Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 82 (1990)
Heft: 9

Artikel: Die Ventilationsverluste der rotierenden elektrischen Maschine
Autor: Baer, Jürgen / Geller, Marius
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939830

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

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

Die Ventilationsverluste der rotierenden elektrischen Maschine

Berechnung und Messung

Jürgen Baer, Marius Geller

Zusammenfassung

Die Zeit der grosszügigen Energienutzung ist vorbei. Jede Art der Energieumwandlung erfolgt mehr und mehr durchdacht und mit ständig steigender Effizienz. So ist es nicht verwunderlich, dass die Betreiber von Kraftwerken vermehrt Wert auf hohe Wirkungsgrade ihrer Anlagen legen und dabei auch den Leerlaufverlusten, die während des Betriebes mit Teillast besonders stark ins Gewicht fallen, wachsende Beachtung schenken.

Dementsprechend haben sich die Hersteller darauf vorbereitet, den ständig steigenden Anforderungen auf der Käuferseite nachzukommen. So wurden auch im Fragenkreis der Ventilation elektrischer Maschinen vielseitige Entwicklungsversuche mit verfeinerter Messtechnik vorgenommen, neue Erkenntnisse gewonnen, theoretische Untersuchungen vorangetrieben und fortschrittliche Rechenmittel geschaffen.

Dieses Vorgehen gestattet es Asea Brown Boveri, klare Aussagen über die ventilationsbedingten Verluste drehender elektrischer Maschinen als Hauptanteil der Leerlaufverluste zu machen sowie diese im Versuchsfeld oder in der Anlage messtechnisch genau zu erfassen.

Résumé: Les pertes de ventilation des machines électriques tournantes – calculs et mesures

Les temps du gaspillage d'énergie sont révolus. Chaque sorte de transformation d'énergie est de plus en plus réfléchie et efficace. Ainsi n'est-il pas étonnant, si les exploitants de centrales accordent de plus en plus d'importance aux performances de leurs installations et portent une attention croissante sur les pertes en marche à vide, qui jouent un rôle particulièrement important dans l'exploitation à charge partielle.

En conséquence, les fabricants se sont préparés à répondre aux exigences croissantes de la part des acheteurs. En matière de ventilation des machines électriques, des expériences étendues ont été entreprises, avec une technique de mesure sophistiquée, ce qui a mené à de nouvelles découvertes, à l'avancement des recherches théoriques et à la création de techniques de calcul évolués.

Ces expériences ont permis à Asea Brown Boveri, de faire la part exacte des pertes de ventilation dans les machines électriques tournantes ainsi que de les mesurer exactement, soit sur plateforme d'essais, soit dans l'installation.

Summary: The ventilation losses of rotating electrical machines – Their calculation and measurement

The era of unrestrained power utilization is over. Energy conversion, in all its forms, is today rigorously planned, and its efficiency is steadily increasing. It is therefore hardly surprising that the owners of power plants put more and more emphasis on high unit efficiency and pay growing attention to the open circuit losses, which weigh so heavily during part load operation.

The outcome of this is that the manufacturers have taken steps to comply with the ever more exacting requirements of the marketplace. In order to understand more about the ventilation of the electrical machines a wide range of development tests have been performed using refined measurement techniques; new knowledge has been gained in this field, and advanced computer software tools have been developed.

This approach qualifies Asea Brown Boveri to determine on the ventilation-related losses of rotating electrical machines – the main component of the no-load losses – and to undertake the accurate measurement of these losses in the test lab or on the plant site.

Einführung

Bei Kraftwerksneuanlagen sowie Nachrüstungen älterer Generatoren rückt das Vermindern der Leerlaufverluste, die im wesentlichen mit der Kühlung der Generatoren verbunden sind, vermehrt in den Vordergrund. Gleichzeitig tritt seitens der Betreiber die Frage auf, wie die vom Anlagenbauer berechneten, ventilationsabhängigen Verluste praktisch nachgewiesen werden können.

Geringere Ventilationsverluste verlangen einen etwas grösseren Aufwand für intensive Berechnungen, für die Fertigung besonders gestalteter Bauteile des Generatorkühlkreises, für engere Fertigungstoleranzen sowie für zusätzlich erforderliche Leit- und Absperrvorrichtungen für die Kühlmittelströmung. Diese Mehraufwendungen sind bei der heutigen Verlustbewertung gerechtfertigt [1].

Dass ABB die Werkzeuge für die notwendigen Berechnungen zur Auslegung verlustarmer Kühlkreise besitzt und auch in der Lage ist, den messtechnischen Nachweis anzutreten, kann der vielfältigen Literatur entnommen werden [1 bis 4, 9, 12].

Nachfolgend wird auf die Berechnung der Ventilationsverluste sowie auf ihre Messung einschliesslich der Berücksichtigung von veränderten Betriebszuständen oder Stoffdaten eingegangen. Die Praxis hat gezeigt, dass dafür ein gewisses Informationsbedürfnis vorliegt.

Einteilung der Ventilationsverluste

Um die aus Einzelanteilen zusammengesetzten Ventilationsverluste einer elektrischen Maschine nachzuweisen, ist es notwendig, die Mechanismen ihrer Entstehung zu analysieren. Im allgemeinen sind die Verluste mit dem Rotor als energieübertragendes Bauteil verknüpft (Bild 1). Im einzelnen sind folgende Verlustanteile zu nennen:

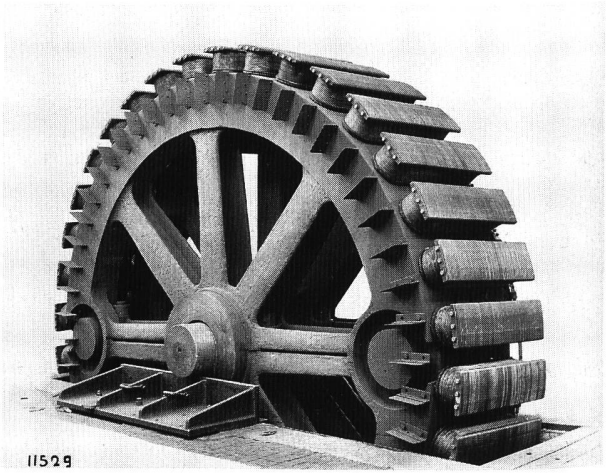

Bild 1. Generatorrotor, Baujahr 1920, eine Drehrichtung. Es handelt sich bezüglich der Ventilationsverluste um eine verbesserungswürdige Konstruktion.

1. Antriebsleistung eines am Rotor angeflanschten Ventilators zur Förderung des für die Generatorkühlung erforderlichen Gasstromes.
2. Beschleunigungsleistung desjenigen Kühlstromanteils, der durch die Kühlkanäle des Rotors strömt.
3. Verluste durch Leckageströme im Rotorkühlkreis. Es handelt sich dabei um Kühlstromanteile, die infolge unvermeidbarer, berührungsloser Dichtungen in einen selbständigen Strömungskreis eintreten.
4. Zirkulationsverluste, die sich an der Polradaussenkontur durch Druckunterschiede oder unstete Oberflächenkonturen einstellen.
5. Rotoroberflächenreibung (Mantel- und Scheibenreibung).

Die quantitative Erfassung der Einzelverluste verlangt aufwendige Rechenmittel sowie Kenntnisse über die komplexen Strömungszusammenhänge zwischen den rotierenden und stillstehenden Teilen einer elektrischen Maschine.

Die Berechnung der Verlustanteile

Die ausreichend genaue Bestimmung der Ventilationsverluste einer elektrischen Maschine ist nur möglich, wenn vom Kühlkreis mit allen parallelen Zweigen und Bypässen einschliesslich Zirkulationskreisen die Ergebnisse einer Strömungsnetzberechnung vorliegen. Ein solches Strömungsnetz ist am Beispiel eines Hydrogenerators in Bild 2 dargestellt. Mit den Ergebnissen solcher Berechnungen ist die Kühlstromverteilung erfasst, womit die Anteile der Ventilationsverluste der folgenden Bewertung zugeführt werden können:

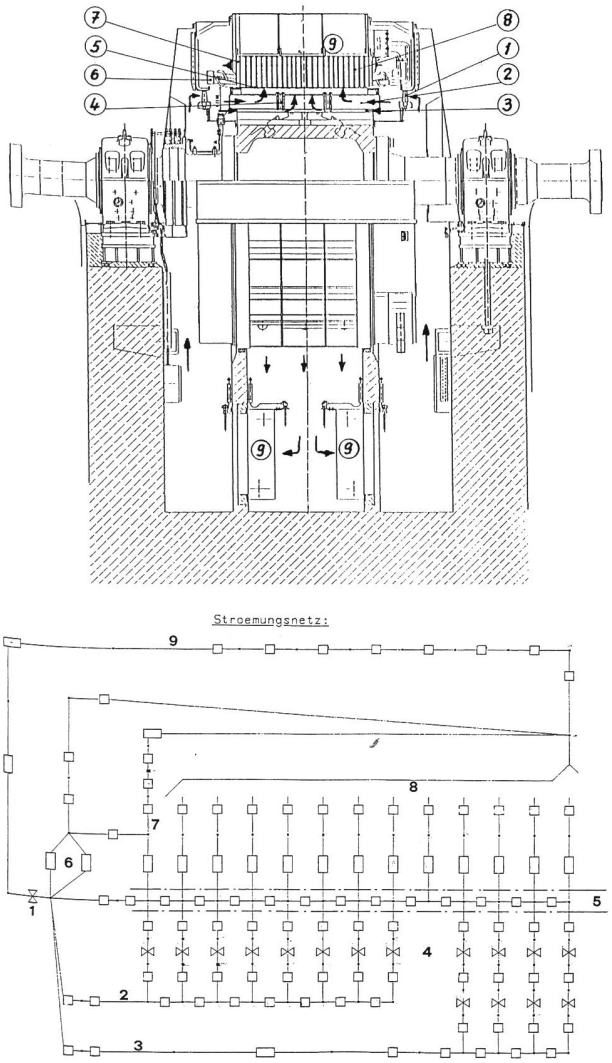

Bild 2. Beispiel eines Strömungsnetzes für einen Hydrogenerator.
a) Generatorschnitt, → Strömungsrichtung des Kühlmediums
b) Strömungsnetz für eine Hälfte des symmetrisch belüfteten Generators.
—⊻— Druckerzeuger, —□— Druckverbraucher, —■— Knoten, 1 Hauptventilator, 2 Pollücken, 3 Pollückengrundkanal, 4 Lage der Rotorkupferabstützung, 5 Generatorluftspalt, 6 Statorwickelkopf, 7 Pressplattenkanal, 8 Statorkühlkanäle, 9 Statorgehäuse, Kühler, Fundamentkanäle

Tabelle 1. Verwendete Formelzeichen und Indizes.

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
P	W	Leistung
D, d	m	Durchmesser
l	m	Länge
r	m	Radius
u	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
c	m/s	Absolutgeschwindigkeit
M	Nm	Drehmoment
$\dot{V}$	m^3/s	Volumenstrom
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
ρ	kg/m^3	Dichte
ν	m^2/s	kinematische Zähigkeit
ω	l/s	Winkelgeschwindigkeit
α	o	Winkel
k	–	Reibkoeffizient
$Re = \frac{u \cdot d}{\nu}$	–	Reynolds-Zahl

Indizes	Bedeutung
M	Mantel
S	Scheibe
1	Innen
2	Aussen
u	Umfangsrichtung

1. Ventilatorantriebsleistung

Die Strömungsnetzberechnung schreibt den Arbeitspunkt für den/die Kühlkreisventilatoren vor. Hiermit liegen sowohl der Fördervolumenstrom des Ventilators $\dot{V}$ als auch dessen Druckerzeugung Δp fest. Die Antriebsleistung des Ventilators P berechnet sich zu

$$P = 1/\eta \cdot \dot{V} \cdot \Delta p \qquad (1)$$

Wie die Gleichung (1) zeigt, ist zur Bestimmung der Antriebsleistung die Kenntnis des Gesamtwirkungsgrades η erforderlich, der in erster Linie von der strömungstechnischen Gestaltung des Ventilators abhängig ist. Falls es sich um einen an der Maschinenwelle befestigten Ventilator handelt, dessen Schaufelgeometrie den konstruktiven Gegebenheiten des Generators angepasst ist, wird dessen Antriebsleistung nach eigenen Computerprogrammen [3, 4] ermittelt. Im Falle von fremdangetriebenen Ventilatoren können die Angaben entweder den Katalogen von Unterlieferanten entnommen werden, oder die erforderlichen Daten werden im firmeneigenen Versuchslabor mit Hilfe einer Kennlinienmessung festgestellt.

2. Beschleunigungsverluste

In jedem rotierenden Maschinenteil, bei dem ein Gasstrom an einem Ort kleineren Durchmessers eintreten und an einem Ort grösseren Durchmessers austreten kann, entstehen Beschleunigungsverluste.

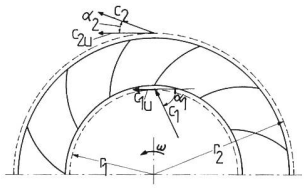

Bild 3. Zur Definition von Geschwindigkeiten und Strömungswinkeln bei einem Radialventilator.

Zur Erklärung dieser Beschleunigungsverluste soll die Strömung an einer druckerzeugenden Radialmaschine betrachtet werden [10], wobei dem Laufrad das Fördermedium bereits mit Vordrall zugeführt wird (Bild 3). Durch diesen Vordrall hat das Fördermedium in der Kontrollfläche 1 am Eintritt in das Laufrad eine Umfangskomponente c_{1u}. Das Laufrad erteilt dem Fördermedium einen zusätzlichen Drall, wobei die Umfangskomponente kurz nach Austritt aus dem Laufrad in der Kontrollfläche 2 die Grösse c_{2u} besitzt.
Aus der Differenz der Impulsmomente am Ein- und Austritt des Laufrades folgt mit der Eulerschen Momentengleichung das Drehmoment M zu

$$M = \dot{m}\,(r_2 \cdot c_{2u} - r_1 \cdot c_{1u})$$

Mit der Leistung an der Welle

$$P = M \cdot \omega$$

und $u = r \cdot \omega$ folgt für die Leistung P

$$P = \rho \cdot \dot{V}\,(u_2 \cdot c_{2u} - u_1 \cdot c_{1u}), \qquad (2)$$

wenn der Massenstrom mit $\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$ durch den Volumenstrom $\dot{V}$ ersetzt wird.
Wie aus der Gleichung (2) zu ersehen ist, sind zur Bestimmung der Beschleunigungsleistung, die für die vorliegende Betrachtung als Verlust einzustufen ist, keine Wirkungsgrade oder Erfahrungswerte notwendig, wenn die in der Gleichung benutzten Grössen bekannt sind.
Bei einer drallfreien Zuströmung des Fördermediums mit $\alpha_1 = 90°$ ist die Umfangskomponente der Absolutgeschwindigkeit c_{1u} gleich Null, womit das letzte Glied der Gleichung (2) entfällt.
Weiterhin ist bei radial-endenden Förderkanälen, was bei den engen Förderkanälen elektrischer Maschinen durchaus angenommen werden darf, die Umfangskomponente der Absolutgeschwindigkeit c_{2u} gleich u_2 [10].
Unter diesen Voraussetzungen vereinfacht sich Gleichung (2) auf

$$P = \rho \cdot \dot{V} \cdot u_2^2 \qquad (3)$$

Vorausgesetzt, dass durch eine exakte Kühlstromverteilungsrechnung mit Hilfe des bereits erläuterten Strömungsnetzes die in den Rotor einer elektrischen Maschine ein- und ausströmenden Teilkühlströme bekannt sind, lassen sich je nach Zuströmungsart (drallfrei oder drallbehaftet) nach den Gleichungen (2) oder (3) die Beschleunigungsverluste bestimmen.

3. Leckageverluste

Derjenige Anteil der Ventilationsverluste, der durch Leckagen infolge konstruktiv unvermeidlicher Spalte im Rotor entsteht, wie sie in Bild 4 dargestellt sind, kann ebenfalls mit den Gleichungen (2) oder (3) ermittelt werden. Voraussetzung ist wiederum die vorstehend erwähnte Strömungsnetzberechnung des Maschinenkühlkreises, in der die Lekkagevolumenströme der Bypässe vorab berechnet worden sind.

4. Zirkulationsverluste

Bild 5 zeigt Orte auf, wo am Rotor einer elektrischen Maschine Zirkulationsverluste auftreten, die nicht vernachlässigt werden dürfen. Da es sich hierbei ebenfalls um Förderleistungen handelt, die einzeln nicht in einer Kühlerbilanz erfasst werden können, muss auch dieser Anteil durch entsprechende Berücksichtigung in einer Strömungsnetzberechnung oder durch Einzelbetrachtung erfassbar gemacht werden. Zur Leistungsberechnung werden wiederum die Gleichungen (2) oder (3) benutzt.

5. Rotoroberflächenreibung

Dieser Anteil der Gesamtverluste wird durch die Reibungsverluste an der Rotoroberfläche infolge der Rotation hervorgerufen. Für die Berechnung werden diese Verluste entsprechend ihrem Entstehungsort in Mantelreibungs- und Scheibenreibungsverluste aufgeteilt [9]. Den Mantelreibungsverlusten sind sämtliche Verluste zugeordnet, die im Luftspalt sowie im Bereich der Pollücken anfallen. Die Scheibenreibungsverluste entstehen zwischen den feststehenden Gebäudewänden und den rotierenden Stirnseiten des Rotors. Wie die einschlägige Literatur belegt, sind für elektrische Maschinen besondere empirische Rechenansätze erforderlich, weil die Oberflächengestaltung von Rotor und Stator einen deutlichen Einfluss auf die Grösse dieser Verluste ausübt [6, 7, 8].
Entsprechend dem üblichen Vorgehen in der Strömungsmechanik werden diese Verluste durch Koeffizienten beschrieben. Die Mantelreibungsverluste sind proportional der reibenden Manteloberfläche, der auf diese Oberfläche wirkenden Schubspannung und der Rotorumfangsgeschwindigkeit. Wenn für die Schubspannung, welche proportional der Dichte und der kinetischen Strömungsenergie ist,

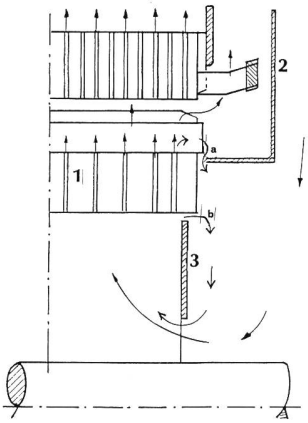

Bild 4. Leckageströme eines selbstlüftenden Wasserkraftgenerators schematisch dargestellt.
a) Spaltleckagen zwischen Rotorjoch (1) und Luftraumtrennblech (2)
b) Spaltleckagen zwischen Rotorjoch (1) und Rotorsternabdeckung (3)
——▶ Soll-Kühlstromrichtung, ——> Leckagestrom

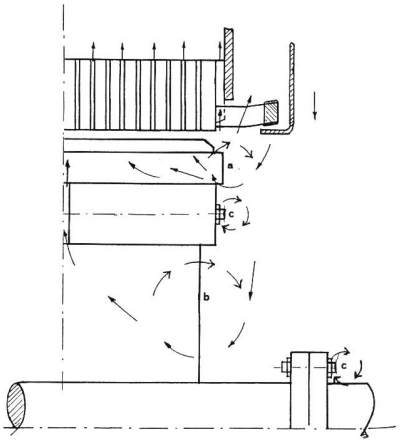

Bild 5. Mögliche Zirkulationsströmungen am Rotor einer elektrischen Maschine.
a) Pollückenendbereich
b) offener Rotorarmstern
c) am Rotor vorstehende Schrauben oder Versteifungsrippen
——▶ Soll-Kühlstromrichtung
——> Zirkulation

$$\tau = k_M \rho u^2$$

gesetzt wird, folgt für die Mantelreibung mit A_M als reibender Mantelfläche der Ausdruck

$$P_M = k_M \rho u^2 A_M u$$

Analoges Vorgehen führt für die Scheibenreibungsverluste auf

$$P_S = k_S \rho D^2 u^3/8,$$

womit sich die gesamten Reibungsverluste berechnen lassen aus:

$$P_{M+S} = \rho D u^3 (k_M \pi l + k_S D/8) \qquad (4)$$

Die Reibkoeffizienten k_M und k_S sind von der Maschinengeometrie und der konstruktiven Gestaltung abhängig. Sie sind von Maschinentyp zu Maschinentyp verschieden.
Zu ihrer Erfassung wird bei ABB wie folgt vorgegangen: Wir bedienen uns eigener Modellmaschinen, bei denen die rotationsabhängigen Gesamtverluste sowie sämtliche Einzelanteile in Form von Lagerverlusten und Förderverlusten zur Kühlstromumwälzung ermittelt worden sind. Damit sind wir im Besitz der reinen Oberflächenreibungsverluste bei Kühlstromumwälzung Null. Diese Oberflächenreibungsverluste können mit Hilfe von Gleichung (4) und unter Beachtung der strömungsmechanischen Ähnlichkeitsgesetze auf andere Maschinenabmessungen umgerechnet werden. Unter Beachtung von [5] und [6] sind auch bei nur kleinen Genauigkeitseinbussen Umrechnungen auf andere Geometrieformen möglich, wenn bei der Bestimmung der Koeffizienten k_M und k_S die Luftspaltweite bzw. der Abstand zu einer festen Wand berücksichtigt wird.
Die Ausführungen bis hierher zeigen: Sollen die Ventilationsverluste niedrig und in engen, garantierten Grenzen gehalten werden, so sind umfangreiche Berechnungen bei Einsatz unterschiedlicher Programme und Formeln sowie gute Kenntnisse über die vielfältigen Strömungen an der elektrischen Maschine notwendig.

Messtechnischer Nachweis der Verluste

Die Ventilationsverluste werden am einfachsten bei einem solchen Betriebszustand nachgewiesen, in dem diese Verluste vorherrschen. Dies ist bei Synchronmaschinen beim Betrieb ohne Erregung gegeben. Die Messung kann bei Wasserkraftgeneratoren in der Anlage nur mit einem kalorimetrischen Verfahren erfolgen.
Die Kalorimetrie erfordert zusätzlich die Erfassung der über die Gehäuseoberfläche durch natürliche Konvektion und Strahlung abgeführten Verlustanteile [13]. Gegebenenfalls sind die durch Wärmeleitung über die Generatorwelle an die Umgebung übertragenen Verluste zusätzlich zu berücksichtigen.
Der minimal erforderliche Einbau von Messstellen in den Kühlerkreislauf für die wasserseitige Kalorimetrie ist in Bild 6 dargestellt [14]. Hinzu kommt die Abtastung der gesamten Maschinengehäuseoberfläche auf ihre Wandtemperatur nach Erreichen des Beharrungszustandes, um die nach aussen abgeführte Wärme zu berücksichtigen.
Grundsätzlich erfolgen Messung und Auswertung je nach Vereinbarung gemäss den internationalen Regeln für elektrische Maschinen [11].

Umrechnung der Messergebnisse auf geänderte Gasdaten

In der Regel legt das Pflichtenheft die Bezugstemperatur fest, auf welche die Ventilationsverluste zu beziehen sind.
Die Messungen können – z. B. aus jahreszeitlichen Gründen – in den seltensten Fällen bei dieser vereinbarten Temperatur erfolgen. Häufig werden sie bei merklich niedrigeren Werten vorgenommen. Folgerichtig werden darum auch die Warm- und Kaltlufttemperaturen festgehalten, um die gemessenen Leerlaufverluste auf die Garantietemperatur umzurechnen, wobei der Barometerstand und die Luftfeuchtigkeit ebenfalls zu berücksichtigen sind. Genormte Vereinbarungen über die Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit wurden im Elektromaschinenbau allerdings bisher nicht getroffen, da diese nur einen kleinen Einfluss auf die Messergebnisse ausübt. In Anlehnung an [15] ist ihre Erfassung aber bei erhöhten Ansprüchen an die Genauigkeit möglich.
Nachfolgend wird die Abhängigkeit der Verluste von den Stoffdaten näher erläutert. Dabei ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen den Verlusten infolge der Beschleunigungs- und Ventilatorantriebsleistung sowie den Verlusten infolge der Oberflächenreibung.
Es werden zunächst die Beschleunigungs- und Ventilatorantriebsleistungen näher betrachtet. Um den Einfluss der

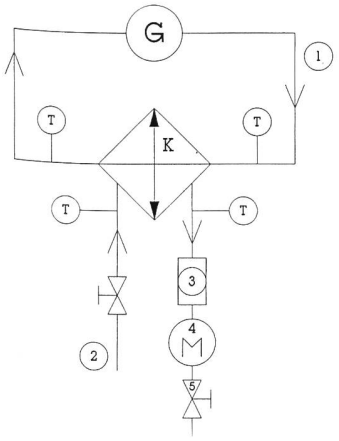

Bild 6. Schematische Darstellung des Messaufbaues im Generatorkühlsystem zur Kalorimetrie.
G Generator, K Kühler, 1 Luftkreis, 2 Wasserkreis, T Temperaturmessstelle, 3 Schauglas, 4 Volumenstrommesser, 5 Absperrarmatur, ⟶ Fliessrichtung.

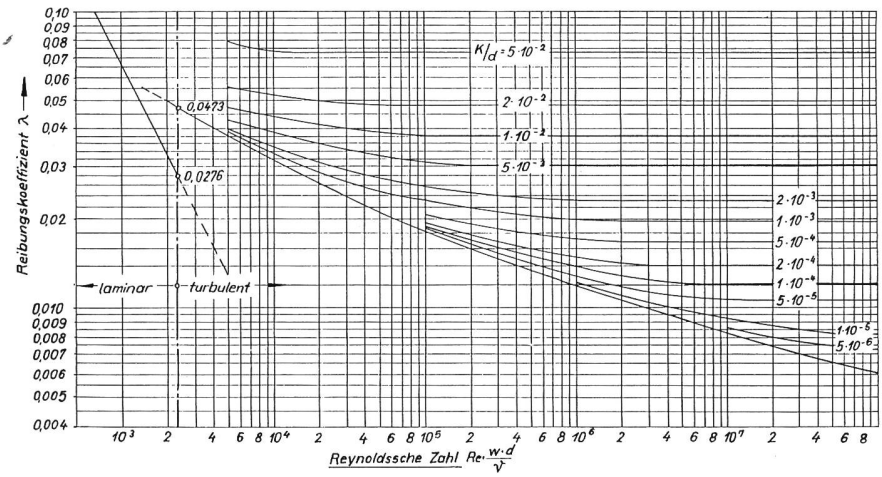

Bild 7. Zum Einfluss der Rauhigkeit auf den Reibungskoeffizienten.

Dichte auf diese Leistungen aufzuzeigen, wird am einfachsten von Kennzahlen ausgegangen, die im Ventilatorenbau üblich sind. Gebräuchlich sind die Durchflusszahl

$$\varphi_D = \frac{\dot{V}}{\pi/4\, D^2\, u}, \qquad (5)$$

die eine dimensionslose Fördermenge darstellt, sowie die Druckziffer

$$\psi = \frac{\Delta p/\rho}{u^2/2}, \qquad (6)$$

welche die Druckerzeugung des Ventilators mit dem Staudruck der Umfangsgeschwindigkeit dimensionslos macht. Die Ventilatorantriebsleistung ist bereits durch Gleichung (1) definiert worden.

$$P = 1/\eta\ \dot{V}\ \Delta p$$

und kann mit Gleichung (5) und (6) auf die Form

$$P = 1/\eta\ \varphi_D \psi\, \pi/8\, \rho\, u^3\, D \qquad (7)$$

gebracht werden. Gleichung (7) zeigt, dass sich die Ventilatorleistung bei gleichem Betriebszustand, d.h. bei konstanten dimensionslosen Kennzahlen sowie bei konstanter Umfangsgeschwindigkeit proportional mit der Dichte ändert. Die Oberflächenreibungsverluste verändern sich in erster Näherung ebenfalls proportional mit der Dichte der Kühlluft, wenn die bereits diskutierte Gleichung (4) zugrunde gelegt wird. Allerdings sind in dieser Gleichung die Reibungskoeffizienten für die Mantelreibung k_M und Scheibenreibung k_S enthalten, die von der Reynolds-Zahl abhängig sind. Die Reynolds-Zahl Re als Kennzahl für die Strömung ist ihrerseits dichteabhängig:

$$\mathrm{Re} = \frac{u\, d\, \rho}{\eta},$$

wodurch die Proportionalität der Verluste von der Dichte entsprechend Gleichung (4) zunächst nicht mehr gewährleistet ist. Jedoch ist die reine Abhängigkeit der Reibungskoeffizienten von der Reynolds-Zahl nicht universell, sondern auch deutlich von der Oberflächenbeschaffenheit des umströmten Körpers abhängig. Wie das in Bild 7 beispielhaft dargestellte Reibungsdiagramm für Rohrströmungen belegt, sind die Kurven, welche die Abhängigkeit der Reibungskoeffizienten von der Reynolds-Zahl beschreiben, nur im Bereich kleiner Reynolds-Zahlen ausschliesslich von diesen abhängig. Bei grösseren Reynolds-Zahlen verlaufen die Kurven horizontal, d.h. die Koeffizienten sind nur noch von der Rauhigkeit abhängig.

Wenn diese Bedingungen auf die elektrische Maschine angewendet werden, stellt sich heraus, dass aufgrund der hohen Oberflächenrauhigkeit durch Pollücken oder mitrotierende Flanschschrauben sowie unter Mitberücksichtigung der typischen Beschaffenheit der Statorbohrung elektrischer Maschinen die relative Rauhigkeit Werte von $k/d = 2 \cdot 10^{-2}$ aufwärts erreicht. Diese hohe Rauhigkeit lässt Reynolds-Zahlen von Re $\approx 4 \cdot 10^4$ zu, oberhalb derer die Reibungskoeffizienten nur noch rauhigkeitsabhängig sind.

Die tatsächlich vorherrschenden Reynolds-Zahlen liegen bei den Abmessungen üblicher elektrischer Maschinen in den seltensten Fällen unter Re = 10^5, so dass keine Reynolds-Abhängigkeit der Koeffizienten und damit eine lineare Abhängigkeit der Oberflächenreibungsverluste von der Dichte vorhanden ist.

Damit ist der Beweis erbracht, dass die gesamten gemessenen Ventilationsverluste linear über die Dichte auf die vertraglich vereinbarte mittlere Kühlmediumtemperatur umgerechnet werden dürfen.

Schlussbemerkung

Das gezeigte Vorgehen macht klar, welcher Aufwand über weitgehende Zeiträume bezüglich Messungen und Weiterentwicklung der Berechnungsmethoden hinsichtlich der Handhabung der Ventilationsverluste rotierender elektrischer Maschinen erforderlich war, um dieses gezielte Vorgehen unseren Kunden heute anbieten zu können.

Die Ventilationsverluste einer elektrischen Maschine können nur annähernd richtig berechnet werden, wenn genügend Rechenmittel zur Verfügung stehen und ausreichend Kenntnisse über die Einflüsse seitens der konstruktiven Gestaltung einschliesslich deren rechnerischer Erfassbarkeit vorliegen.

Es wurde ein gangbarer Weg aufgezeigt, wie der durch Bypässe und Zirkulationen hervorgerufene, nicht zur Kühlung nutzbare Anteil der Ventilationsverluste – in einer Zeit hoher kostenmässiger Bewertung derselben – klein gehalten werden kann. Bei ABB werden bei solchen Begebenheiten nach einer ersten Strömungsnetzberechnung, bei der sich wiederholt verhältnismässig grosse Bypass- oder Zirkulationsverluste herausstellen, mit dem Konstrukteur Wege zu deren Reduzierung oder gar Elimination angegangen.

Literaturverzeichnis

[1] *J. Baer:* Belüftung und Kühlung von Wasserkraftgeneratoren. Möglichkeiten der Modernisierung. «wasser, energie, luft» *81* (1989) 7/8, S. 154–159.

[2] *J. Baer, I. Novosel:* Belüftungstechnische Auslegung rotierender elektrischer Maschinen mittels Digitalrechner. «Bull SEV/VSE» *66* (1975) 6, S. 313–317.

[3] *H. D. Sommer:* Ein Näherungsverfahren zur Berechnung von Ventilatoren mit geraden, redialgestellten Schaufeln». «VDI-Z» *119* (1977) 19, S. 933–936.

[4] *J. Baer:* Axialventilatoren für eigenbelüftete, rotierende elektrische Maschinen. «Konstruktion» *25* (1973), S. 25–28.

[5] *R. Schilling, H. Siegle, B. Stoffel:* Strömung und Verluste in drei wichtigen Elementen radialer Kreiselpumpen. «Literaturstudie der Fachgemeinschaft Pumpen und Verdichter im VDA».

[6] *H. Linnecken:* Der Reibungsverlust, insbesondere bei Turbomaschinen. «AEG-Mitteilungen» *47* (1957) 1/2.

[7] *M. Mack, R. Minder:* Die Luftreibung bei Universal- und Asynchronmaschinen kleiner Baugrösse. «Konstruktion» *23* (1971) 1.

[8] *R. v. Musiol, G. Zwarg:* Neue, indirekte Wasserkühlung für das schnellaufende Schwungrad eines Stossleistungsumformers. «Siemens-Energietechnik» *5* (1983) 1.

[9] *Wiedemann/Kellenberger:* Konstruktion elektrischer Maschinen. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1967.

[10] *W. Traupel:* Die Theorie der Strömung durch die Radialmaschinen. Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1962.

[11] Normen: IEC 34–2 (1972), 34–2A (1974). SEV 3009–2 (1975), 3009–2A (1978); VDE 0530, Teil 2 (1982).

[12] *H. Strupp:* Luftkalorimetrie von Maschinen offener Bauart. «BBC-Mitteilungen» *55* (1968) 11/12, S. 640–649.

[13] *A. Christen:* Die Anwendung der kalorimetrischen Methode zur Bestimmung der Verluste von Grossmaschinen. «Bull SEV» *57* (1966) 15.

[14] *A. Christen:* Die Abnahmeversuche am Phasenschieber von 60/70 Mvar für das Unterwerk Breite der NOK. «Bulletin SEV» *58* (1967) 8.

[15] VDI 2044: Abnahme- und Leistungsversuche an Ventilatoren (VDI-Ventilatorregeln). VDI 2044 (1966).

Adressen der Verfasser: *Jürgen Baer,* Masch.-Ing. (grad.), ABB Kraftwerke AG, Abteilung KWDE 1, Studien elektrische Maschinen, CH-5401 Baden, und *Marius Geller,* Dr.-Ing., ABB Kraftwerke AG, Abteilung KWDE 1, Studien elektrische Maschinen, CH-5401 Baden.