

Experimentelle und rechnerische Bestimmung

Einfluss des Strömungswiderstandsbeiwertes von Lüfterelementen auf die Kühlung von Transformatoren in Kompaktstationen

Fabrikfertige Transformatorstationen müssen die Anforderungen der DIN EN 61330 (IEC 1330) [1] hinsichtlich ihres Gehäuses, ihrer Bauteile und der Typ- und Stückprüfungen erfüllen. Lüfterelemente stellen ein wesentliches Bauteil der Gehäuse dar. Sie haben in erster Linie sicherzustellen, dass die Hauptbauteile einer fabrikfertigen Station nicht über die in entsprechenden DIN-Normen festgelegten Höchsttemperaturen hinaus erwärmt werden. Vor allem ist der Nachweis zu erbringen, dass die Lebenserwartung der Stationsbauteile, speziell des Transformators bei dem ihm zugedachten Betrieb, nicht unzulässig stark vermindert wird [2;3]. Hierzu ist nach den Bestimmungen ein Erwärmungsprüfverfahren zu verwenden, dass Einteilungen in die Temperaturklasse des Gehäuses vorsieht, z. B. Klasse 20. Die Angabe der Gehäuseklasse 20 [1] besagt, dass die maximale Übertemperatur des Öls bzw. die mittlere Übertemperatur der Wicklung des Transformators in dem Gehäuse nicht den jeweils gemessenen Wert des Transformators ohne Gehäuse um mehr als 20 K überschreitet.



Dr.-Ing. *Illo-Frank Primus* ist Geschäftsführer Technik der Betonbau GmbH & Co. KG, Waghäusel; Dr.-Ing. *Mario Schenk*, Bereich Entwicklung bei der Starkstrom-Gerätebau GmbH, Regensburg.

Darüber hinaus werden Lüfterelemente bzw. deren Strömungskanäle auch gleichzeitig als Druckentlastungsöffnungen im Störlichtbogenfall verwendet und tragen somit dazu bei, eine Druckwelle aus dem Stationsinneren unter Kühlung der heißen Gase ins Freie abzuführen [4;5].

Außerdem sollen normgerechte Lüfterelemente Insekten abwehren, stochersicher sein, den minimalen Schutzgrad IP 23 D in Übereinstimmung mit IEC 529 [6] aufweisen, somit auch das Eindringen von Sprühwasser und Flugschnee, aber auch die Betauung der Station verhindern. Schließlich müssen sie stabil, wartungsarm und preisgünstig sein [7].

Untersuchungen haben gezeigt, dass nicht der freie Lüftungsquerschnitt, sondern die Gesamtkonstruktion des Lüfterelementes und seiner Strömungskanäle, und somit der Strömungswiderstandsbeiwert ζ maßgeblichen Einfluss auf die geforderten Eigenschaften ausübt [8].

Im Folgenden wird an zwei typischen Kompaktstationen und an verschiedenen heute in Deutschland bei fabrikfertigen Stationen eingesetzten Lüfterelementkonstruktionen der Einfluss des Strömungswiderstandsbeiwertes auf die Erwärmung und damit die Lebensdauer der Bauteile untersucht.

Untersuchte Kompaktstationen

Als typische Kompaktstationen werden eine Betonkompaktstation UK 1250 (*Bild 1* und *2*) und eine Stahlblechstation ähnlicher Geometrie (*Bild 3*, LCS-E.6) gewählt.

Bei konstanter Größe der Aussparung in der Betonwand der Betonkompaktstation UK 1250 kann für den Einsatz verschiedener Lüfterelementkonstruktionen einerseits und für den Einsatz eines separaten

Lüftungskonzepts bei der Stahlblechstation LCS-E.6 andererseits aufgezeigt werden, welchen Einfluss die unterschiedlichen Strömungswiderstandsbeiwerte diverser Lüfterelemente bzw. das Lüftungskonzept mit separater Luft Eintrittsöffnung/Dachentlüftung auf die Temperatur des Transformators ausüben.

Experimentelle Bestimmung der Strömungswiderstandsbeiwerte von Lüfterelementen

Da die Berechnung der Strömungswiderstandsbeiwerte $\zeta_{e,a}$ der Lüfterelemente, die heute in Netzstationen eingesetzt werden, aufgrund ihrer strömungstechnisch komplizierten Konstruktionen nur mit hohem Aufwand möglich ist, werden diese in der Regel experimentell bestimmt [7;8;9].

Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Verwendet wurde ein Stationsmodell aus Stahlblech (Dicke $d = 1,5$ mm) mit der Grundfläche $A = 1$ m x 0,9 m und der Höhe $h = 2$ m. Im oberen und unteren Bereich befinden sich quadratische Lüftungsöffnungen [Eintritt (e), Austritt (a)], Größe $A_e = A_a = 0,3$ m x 0,3 m, mit einer mittleren Höhendifferenz von $\Delta h_{tr} = 1,5$ m (*Bild 4*). Die Öffnungen sind mit jeweils zwei Gittern gleicher Bauart und gleicher Größe versehen. In dem Stationsmodell befinden sich in den Höhen $h = 0,4$ m, 1 m und 1,6 m elektrische Heizkörper. Die Heizleistung P_{el} der Heizkörper konnte für die jeweiligen Heizebenen getrennt verändert werden. Die Heizleistung wurde mit einem Präzisions-Leistungsmessgerät bestimmt.

Damit über die Wände des Stationsmodells nur ein geringer Teil der Heizleistung abgeführt wird, wurden diese mit Styroporplatten (Dicke $d = 50$ mm) thermisch isoliert. Die über die Wände des Stationsmodells abgeführte Leistung P_W wurde in einem Kalibrierversuch am Stationsmodell mit verschlossenen Lüftungsöffnungen, bei dem $P_W = P_{el}$ ist, abhängig von der Temperaturdifferenz Θ_W über den thermisch isolierten Wänden gemessen. Θ_W wurde aus der Differenz des Mittelwertes der Temperaturen der Wände vor der thermischen Isolierung ϑ_W und der Umgebungstemperatur ϑ_0 bestimmt. Da-

zu wurde ϑ_W mit 18 NiCr-Ni-Thermoelementen gemessen. ϑ_0 wurde mit zwei Thermoelementen in der Höhe $h = 1$ m im Abstand $d = 1$ m gemessen.

Die mittlere Temperatur der Luft im Stationsmodell ϑ_m wurde über den elektrischen Widerstand eines dünnen Eisendrahtes, der schleifenförmig in zehn Ebenen in der Höhe $h = 1$ m im Abstand $d = 1$ m gemessen.

Die Temperatur ϑ_e der Luft am Eintritt in das Stationsmodell, die gleich der Umgebungstemperatur ϑ_0 ist, wurde mit zwei Thermoelementen gemessen. Die Temperatur ϑ_a der Luft am Austritt aus dem Stationsmodell wurde über den elektrischen Widerstand eines zweiten Eisendrahtes (Länge $l = 4$ m), der in Schleifen vor der Öffnung des Luftaustritts gespannt war, gemessen.

Versuchsauswertung

Unter den Voraussetzungen

$$\zeta_e = \zeta_a = \zeta_{e,a} \quad (1)$$

und

$$A_e = A_a = A_{e,a} \quad (2)$$

und der Annahme, dass beide Lüfterelemente von Luft mit einer mittleren Temperatur

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_a + \vartheta_e}{2} \quad (3)$$

durchströmt werden, kann der auf die geometrischen Flächen $A_{e,a}$ der Lüfterelemente bezogene Strömungswiderstandsbeiwert $\zeta_{e,a}$ zu

$$\zeta_{e,a} = \frac{\Delta p_{tr} A_{e,a}^2}{\dot{V}_0^2 \rho_0 (1 + \beta_0 \vartheta_m)} \quad (4)$$

berechnet werden [8]. Die Druckverluste durch Reibung an den Wänden des Stationsmodells, den Drähten zur Messung der mittleren Temperaturen und den Wärmestromquellen im Stationsmodell sind vernachlässigbar klein. Die Druckverluste durch den Carnotschen Stoß werden den Lüfterelementen zugerechnet und sind damit im Strömungswiderstandsbeiwert $\zeta_{e,a}$ enthalten.

Die treibende Druckdifferenz Δp_{tr} in Gl. (4) kann nach

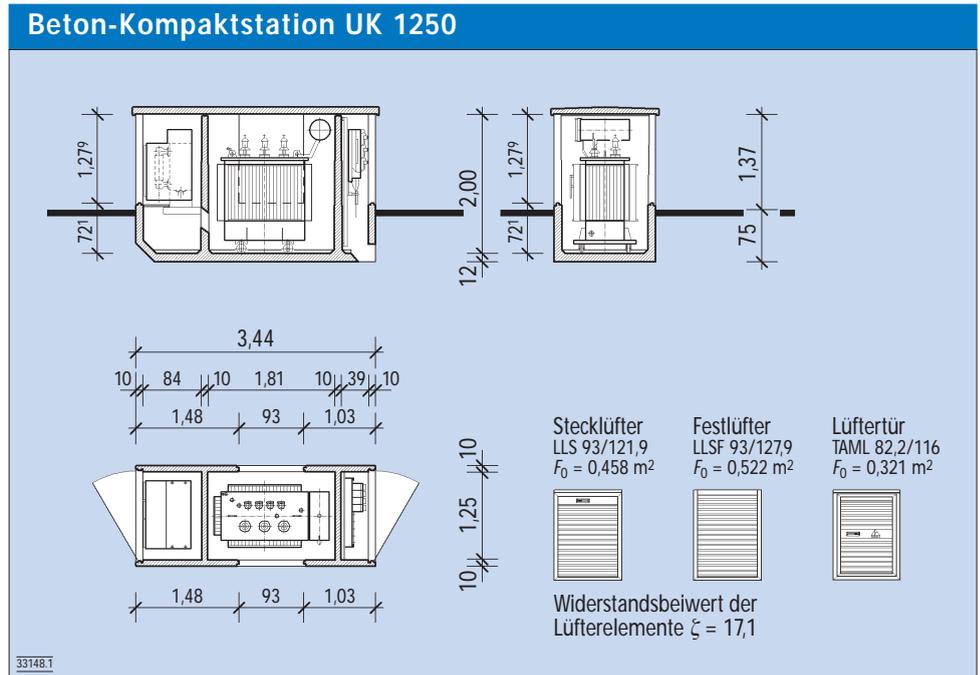


Bild 1. Beton-Kompaktstation UK 1250, Abmessungen

$$\Delta p_{tr} = g \Delta h_{tr} (\rho_e - \rho_m) =$$

$$g \Delta h_{tr} \rho_0 \left(\frac{1}{1 + \beta_0 \vartheta_e} - \frac{1}{1 + \beta_0 \vartheta_m} \right) \quad (5)$$

mit ρ_0 Dichte bei 0 °C, ρ_e Dichte am Lufteintritt, ρ_m mittlere Dichte im Stationsmodell, g Erdbeschleunigung, β_0 Volumenausdehnungskoeffizient, auf 0 °C bezogen, berechnet werden [3]. Der Volumenstrom der Kühlluft \dot{V}_0 wird aus der über den Volumenstrom aus dem Stationsmodell abgeführten Wärmeleistung $P_{\dot{V}}$ und der Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta_{ea}$ zwischen dem Luftein- und dem Luftaustritt entsprechend der Energiebilanz für den Luftstrom

$$\dot{V}_0 = \frac{P_{\dot{V}}}{c_p \rho_0 \Delta \vartheta_{ea}} \quad (6)$$

berechnet. Die über den Volumenstrom der Kühlluft \dot{V} aus dem Stationsmodell abgeführte Wärmeleistung $P_{\dot{V}}$ wird dabei nach

$$P_{\dot{V}} = P_{el} - P_W \quad (7)$$

aus der eingespeisten elektrischen Leistung P_{el} und der über die Wände des Stationsmodells abgeführten Leistung P_W bestimmt.

Versuchsergebnisse

Für zahlreiche unterschiedliche Lüfterelemente [8;9] wurden die

Strömungswiderstandsbeiwerte $\zeta_{e,a}$ nach Gl. (4) ermittelt. Dabei ergaben sich Strömungswiderstandsbeiwerte im Bereich $9,7 \leq \zeta \leq 171,7$. Ausgewählte Ergebnisse sind in *Tafel 1* zusammengefasst.

Der Strömungswiderstandsbeiwert $\zeta_{e,a}$ ist um so größer, je mehr Umlenkungen, Querschnittsveränderungen und Einbauten sich im Strömungskanal der Lüfterelemente befinden.

Berechnung der Strömungswiderstandsbeiwerte von Lüfterelementen

Für Lüfterelemente, z. B. die Lüfterelemente 5 und 6 (*Tafel 1, Bild 5*),



Bild 2. Kompaktstation UK 1250



Bild 3. Stahlblechstation LCS-E.6

können die Strömungswiderstandsbeiwerte ζ mit CFD-Programmen (CFD = Computational Fluid Dynamics) berechnet werden [8].

Dazu wurde ein CFD-Modell eines Strömungskanales mit einem Querschnitt von $A = 0,3 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}$ und einer Länge von $l = 0,5 \text{ m}$ aufgebaut, in dem sich das Lüfterelement befand. Das Gitternetz der Volumenelemente für die CFD-Berechnung wurde dabei im Bereich des Lüfterelements deutlich feiner gewählt als das Gitternetz im Bereich des Strömungskanales (Bild 6).

In Anlehnung an die zuvor beschriebenen Versuche wurde eine Geschwindigkeit der Luft im Strömungskanal von $v = 0,3 \text{ ms}^{-1}$ angenommen. Aus der sich bei der Berechnung ergebenden Differenz der Drücke vor und nach dem Lüfterelement Δp im Strömungskanal und der Strömungsgeschwindigkeit v kann nach

$$\zeta = \frac{2 \Delta p}{\rho v^2} \quad (8)$$

[10, S. La1] der Strömungswiderstandsbeiwert ζ der Lüfterelemente bestimmt werden.

Die berechneten Strömungswiderstandsbeiwerte der Lüfterelemente 5 und 6 betragen $\zeta_{5,\text{Rech}} = 31,3$ und $\zeta_{6,\text{Rech}} = 11,0$. Sie weichen um $\Delta\zeta_{5,\text{Rech-Mess}} = 0,5$ ($f_r = 1,6\%$) und $\Delta\zeta_{6,\text{Rech-Mess}} = 1,3$ ($f_r = 13,4\%$) von den gemessenen Werten ab (Tafel 1). Mit diesen Beispielen kann gezeigt werden, dass eine Entwicklung und Dimensionierung von Lüfterelementen durch die Berechnung mit CFD-Programmen möglich ist. Durch die Auswertung des Geschwindigkeitsfeldes der Strömung innerhalb der Lüfterelemente (Bild 6) können die Lüfterelemente hinsichtlich der Druckverluste und Strömungswiderstandsbeiwerte optimiert werden.

Einfluss des Strömungswiderstandsbeiwertes auf die Erwärmung des Transformators

Am Beispiel der Kompaktstation UK 1250 wurde untersucht, wie sich die Größe des Strömungswiderstandsbeiwertes der Lüfterelemente bei konstanten Luftein- und Luftaustrittsflächen $A_e = A_a = 1 \text{ m}^2$ (Lüftungskonzept: zwei durchgehende Lüfterelemente auf beiden Seiten

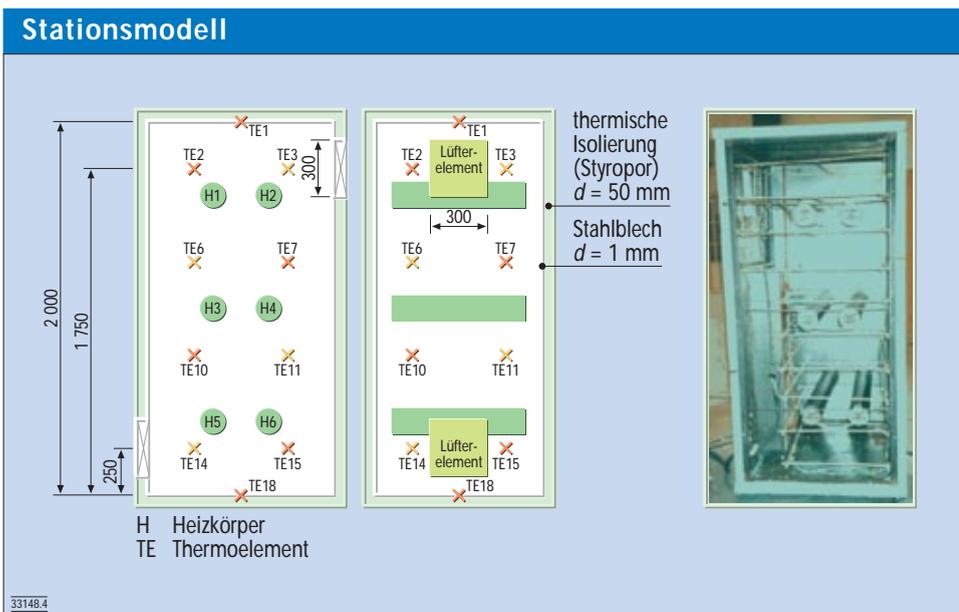


Bild 4. Stationsmodell zur Bestimmung des Strömungswiderstandsbeiwertes von Lüfterelementen

Tafel 1						
Lüfterelement nach Bild 5	1	2	3	4	5	6
Hindernisse im Strömungskanal	L1	–	–	–	–	–
wirksame Breite des Gitters	300	300	300	300	300	300
wirksame Höhe des Gitters	150	300	290	270	270	275
Strömungswiderstandsbeiwert ζ						
Mittelwert	17,1	39,7	10,3	73,2	30,8	9,7
Standardabweichung	0,7	1,1	2,7	6,3	1,1	0,4
Lochblech L1: Lochdurchmesser $D = 2,5 \text{ mm}$, Stegbreite $d = 1 \text{ mm}$						

Tafel 1. Strömungswiderstandsbeiwerte ζ von Lüfterelementen nach Bild 5 (experimentell bestimmt)

Lüfterelemente

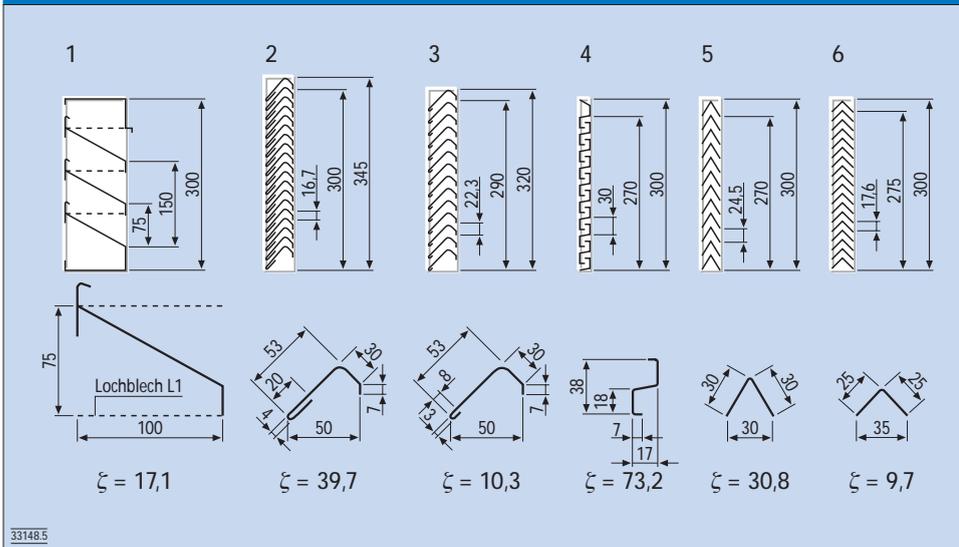


Bild 5. Lüfterelemente 1 bis 6 [8]

der Station) sowie konstanter treibender Höhendifferenz $\Delta h_{tr} = 0,56$ m auf die Erwärmung eines 630-kVA-Transformators auswirkt. Dazu wurde im Wärmenetzmodell der Station UK 1250, dass durch zahlreiche Messungen bestätigt ist [8], der

Strömungswiderstandsbeiwert im Bereich $10 \leq \zeta \leq 100$ variiert. Aus der maximalen Öltemperatur des Transformators in freier Aufstellung sowie bei Betrieb in der Netzstation wurde die Gehäuseklasse für unterschiedliche Verlustleistungen des

Transformators $5\,500\text{ W} \leq P_{Tr} \leq 8\,500\text{ W}$ und eine konstante Verlustleistung der NS-Verteilung von $P_{NS} = 1\,000\text{ W}$ bestimmt. Die Größe der Kesseloberfläche des Transformators wurde bei den Berechnungen nicht verändert. Es zeigt sich, dass mit größer werdenden Strömungswiderstandsbeiwerten der Lüfterelemente oder größer werdender Verlustleistung des Transformators die für die Bestimmung der Gehäuseklasse zu bewertende Temperaturdifferenz deutlich größer wird (Bild 7 und 8). Wird z. B. das Lüfterelement 1 aus Tafel 1 bzw. Bild 5 für die Öffnung in der Kompaktstation UK 1250 gewählt, lässt sich bei Einhaltung der Gehäuseklasse 20 der untersuchte Transformator mit der kühlenden Oberfläche $O_{Tr} = 25\text{ m}^2$ bis zur Verlustleistung von 8,5 kW bzw. größer in der Station einsetzen. Bei Wahl eines Lüfterelementes mit einem Strömungswiderstand von $\zeta = 50$ kann außerdem falls 7 kW Transformatorverlustleistung, bei einem Lüfterelement mit $\zeta = 70$ nur rd. 6 kW Transformatorverlustleistung bei Einhaltung der Gehäuseklasse 20 abgeführt werden.

Um eine Vergleichbarkeit der Lüfterelemente in Tafel 1 herzustellen, ist anzumerken, dass die Konstruktion des Lüfterelementes 6, Tafel 1 bzw. Bild 5 nicht die geforderten Eigenschaften hinsichtlich Insektenchutz, Stochersicherheit, Sprühwasserschutz und Schutzgrad IP 23D hat. Zur Erreichung dieser Eigenschaften wird in der Regel ein innen vertikal angeordnetes, engmaschiges Streckmetallblech unmittelbar an den Lüftungslamellen anliegend eingesetzt. Dadurch kann der Strömungswiderstandsbeiwert von $\zeta = 10$ z. B. auf $\zeta = 48$ (Angabe eines Herstellers) erhöht werden, wodurch eine entsprechend höhere Einstufung der Gehäuseklasse stattfindet. Lüfterelementkonstruktionen mit höheren Strömungswiderstandsbeiwerten können durch größere Flächen an Lüfterelementen und somit größeren Lüftungsquerschnitten kompensiert werden. Damit sind jedoch in der Regel höhere Kosten verbunden. Oft ist der benötigte Platz vor allem bei nicht begehbaren Kompaktstationen in den Wänden nicht mehr vorhanden. Auch im Störlichtbogenfall mit dem relativ kurzen Druckauf- und -abbau (innerhalb von zehntel Sekunden)

Gitternetze und Strömungsgeschwindigkeiten

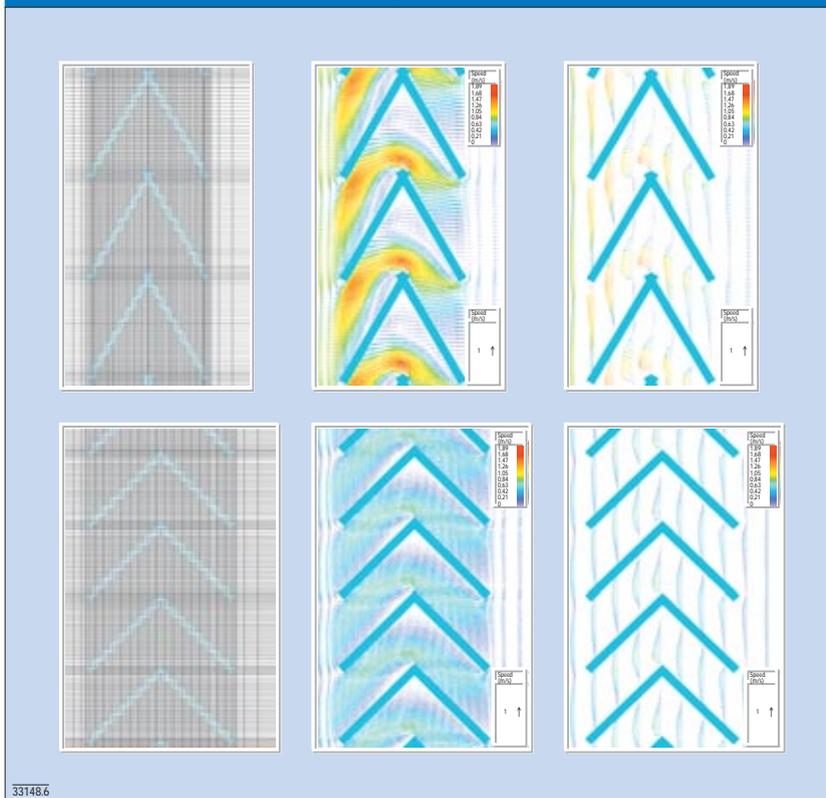


Bild 6. Gitternetz und berechnete Strömungsgeschwindigkeiten für die Lüfterelemente 5 und 6 nach Bild 5

Maximale Ölüber Temperatur

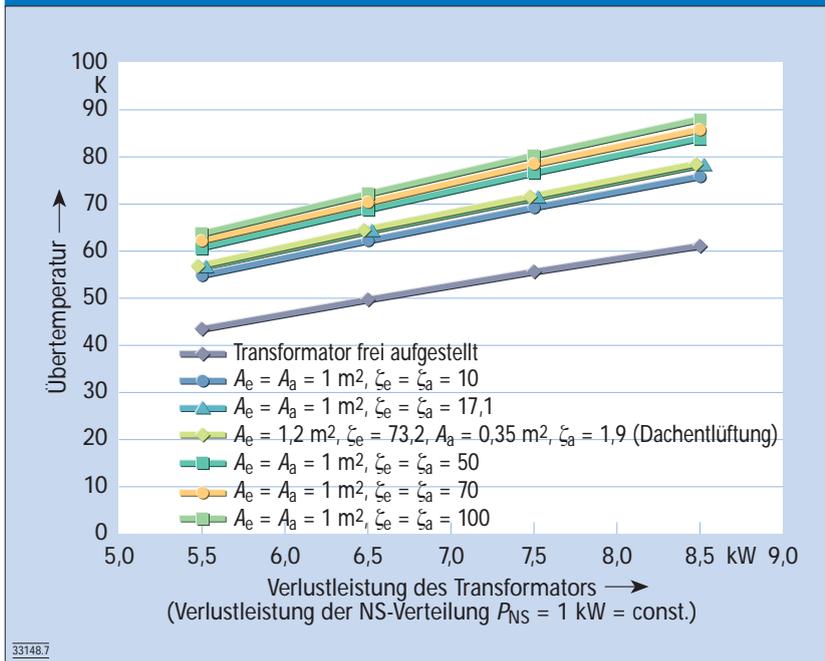


Bild 7. Maximale Ölüber Temperatur abhängig vom Strömungswiderstandsbeiwert von Lüfterelementen und der Verlustleistung des Transformators in der Kompaktstation UK 1250, $P_{NS} = 1 \text{ kW}$, Verhalten einer Netzstation ähnlicher Abmessungen, z. B. LCS-E.6, mit Lüftungskonzept Lufteintrittsöffnung – Dachentlüftung

Gehäuseklassen

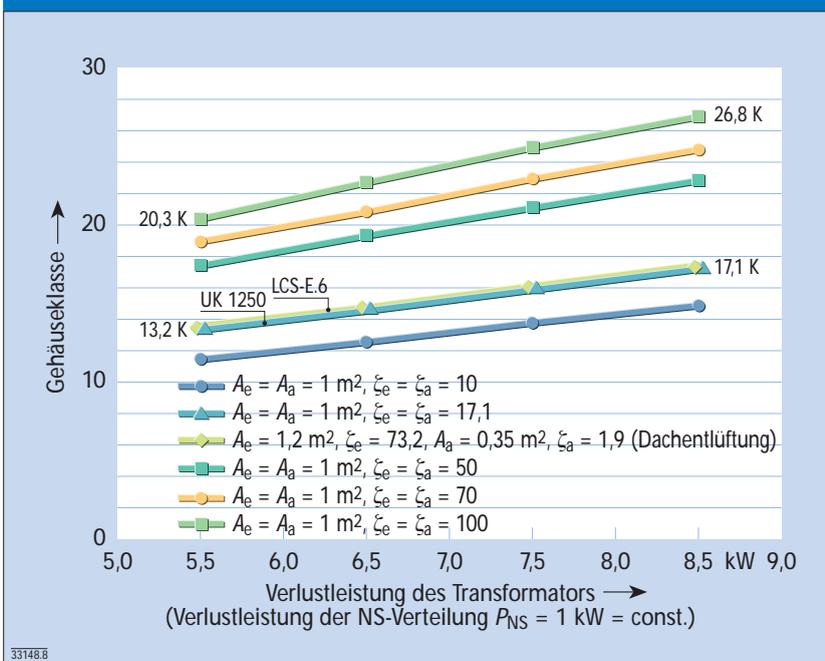


Bild 8. Temperaturerhöhung des Transformators gegenüber Freiluftaufstellung (Gehäuseklassen) abhängig vom Strömungswiderstandsbeiwert von Lüfterelementen und der Verlustleistung des Transformators in der Kompaktstation UK 1250, $P_{NS} = 1 \text{ kW}$, Verhalten einer Netzstation ähnlicher Abmessungen, z. B. LCS-E.6, mit Lüftungskonzept Lufteintrittsöffnung – Dachentlüftung

führt ein geringerer Strömungswiderstandsbeiwert zu einem geringeren Druckaufbau im Stationsinnern [4;5].

Schließlich soll darauf hingewiesen sein, dass die in der Kompaktstation UK 1250 durch Einsatz eines Lüfterelementes gemäß Konstruktion 1, Tafel 1 bzw. Bild 5, gegenüber einem Lüfterelement mit z. B. $\zeta = 50$ bzw. $\zeta = 70$ bewirkte Temperaturdifferenz von 5 K bzw. 7 K bei z. B. 7,5 kW Verlustleistung des Transformators nach DIN 57536 bzw. IEC 354 die Lebensdauer des Transformators erheblich mindert. Denn nach wissenschaftlichen Veröffentlichungen verdoppelt sich im Bereich von 80 bis 140 °C der Lebensdauerverbrauch von Transformatoren, wenn die Temperatur um $\approx 6 \text{ K}$ steigt [2]. Der Lebensdauerverbrauch wurde für einen Transformator mit einer Wicklungs-Heißpunkttemperatur von 98 °C festgelegt [2;11].

Muss zur Gewährleistung einer möglichst kleinen Baugröße – z. B. einer Stahlblechstation LCS-E.6 –, ein stochersicheres Lüfterelement mit sehr geringer Tiefe, das deshalb einen höheren Strömungswiderstandsbeiwert hat – z. B. Gitter 4, $\zeta = 73,2$ –, eingesetzt werden, so kann die Gehäuseklasse auch durch ein verändertes Lüftungskonzept verbessert werden. Dazu werden auf beiden Seiten der Station größere Lufteintrittsgitter nur im unteren Bereich ($A_e = 1,2 \text{ m}^2$) sowie eine Dachentlüftung ($A_a = 0,35 \text{ m}^2, \zeta = 1,9$) im obersten Bereich angeordnet. Der erhöhte Strömungswiderstandsbeiwert der Lufteintrittsgitter wird in diesem Fall durch eine ausreichend groß dimensionierende Dachentlüftung mit niedrigem Strömungswiderstandsbeiwert in Kombination mit der größeren treibenden Höhendifferenz zwischen Luftein- und Luftaustritt kompensiert (Bild 3, 7 und 8).

Zusammenfassung

Die Strömungswiderstandsbeiwerte der Lüfterelemente von Netzstationen haben einen deutlichen Einfluss auf die Erwärmung der Geräte in diesen Stationen und damit auf die Gehäuseklasse. Im vorliegenden Aufsatz wird erläutert, wie die Strömungswiderstandsbeiwerte experimentell oder durch CFD-Berechnungen bestimmt werden können. Dabei zeigt sich eine gute Überein-

stimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Werten. Mit dem Wärmenetz der Station UK 1250 wurde die Erwärmung eines 630-kVA-Transformators abhängig vom Strömungswiderstandsbeiwert der Lüfterelemente und der Verlustleistung des Transformators berechnet. Es zeigt sich, dass sich die für die Bestimmung der Gehäuseklasse zu bewertende Temperaturdifferenz beim Einsatz von Lüfterelementen mit einem Strömungswiderstandsbeiwert von $\zeta = 10$ gegenüber $\zeta = 100$ um rd. ein Drittel verringert (*Bild 7* und *8*).

Bei Stahlblechstationen, z. B. LCS-E.6, in denen zur Gewährleistung einer kleinen Baugröße Luft-eintrittsgitter geringer Tiefe mit größerem Strömungswiderstandsbeiwert erforderlich sind, können ähnlich positive Wirkungen auf die Gehäuseklasse durch eine großflächige Entlüftung der Station im Dachbereich unter Ausnutzung der

größeren treibenden Höhendifferenz erreicht werden (*Bild 3, 7* und *8*).

LITERATUR

- [1] IEC 61330 (1995), EN 61330 (1996), VDE 0670 Teil 611: High voltage/low voltage prefabricated substations, Fabrikfertige Stationen für Hochspannung/Niederspannung.
- [2] IEC 354 (1991), DIN VDE 0536 (1977): Belastbarkeit von Öltransformatoren.
- [3] Löbl, H.: Zur Dauerstrombelastbarkeit und Lebensdauer der Geräte der Elektroenergieübertragung. Dissertation B, TU Dresden, 1985.
- [4] Primus, I.-F.: Störlichtbogenprüfung in Stationsgebäuden. *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 96 (1997) H. 14, S. 732 – 742.
- [5] Buchenau, R.; Primus, J.-F.; Schlüter, B.: Sicherheit und Schutz beim Betreiben von Ortsnetzstationen. *etz* (2001) H. 20, S. 22 ff.
- [6] IEC 529 (1989), EN 60529 (1991), DIN VDE 0470 (Nov. 1992): Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code).
- [7] Primus, I.-F.: Lüfterelemente für Transformatorstationen. *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 99 (2000), H. 11, S.18 – 26.
- [8] Schenk, M.: Thermische Bemessung von Netzstationen – Zur thermischen Bemessung der Geräte in kompakten Anlagen der Elektroenergietechnik am Beispiel von Netzstationen. VWEW Energieverlag, 1. Aufl., 2003, zugl. Dissertation, TU Dresden, 2002.
- [9] Schenk, M.; Löbl, H.: Thermische Bemessung von Netzstationen. *ew* Jg. 102 (2003), H. 23, S. 62 – 70.
- [10] VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. Springer Verlag, 8. Auflage, 1997.
- [11] Baral, K.; Primus, I.-F.: Lebensdauer eines 630-kVA-Transformators in einer Beton-Netzstation. *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 78 (1979) H. 8, S. 268 – 276.

(33148)

illo-frank.primus@betonbau.com

mario.schenk@sgb-trafo.de

www.betonbau.com

www.sgb-trafo.de