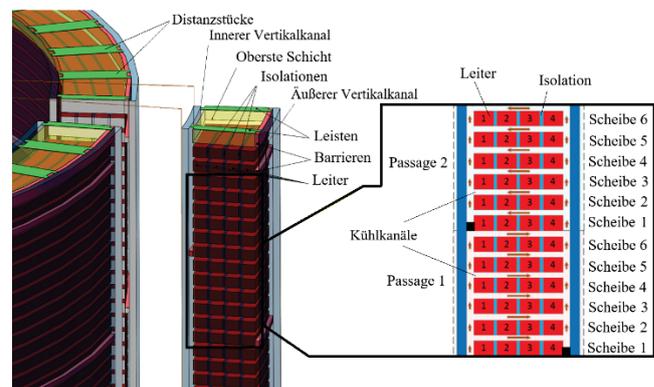
Zudem sollen thermohydraulische CFD-Modelle, bei denen auch das Temperaturfeld im Öl und in den Leitern berechnet wird, durch Temperaturmessungen an Wicklungsmodellen mit beheizbaren Modellleitern validiert werden. Im Rahmen einer Parameterstudie wird, ausgehend von einer Wicklungsgeometrie mit typischen Abmessungen, der Einfluss wichtiger geometrischer Parameter auf die kennzeichnenden thermohydraulischen Größen untersucht.

Im folgenden Beitrag werden sowohl die hydraulischen Messungen als auch die Ergebnisse von numerischen Simulationen mittels CFD dargestellt. Außerdem werden, basierend auf einer Scheibengeometrie mit Zick-Zack-förmiger Wicklung, Parametervariationen der Geometrie und anderer Größen durchgeführt, um deren Auswirkungen auf die kennzeichnenden thermohydraulischen Größen innerhalb der Wicklung zu analysieren.

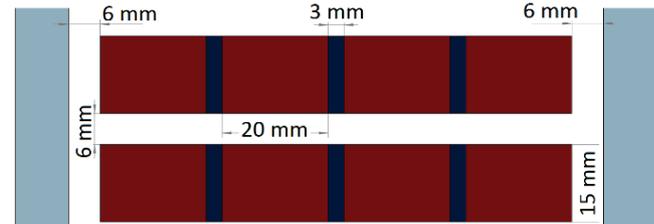
## 2. Beschreibung der untersuchten Geometrie

Der Aufbau von Scheibenwicklungen in einem Transformator zeigt eine gleichmäßige Symmetrie in Umfangsrichtung [8]. Um diese Konstruktionsgeometrie zu visualisieren, zeigt Bild 1 eine vergrößerte dreidimensionale Ansicht eines Abschnitts mit zwei untersuchten Passagen. Das gesamte Modell besteht aus drei Passagen, welche aus jeweils 6 Scheiben, 4 Leitern und 6 Kühlkanälen aufgebaut sind. Die Distanzstücke werden verwendet, um die entsprechende Breite der horizontalen Kanäle an den inneren und äußeren Wicklungsdurchmesser anzupassen. Außerdem enthält Bild 1 die Nummerierung der Leiter und der Scheiben, die für die Präsentation der Ergebnisse im weiteren Verlauf verwendet werden. Aufgrund der in Bild 1 erkennbaren periodischen Symmetrie der Scheibenwicklung in Umfangsrichtung, ist es möglich bei der hydraulischen Modellierung nur ein Winkelsegment von  $8^\circ$  (der Bereich zwischen zwei Distanzstücken) zu betrachten [8].

Bild 2 zeigt die technischen Abmessungen des Modells, welches im Experiment und für die numerischen Simulationen verwendet wird. Weitere Details zu dem Experimentaufbau und den hydraulischen Messungen sind in [8-9] erklärt. Da die Bestimmung der Heißpunkttemperatur der Wicklung von besonderem Interesse ist, beinhaltet das Modell Temperaturmessungen an jedem Leiterelement.



**Bild 1.** Schnitt durch eine Scheibenwicklung mit radialen und axialen Kühlkanälen.



**Bild 2.** Abmessungen des Wicklungsmodell.

Jedes Element ist mit einem Temperatursensor PT-100 ausgestattet, damit der HSL und die HST genau zu bestimmen sind.

## 3. Berechnungsverfahren im thermischen Modell

### 3.1. Generelle Annahmen für die Modellierung

Für die Berechnung der Strömungsverteilung ist das Modell der Geometrie des betrachteten Wicklungsabschnitts vorzugeben. Die Diskretisierung des Modells erfolgt, abgesehen von der Parameterstudie, mit 2,3 Millionen Elementen. Bei veränderlicher Weite oder Höhe der Ölkanäle wird die Elementanzahl dementsprechend angepasst. Als Rechenkern wird das Programm „CFX“, welches auf der Finite-Volumen-Methode basiert, verwendet und die Vernetzung wird mit dem Programm „ICEM-CFD“ durchgeführt. Da „CFX“ nicht über die explizite Möglichkeit einer 2D-Modellierung verfügt, wird ein 3D-Modell erstellt und nur eine Schicht der 3D-Elemente in Umfangsrichtung extrudiert. Daher zählt das numerische Modell noch als 2D-Modellierung für die Berechnungen. Aufgrund der numerischen Beschränkungen in der Simulationen gibt es geringfügige Abweichungen bei den Ergebnissen des Temperaturgradienten zwischen den Messungen und den 2D-Simulationen [8]. Da das Hauptanliegen dieses Beitrag jedoch eine Parameterstudie mittels CFD zur Identifikation wichtiger Parameter zur Auslegung von Leistungstransformatoren ist, spielen die Abweichungen bei den Ergebnissen eine untergeordnete Rolle. Am Eingang werden konstanter Massenstrom von 3 kg/s und eine Eintrittstemperatur von  $80^\circ\text{C}$  eingetragen. Alle Ränder werden mit einer Wandrandbedingung abgeschlossen und die Symme-

trieränder mit einer entsprechenden Symmetrierandbedingung festgelegt.

Die Randbedingungen werden entsprechend den Versuchsbedingungen angepasst. Die Öleigenschaften variieren bedingt durch die Veränderung der lokalen Temperatur. Da sich Strömungen anhand der Reynolds-Zahl (Re) gut charakterisieren lassen und sich insbesondere die laminar Strömung durch diese Zahl gut voraussagen lässt, ist die Reynolds-Zahl für die Strömung im Eingangsbereich des inneren Vertikalkanals, wo die Re-Zahl typischerweise am größten ist, angegeben [8].

### 3.2. Untersuchung der Abhängigkeit von Parametern

Um Einflüsse von wichtigen geometrischen Größen einer Wicklung und deren Randbedingungen auf die Temperaturverteilung und die Strömungsverteilung zu untersuchen, wird eine Parameterstudie mittels CFD durchgeführt. In Tabelle I sind die unterschiedlichen geometrischen Parameter mit ihren variierenden Werten dargestellt.

TABELLE I. UNTERSUCHTE GEOMETRIEN UND VORGEGEBENE RANDBEDINGUNGEN.

Parameter	Werte
Höhe der Horizontalkanäle (H)	4 mm, 6 mm
Weite der Vertikalkanäle (D)	6 mm, 10 mm
Anzahl der Wicklungsscheiben je Passage	6, 10

Im Gegensatz zu anderen Parametern der Kanalgeometrie ist die Anzahl der Scheiben zwischen zwei Barrieren nicht durch die elektrische Auslegung oder technische Beschränkungen des Transformators vorgegeben, sondern ist innerhalb bestimmter Grenzen frei wählbar. Deshalb stellt sich die Frage nach diesem Parameter beim Design der Wicklung zwangsläufig und dementsprechend wichtig ist die Kenntnis seines genauen Einflusses.

Die Anzahl der Scheiben zwischen zwei Barrieren wird zwischen 6 Scheiben und 10 Scheiben variiert. Die Verteilung der Massenströme mit 10 Scheiben und 6 Scheiben sind in den Bild 3a und Bild 3b dargestellt. Aus den Diagrammen sind ersichtlich, dass die Differenz zwischen dem kleinsten und dem größten Wert innerhalb der Passage, d.h. die Inhomogenität der Ölverteilung, zunimmt. Insbesondere tritt mit zunehmender Kanalweite eine starke Vergleichmäßigung der Ölverteilung ein.

Die Mindesthöhe der Horizontalkanäle ist meist wegen der Spannungsfestigkeit im konkreten Fall vorgegeben ist. Eine weitere Erhöhung führt zur Verschlechterung der gewünschten kapazitiven Kopplung zwischen den Scheiben und vergrößert den Platzbedarf der Wicklung [10]. Somit kann dieser Parameter oft nicht variiert werden. Dennoch ist es wichtig, die Wirkung des Parameters Kanalhöhe zu kennen. Für die genannte Konfiguration wird eine Angleichung der Massenströme bei größerer Kanalweite erzielt.

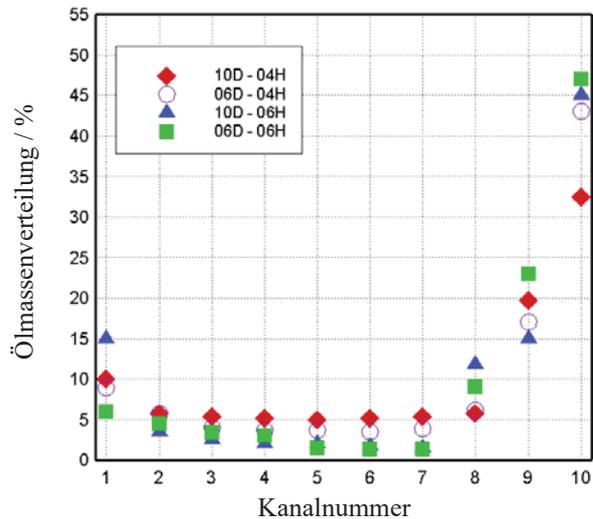


Bild 3a. Strömungsverteilung bei einem Ölmassenstrom von 3 kg/s und 10 Scheiben pro Passage.

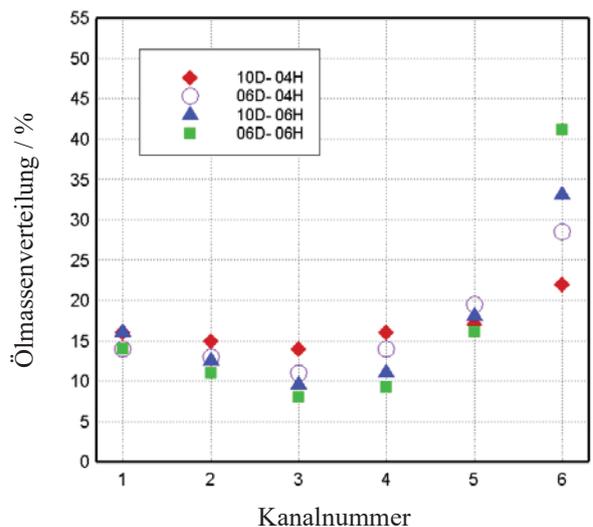
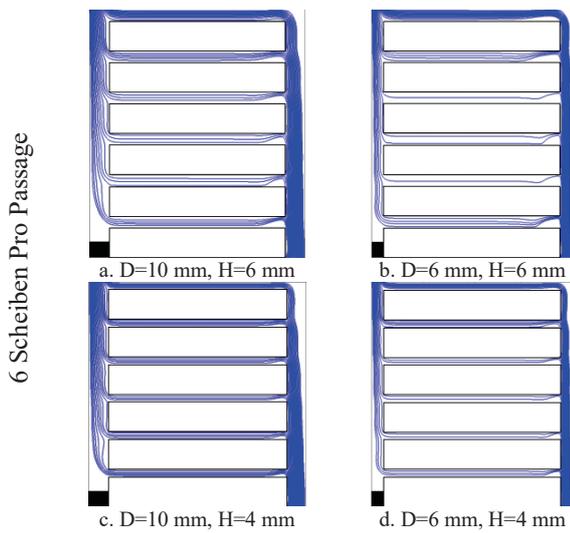
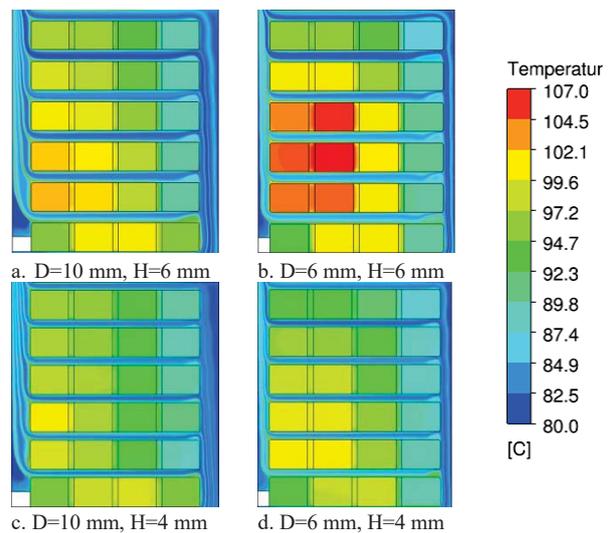


Bild 3b. Strömungsverteilung bei einem Ölmassenstrom von 3 kg/s und 6 Scheiben pro Passage.

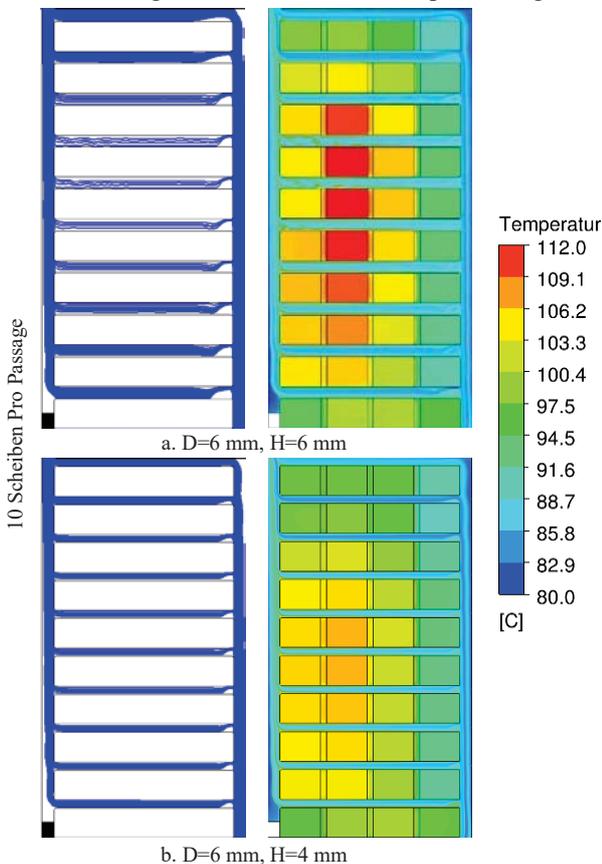
In den Abbildungen 4 und 5 sind die Stromlinien der Viskosität des Öls für eine Eintrittstemperatur von 80 °C für unterschiedliche Konfigurationen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die starken Ablösewirbel am Eingang des horizontalen Kühlkanals, welche den Durchfluss des Öls behindern, bei kleinerer Höhe der Horizontalkanäle (H) deutlich geringer sind. Das Öl verteilt sich somit deutlich homogener und bewirkt eine niedrigere Heißpunkttemperatur. Es ist zudem erkennbar, dass sich bei größerer Weite der Vertikalkanäle (D) auf beiden Seiten eine bessere Ölverteilung für einstellt und es damit zu einem geringeren Druckabfall in der Wicklung kommt. Darüber hinaus sind in Abbildungen 5 und 6 die Temperaturverteilungen des Massenstroms von 3 kg/s innerhalb der Passage mit 10 Scheiben und 6 Scheiben pro Passage dargestellt und der Einfluss von der Kanalhöhe ist gezeigt. Da die Kanalhöhe ein wichtiger Einfluss auf thermisches Design hat, wird im Bild 5, das Temperaturfeld verdeutlicht.



**Bild 4.** Stromlinien in unterschiedlichen Geometrien beim gleichen Temperaturfeld und einem Ölmassestrom von 3 kg/s und 6 Scheibenzahlen pro Passage.



**Bild 6.** Temperaturverteilung innerhalb der Passage mit unterschiedlichen Abmessungen bei 80 °C Öleintrittstemperatur und einem Ölmassestrom von 3 kg/s und 6 Scheiben pro Passage.



**Bild 5.** Stromlinien und Temperaturverteilung in unterschiedlichen Geometrien beim gleichen Temperaturfeld und einem Ölmassestrom von 3 kg/s und 10 Scheibenzahlen pro Passage.

Um für alle Wicklungsscheiben einen optimierten Wärmeübergang zu erhalten, sollten die Ölkanäle durch möglichst viele Barrieren unterteilt werden, da dann der Wärmeübergangskoeffizient anhand von der gleichmäßigen Ölverteilung am höchsten ist. Bei den in den Abbildungen 3 und 4 ersichtlichen Temperaturfeldern zeigt sich ebenso wie bereits beim Massestrom von 10 , 6 Scheibenzahlen

eine Vergleichmäßigung der Ölverteilung bei größer Kanalweite. Zudem ist es möglich zu erkennen, dass die Heißpunkttemperatur mit Scheibenzahlen von 10 deutlich größer als 6 Scheiben pro Passage ist. Zum besseren Vergleich der thermischen Verhältnisse für unterschiedliche Konfigurationen sind in Tabelle II die Ergebnisse der Parameterstudie aufgeführt.

Es werden die gemittelten Temperaturen, und der HTL und Heißpunkttemperatur bei verschiedenen geometrischen Parametern für die Scheibenzahlen von 6 und 10 pro Passage angegeben. Weitere Untersuchungen verdeutlichen, dass eine kleine Kanalhöhe bei gegebenem Massestrom zwar eine bessere Kühlung ergibt, jedoch die Werte der HST dementsprechend abnehmen.

Zudem hat eine geringe Höhe der Horizontalkanäle einen positiven Einfluss auf das thermische Verhältnis. Bei zu klein gewählten Werten besteht allerdings die Gefahr, dass aufgrund von Fertigungstoleranzen bei der Herstellung der Horizontalkanäle kleiner wird als vorgesehen. Deshalb ist von zu kleinen Kanalhöhen abzuraten. Es ist wichtig zu beachten, dass sich der HSL im mittleren Bereich der Passage befindet, weil weniger Öl im Bereich der mittleren Horizontalkanäle durchfließt und die Kühlung dort geringer ist.

Darüber hinaus haben die außenseitigen Leiter große Oberflächen zur Kühlung. Für eine effektive Wärmeübertragung ist erforderlich, dass die Passagen durch möglichst zahlreiche Barrieren unterteilt werden.

Im Gegensatz dazu haben die mittleren Leiter kleine Oberflächen, wodurch dort eine erhöhte Temperatur zu erwarten ist. So ist festzustellen, dass die beste Kühlleistung mit größeren Vertikalkanälen in Verbindung mit kleineren Horizontalkanälen erreicht wird.

Mit den genannten Ergebnissen können gezielte Untersuchungen der Strömungs- und Temperaturverhältnisse gemacht werden, woraus dann für Teilelemente bestimmte Auslegungskriterien und Berechnungsvorschriften abgeleitet werden können.

TABELLE II. THERMISCHE VERHÄLTNISSE DES WICKLUNGSMODELLS BEI UNTERSCHIEDLICHEN GEOMETRIEPARAMETERN MIT DEM ÖLMASSENSTROM VON 3 KG/S.

Geometrische Parameter der Wicklungskanäle		HST (°C)	Mittlere Temperatur (°C)	HSL (Scheiben-Nr.)	
6 Scheiben Pro Passage	D= 6	H= 4	101	95.4	3
		H= 6	107	97.6	3
	D= 10	H= 4	101	96	3
		H= 6	102	96.5	2
10 Scheiben Pro Passage	D= 6	H= 4	109	101.6	5
		H= 6	112	99.5	6
	D= 10	H= 4	107	97.9	5
		H= 6	111	98.2	6

#### 4. Zusammenfassung

Das thermische Verhalten der Scheibenwicklung in Leistungstransformatoren wird mittels CFD untersucht und der Einfluss der geometrischen Parameter auf die Temperaturverteilung und auf den HST betrachtet. Die CFD-Ergebnisse werden durch Messungen validiert. Das vorgestellte Wicklungsmodell ermöglicht eine genaue Abbildung der thermischen Verhältnisse der Wicklung. Um für alle Wicklungsscheiben einen möglichst guten Wärmeübergang zu erhalten, sollten die Ölkanäle möglichst oft durch Barrieren unterteilt werden, da dann der Wärmeübergangskoeffizient für alle Scheiben am gleichmäßigsten und am höchsten ist. Eine größere Anzahl Barrieren führt jedoch zu einem höheren Fertigungsaufwand und bedingen einen höheren Leistungsbedarf zum Strömungsantrieb. Eine kleine Kanalhöhe ergibt beim gegebenen Massenstrom eine bessere Kühlung.

#### 5. Referenzen

- [1]. Lapworth J., Picher P., Channet J., and et al. "CIGRÉ brochure 659: Transformer thermal modelling", CIGRÉ Working Group A2.38, A2.38, Tech. Rep., 2016.
- [2]. Khandan S., Tenbohlen S., Breuer C., and Lebreton R., "CFD study of fluid flow and temperature distributions in a power transformer winding", International IEEE conference on dielectric liquids, ICDL 2017, UK, available online, DOI: 10.1109/ICDL.2017.8124674.
- [3]. Zhang X., Wang Z. D., and Liu Q., "Interpretation of Hotspot factor for transformers in OD cooling modes", IEEE Transactions on Power Delivery, available online, 2017.
- [4]. Weinlaeder A. and Tenbohlen S., "Thermal-hydraulic investigation of transformer windings by CFD-modelling and measurements", 16<sup>th</sup> ISH, South Africa, 2009.
- [5]. Mufuta J. and Van E., "Modelling of the mixed convection in the windings of a disc-type power transformer", International Journal of Applied Thermal Engineering, vol. 20, pp. 417-437, 2000.
- [6]. Rahimpour E., Barati M., and Schafer M., "Investigation of parameters affecting the temperature rise in windings with zig-zag cooling flow path", Applied Thermal Engineering, vol. 27, no. 11, pp. 1923–, 2007.
- [7]. Torriano F., Chaaban M. and Picher P., "Numerical study of parameters affecting the temperature distribution in a disc-type

transformer winding," International Journal of Applied Thermal Engineering, vol. 30, pp. 234-244, 2010.

[8]. Tenbohlen S., Schmidt N., Breuer C., Khandan S., and Lebreton R., "Investigation of thermal behavior of an oil directed cooled transformer winding", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 33, No. 3, 1091-1098, 2017.

[9]. Tenbohlen S., Breuer C., Devaux F., Lebreton R., Schmidt N., and Stirl T., "Evaluation of the thermal performance of transformer windings by numerical investigations and measurements", CIGRE 2016, Paris, A2-309, 2016.

[10]. Del Vecchio R., Poulin B., Transformer design principales, 2010.