Belüftungstechnische Auslegung rotierender elektrischer Maschinen mittels Digitalrechner

Autor(en): **Baer, J. / Novosel, I.**

Objekttyp: **Article**

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

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

Heft 6

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915268

Nutzungsbedingungen

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

Haftungsausschluss

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

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

http://www.e-periodica.ch

BULLETIN des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
de l'Association Suisse des Electriciens
des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke
de l'Union des Centrales Suisses d'Electricité

Elektrotechnik – Electrotechnique

Belüftungstechnische Auslegung rotierender elektrischer Maschinen mittels Digitalrechner

Von J. Baer und I. Novosel

621.313-13 : 62-71

Die ständig steigenden Ausnutzungsziffern bei dem Entwurf neuer elektrischer Maschinen oder Maschinenreihen stellen immer höhere Anforderungen an die kühltechnische Vorausberechnung. Verbesserte Kühltechnik heisst bessere und genauere belüftungstechnische Vorausplanung, was durch den Einsatz von Digitalrechenmaschinen erreicht wird. Dass es sehr wohl möglich ist, ein ausreichendes Mass an Genauigkeit zwischen Vorausberechnung und Praxis zu erzielen, wird an einem Beispiel dargelegt. Im weiteren werden Entwicklungstendenzen aufgezeigt.

Les indices d'utilisation de plus en plus élevés, adoptés lors de projets de nouvelles machines électriques ou de séries de machines, posent des exigences d'autant plus grandes à la précalculation du refroidissement. Une meilleure technique de refroidissement requiert une planification plus précise de la ventilation, ce qui est atteint en utilisant des calculateurs électroniques numériques. Un exemple montre qu'il est ainsi parfaitement possible d'obtenir un degré de précision suffisant entre la calculation et la pratique. Les auteurs indiquent en outre les tendances actuelles de développement dans ce domaine.

1. Einführung

Die relativ grosse Anzahl von Möglichkeiten der Kühlmittelführung in elektrischen Maschinen [1; 2] stellt bei den immer grösser werdenden Leistungen wachsende Anforderungen an die belüftungstechnische (kühltechnische) Auslegung. Deshalb wurden Computerprogramme entwickelt, die es ermöglichen, den Rechenumfang zu erweitern sowie die Genauigkeit der Rechnung zu erhöhen.

2. Rechenprogramme

Die belüftungstechnische Berechnung elektrischer Maschinen stellt zwei Anforderungen an ein Rechenprogramm:

a) Ermittlung des Druckabfalles im gesamten Kühlkreis;
b) Auslegung des erforderlichen Druckerzeugers.

Diese beiden den Berechner sowie den Konstrukteur interessierenden Ergebnisse in einem Programm rechnerisch zu behandeln, wäre günstig. Da die Kühlstromumwälzung jedoch je nach Bedarf mit Axial- oder Radialventilatoren erfolgen kann [3; 4] und diese darüberhinaus noch mit Leitapparaten versehen sein können, würde ein solches Programm sehr umfangreich ausfallen. Es ist daher sinnvoll, die Druckverlustberechnung sowie die Auslegung des Druckerzeugers in getrennten Programmen vorzunehmen.

Das Ausarbeiten eines allgemeingehaltenen Programmes für das Berechnen des Druckabfalles in rotierenden elektrischen Maschinen kann nur dann als wirtschaftlich gelöst betrachtet werden, wenn damit alle im Elektromaschinenbau vorkommenden Belüftungsarten erfasst werden können. Diese Bedingung wird erfüllt, wenn man sich eines Netzwerkes bedient [5]. Grundsätzlich müssen in einem solchen Strömungs-Netzprogramm alle von der Praxis her möglichen Druckverbraucher [6...9] in beliebiger Reihenfolge und Anzahl aneinandergereiht werden können.

Es muss auch die Möglichkeit bestehen, Widerstandsbeiwerte in Form einer Funktion vorzugeben, wie man es beispielsweise für rotierende Maschinenteile benötigt [10...12].

Eine weitere Aufgabe besteht in der Eingliederung von Verzweigungsströmungen [13; 14]. Dies hat insofern eine wesentliche Bedeutung, als Sammler- und Verteilerströmungen in fast jedem Kühlkreis einer Elektromaschine vorkommen.

Zur rechnerischen Behandlung einzelner Strömungselemente innerhalb eines Netzprogramms ist es nötig, entweder an der Maschine selbst oder an Modellen Messungen vorzunehmen, die allenfalls fehlende Informationen liefern. Dies ist zum Beispiel für das strömungstechnisch schwer zu erfassende Gebilde des Statorwickelkopfes (Fig. 1) der Fall [6; 15]. Sonderfälle dieser Art sind im Kühlkreis elektrischer Maschinen wiederholt anzutreffen.

Den Druckerzeugern (Ventilatoren oder Verdichtern) ist in gleicher Weise grösste Aufmerksamkeit zu schenken. Erfolgt die Auslegung derselben ohne jede Einschränkung nach den bis heute vorhandenen Erkenntnissen, so unterliegen sie Einflüssen auf Grund der vorgegebenen Einbaubedingungen in elektrischen Maschinen, welche die Wirkungsweise der

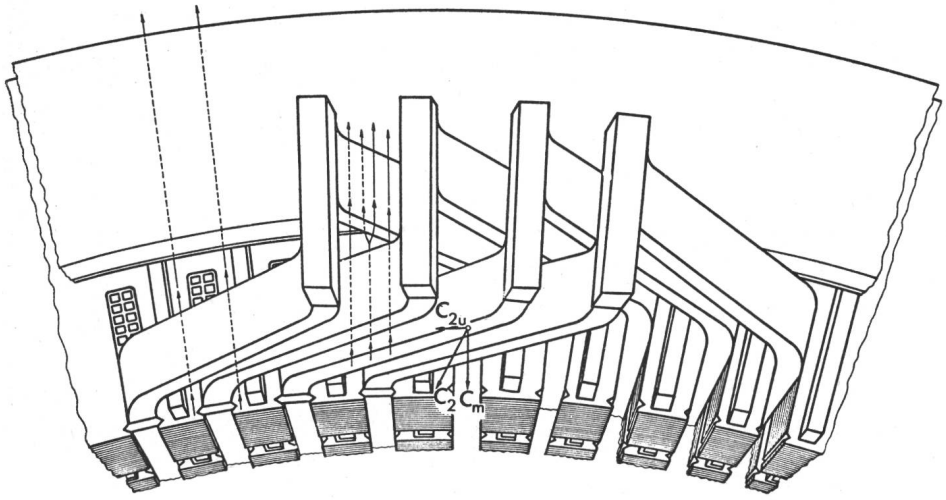


Fig. 1
Schematische Darstellung der Kühlmittelbewegungen, demonstriert an einem Statorwickelkopfausschnitt einer elektrischen Maschine
Geschwindigkeitsvektoren entsprechen den Anströmverhältnissen und Strömungspfeile entsprechen den Durchströmverhältnissen

Ventilatoren stark beeinflussen. Diese Unterschiede können dazu führen, dass die Ventilatoren nicht im gewünschten Arbeitspunkt arbeiten, der Kühlstrom für die Maschine nicht erreicht wird und damit die Wicklungen zu warm werden. Auch hier sind spezielle Versuche angezeigt [16; 17].

Man sieht, dass eine mit genügender Genauigkeit durchgeführte Belüftungsrechnung ohne ausreichendes, aus Modellversuchen erhaltenes Zahlenmaterial nicht denkbar ist [18].

3. Auslegungsbeispiel

Die Vorgangsweise bei der Berechnung einer elektrischen Maschine sei im folgenden an der auf Fig. 2 dargestellten Maschine erläutert.

Es handelt sich um einen Asynchronmotor mittlerer Leistung, dessen Kühlstromumwälzung durch zwei an den Stirnseiten des Rotors angeordneten Axialventilatoren erfolgt. Der erste Schritt für die Anwendung des Strömungs-Netzprogrammes besteht darin, dass für den Motor ein Ersatzschaltbild in Form eines Netzes aufgestellt wird (Fig. 3). Das Netz besteht in diesem Fall aus 79 Elementen und 66 Knoten. In einem zweiten Schritt werden alle erforderlichen Eingabegrössen zusammengestellt. Es handelt sich dabei um die systematische Erfassung von Strömungsquerschnitten, Stoffwerten, Widerstandsbeiwerten, Durchmessern und Drehzahlen sowie von Wertepaaren für die funktionsabhängigen Elemente.

Tabelle I zeigt, welche Eingabedaten für das Programm erforderlich sind und welche Werte auf dem Ausgabeformular für jedes Element erscheinen.

Das Ergebnis der Rechnung liefert auch den Arbeitspunkt für den Druckerzeuger. Bei den Druckerzeugern handelt es sich, wie bereits erwähnt, um Axialventilatoren, die im Netzwerk (Fig. 3) durch das Element Nr. 68 fixiert wurden. Für diesen rechnerisch ermittelten Betriebspunkt wird der Axialventilator in einem weiteren Programm berechnet.

Tabelle II zeigt das Ausgabeformular des Axialventilatorberechnungsprogramms, auf dem die Ein- und Ausgabewerte enthalten sind.

Die Vorausberechnung der Maschine ist mithin abgeschlossen.

4. Versuche und deren Ergebnisse zur Überprüfung der vorausgegangenen Berechnung

Zur Durchführung der Versuche war es erforderlich, eine Meßstrecke, wie sie schematisch auf Fig. 4 dargestellt ist, an der Maschine luftaustrittsseitig anzuschliessen.

Der gewählte Aufbau der Meßstrecke ergibt sich zwangsläufig aus der Erfüllung nachstehender Aufgaben:

- Messung des durchgesetzten Volumenstromes mittels der Normdüse.
- Kompensation der durch die Meßstrecke verursachten Strömungsverluste.
- Befahren der Maschinenkennlinie durch Zusammenwirken von Drossel und Hilfsventilator.

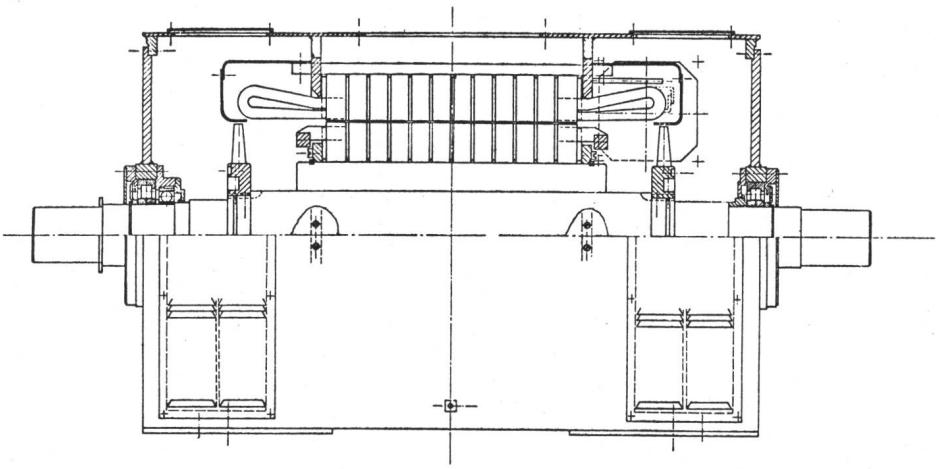


Fig. 2
Schnittbild eines Asynchronmotors mit an den Rotorstirnseiten angeordneten Axialventilatoren
3100 kV, cos φ = 0,88, n = 1196 U./min

Veranschaulichung der notwendigen Eingabegrössen sowie der in der Ausgabe erscheinenden Angaben des Strömungs-Netzprogramms **Tabelle I**

DIE STEUERDATEN

ELEMENTE	KNOTEN	FUNKTIONEN	KENNZAHL	MAX.FEHLER	ANZAHL ITER.	ANFANGSWERTE
79.	66.	9.	0.	0.00050	0.	0.

DIE DATEN ZUR BESCHREIBUNG DER ELEMENTE

KENNWORT	BEZEICHNUNG	KNOTEN	DICHTE (KG/M3)	QUERSCHNITT (M2)	L BZW. D (M)	DURCHMESSER (M)	KS BZW. DV (M)	ZETA,N,ETA (KG/SM,1/MIN,MILL.)	KENNZ.

DIE WERTEPAARE DER FUNKTIONEN

FUNKTION	WERTEPAARE	ABSZISSEN UND ORDINATEN

DIE RESULTATE DER BERECHNUNG

KENNWORT	ELEMENTE	WIDERSTANDSZAHL DRUCKZAHL	REYNOLDSZAHL	ROHRREIBUNGSZAHL DURCHFLUSSZAHL	GESCHWINDIGK. (M/S)	DRUCKDIF. (N/M2)	VOLUMENSTROM (M3/S)

Die ersten Versuche bestanden in der Aufnahme der ventilationstechnischen Kennlinien bei Nenndrehzahl des Motors, um die sekundlich umgewälzte Kühlluftmenge zu bestimmen. Fig. 5 zeigt das Ergebnis dieser Messungen. Der Schnittpunkt zwischen der Ventilator- und der Widerstandskennlinie stellt den gemessenen Betriebspunkt (BP) des Kühlkreises dar. Zur Kontrolle wurde noch die Maschinenkennlinie aufgenommen, deren Schnittpunkt mit der Abszisse ebenfalls dem Kühlstrom bei Nenndrehzahl entspricht.

In einem zweiten Messvorgang wurde die Verteilung des Kühlgases innerhalb des Motors festgestellt. Zu diesem Zweck wurde eine andere, hier nicht dargestellte kleinere Meßstrecke auf dem Statorrücken in der Form angeordnet, dass sie jeweils ein in sich geschlossenes Segment eines Statorkühlkanals erfasst. Durch Verschieben dieser Messstrecke konnte der Kühlstrom jedes Statorkühlkanals bei Nenndrehzahl des Motors ermittelt werden. Das Ergebnis dieser Messungen wurde im Verhältnis zum Gesamtkühlstrom in Fig. 6 festgehalten. Zum Vergleich sind hier auch die rechnerisch ermittelten Kühlströme eingetragen.

Es liegt nahe, dass eine Übereinstimmung zwischen dem rechnerisch ermittelten Arbeitspunkt für den Kühlkreisventilator einer elektrischen Maschine und den erhaltenen Messergebnissen nur in seltenen Fällen vollkommen sein kann. Die Abweichung zwischen Auslegung und Messergebnis muss jedoch in gewissen Grenzen bleiben, um das Produkt nicht zu gefährden; darüber hinaus sollte sie verständlich und erklärbar sein. Im allgemeinen kann mit dem zurzeit bekannten Erfahrungsmaterial eine Differenz zwischen Messung und Rechnung von etwa ± 5 % als sehr gut bezeichnet werden.

5. Bemerkungen zu den Ergebnissen

Die in Fig. 5 eingetragenen Kennlinien sind im Prüffeld aufgenommen worden. Bei diesen Versuchsläufen wurde ohne Kühler gemessen (Durchzugs- statt Kreislaufbelüftung), so dass der Sollkühlstrom entsprechend grösser ist als auf dem Berechnungsblatt (Tabelle II). Der Ist-Kühlstrom liegt laut Diagramm nochmals um rund 6 % höher. Dies ist durch die Fertigungsvorschriften für Axialventilatoren begründet.

Damit der Kühlstrom einer elektrischen Maschine, hervorgerufen durch die Druckerzeuger, nicht zu klein ausfällt, werden die Toleranzen für die Staffelungswinkel nur mit einem Plusmass vorgegeben. Auch wirken sich in die Rechnung sicherheitshalber eingeführte erhöhte Widerstandsbeiwerte bei schwer zu definierenden Druckverbrauchern im selben Sinne aus. Die plötzlichen Unterbrechungen der auf Fig. 5 dargestellten Kennlinien sind begründet; denn Ventilatoren, die strömungstechnisch hoch belastet werden (starke Verzögerung der Relativgeschwindigkeit im Schaufelkanal),

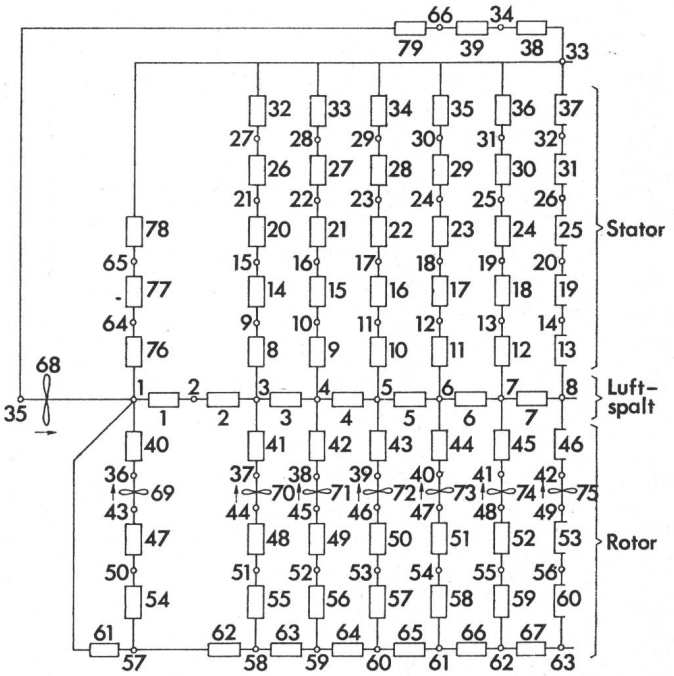
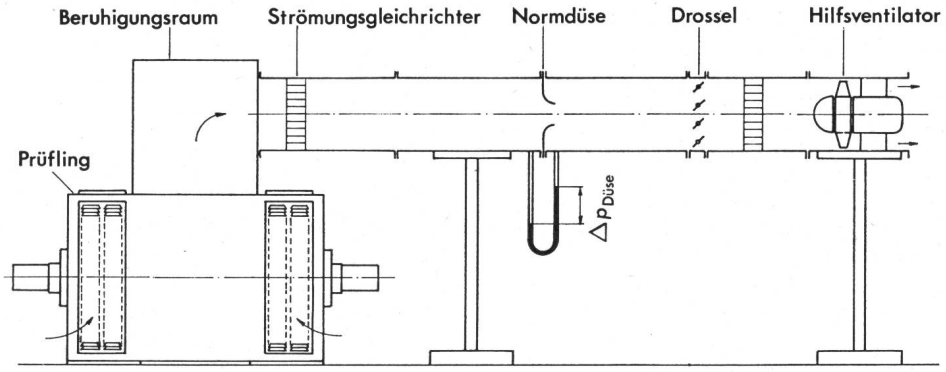


Fig. 3 Strömungsnetz des in Fig. 2 gezeigten Motors
bestehend aus 79 Elementen und 66 Knoten

Fig. 4
Schematische Darstellung des Prüffeldaufbaues der Maschine zum Zweck der Ventilationsmessungen
$\Delta p_{Düse}$ Statischer Druckabfall an der Normdüse



weisen Abreissbereiche auf, wie man sie bei den Ventilatoren der behandelten Maschine vorfindet. Angaben über die zulässige Belastbarkeit von Axialventilatoren finden sich in der Literatur [19].

Dass sich das Rechenergebnis für den Teilvolumenstrom durch die aussenliegenden Statorkühlkanäle im Verhältnis zu den übrigen Statorkühlkanälen stärker von den Messergebnissen unterscheidet, ist in der Tatsache zu suchen, dass diesen Kanälen die Wickelköpfe vorgelagert sind. Der Wickelkopf wird sowohl durch- als auch umströmt. Es ist somit sehr schwierig, für dieses Gebilde den richtigen Widerstandsbeiwert zu finden, zumal derselbe noch von der Umfangskomponente des aus dem Axialventilator austretenden Gases abhängt (Fig. 1). Die Schwierigkeiten, die bei dem Erfassen eines Druckverbrauchers dieser Art entstehen, zeigen die in [15] mitgeteilten Untersuchungen.

6. Folgerungen

Arbeiten mit dem Strömungsnetz haben gezeigt, dass die Abweichungen zwischen den Ergebnissen der Berechnung und der Messung wesentlich reduziert werden konnten. Der wiederholte Einsatz eines solchen Programmes wird das Er-

Ein- bzw. Ausgabewerte des Axialventilatorprogramms — Tabelle II

```
AXIALVENTILATOR-BERECHNUNG  PROGRAMM
-------------------------------------------

KENNWORT                                  BEARBEITER
TYPE                                      ABT./TEL.
WBZ-NR.                                   DATUM

BEMERKUNGEN

DREHZAHL                =    1196.00 U/MIN   BLECH-PROFILFLUEGEL
KUEHLSTROM/VENTILATOR=        1.50 M3/S
FOERDERMEDIUM          LUFT                   PROFILLAENGE  LA     =    80.00 MM
ERFORDERL. STATISCHER                              ,,        LI     =    80.00 MM
FOERDERDRUCK            =     414.00 N/M2
GASDRUCK                =  100000.   N/M2    VENTILATOR-   DA     =   798.00 MM
GASDICHTE               =       1.092 KG/M3  DURCHMESSER   DI     =   598.00 MM
KINEMAT. ZAEHIGKEIT     =  17.52E-06 M2/S                 DM     =   698.00 MM

-------------------------------------------------------------------------------

VERZOEGERUNGSVERHAELTNIS LIEGT UNTER 0.6
DER VENTILATOR KOENNTE IM ABGERISSENEN BEREICH ARBEITEN, BEDINGT AUSFUEHRBAR
ZUR INFORMATION WURDE DIE RECHNUNG FORTGESETZT

-------------------------------------------------------------------------------

KONSTRUKTIONSANGABEN

SCHAUFELZAHL            =    26.        SCHAUFELHOEHE      HS     =   100.00 MM
STAFFELUNGSWINKEL       =    24.0 GRD   ABSTAND            M      =   150.00 MM
SCHAUFELVERWINDUNG      =    10.0 GRD     ,,               N      =   150.00 MM
                                        KRUEMMUNGSRADIUS   RM     =   205.   MM


CHARAKTERISTISCHE GROESSEN

REAKTIONSGRAD           =  0.8352       AUFTRIEBSBEIWERT   CAAU   =   0.710
LIEFERZIFFER            =  0.1643             ,,           CAIU   =   1.050
EINLAUFZIFFER           =  0.2724       ANSTELLWINKEL      ALFAA* =    3.11 GRD
DRUCKZIFFER      PSII   =  0.6474             ,,           ALFAI* =    7.78 GRD
    ,,           PSIM   =  0.4752
SPEZ. DREHZAHL          =   82.56 SOLLWERT GE 55.
TEILUNGS-        TA/LA  =    1.21
VERHAELTNIS      TI/LI  =    0.90
DURCHBIEGUNGS-   FA/LA  = 0.04986
VERHAELTNIS      FI/LI  = 0.04986


WIRKUNGSGRADKONTROLLE                   KONTROLLE AUF ABREISSVERHALTEN

MITTELWERT RE X PHI     =  27802.       W2A/W1A                =   0.747
    ,,     ETA STUFE    =   0.697       W2I/W1I                =   0.565
           CM/C3UI      =   0.472
                                        SU LIEGT AUSSERHALB GRENZKURVE
                                        KEINE TRAEGHEITSABLOESUNG
```

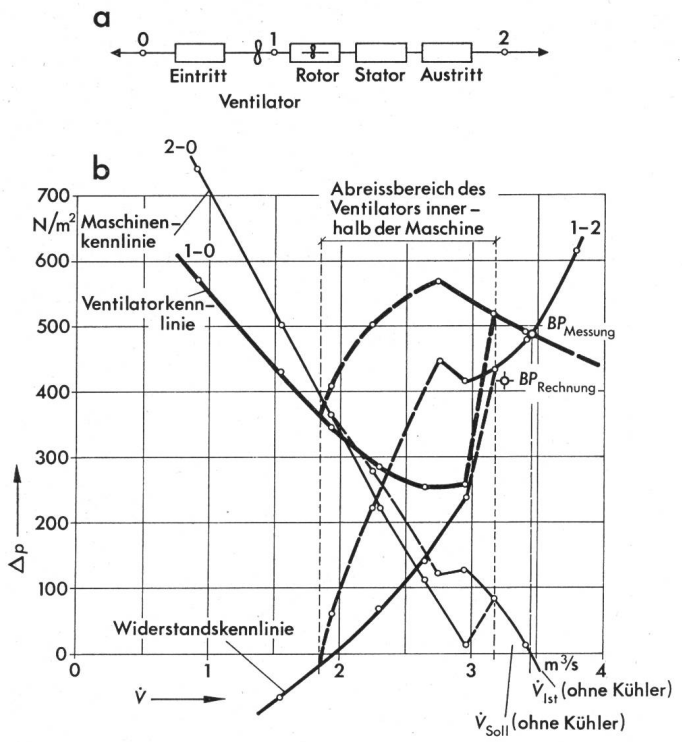


Fig. 5 Kennlinien zur Bestimmung des Maschinenkühlstromes

a schematische Darstellung der Meßstellen

b auf dem Prüfstand aufgenommene Ventilationskennlinien (ϱ = 1,15 kg/m³)

Δp statische Druckdifferenz

$\dot{V}$ Volumenstrom

BP Betriebspunkt

fahrungsmaterial für den Berechner vervollständigen und die Genauigkeit der Ergebnisse weiterhin verbessern helfen. Ein Strömungs-Netzprogramm liefert bei entsprechendem Aufbau für jedes vorgegebene Element die Geschwindigkeit des Kühlmediums. Mit diesen Werten wird ein Wärmequellen-

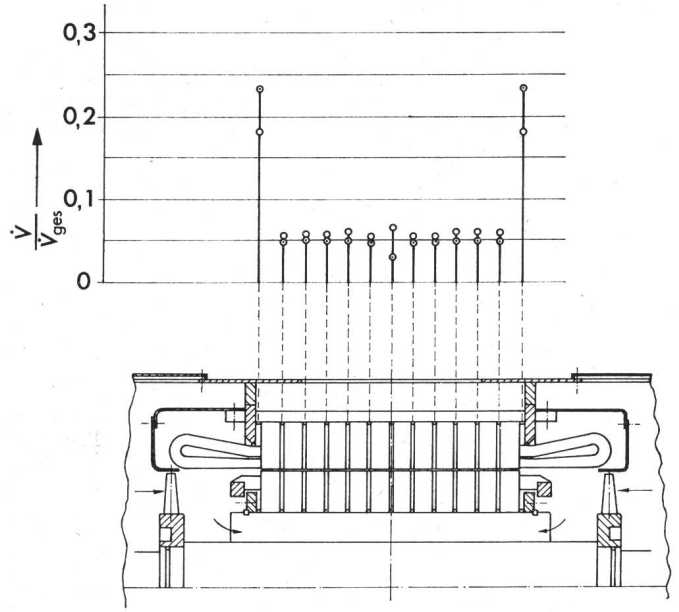


Fig. 6 Volumenstromverteilung am Austritt aus dem Stator

o Messung

⊙ Rechnung

Netz beschickt, und die Erwärmungsberechnung einer elektrischen Maschine erfolgt unter Berücksichtigung der tatsächlichen Kühlmittelströmung.

Die getrennte rechnerische Behandlung der Strömung sowie der Erwärmung einer elektrischen Maschine in zwei aufeinander abgestimmten Netzwerken gestattet eine bedeutend bessere Übersicht und trägt zum schnelleren Erhalt von Teiloptimierungen bei. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, obwohl wiederholt versucht worden ist, die beiden Probleme in einem Netzwerk zu vereinigen [20...23]. Will man jedoch zu Netzwerken mit einer ausreichend grossen Anzahl von Elementen und Knoten gelangen, so wie es für die Berechnung elektrischer Maschinen notwendig ist, trägt der beschriebene Weg wesentlich zur Vereinfachung bei.

Mit diesem Beitrag wurde ein Weg aufgezeigt, der es ermöglicht, auch im Elektromaschinenbau die vollständige Lösung von Wärmequellen-Netzen mit Berücksichtigung aller Teilkühlströme auf eine verhältnismässig leichte und übersichtliche Art zu erreichen.

Literatur

[1] *E. Wiedemann* und *W. Kellenberger:* Konstruktion elektrischer Maschinen. Berlin/Heidelberg/New York, Springer Verlag, 1967.

[2] *I. Kovacevic* und *A. Streck:* Käfigläufermotoren im Leistungsbereich von 400 bis 10 000 kW. Brown Boveri Mitt. 59(1972)12, S. 557...566.

[3] *B. Eckert* und *E. Schnell:* Axial- und Radial-Kompressoren. Anwendung, Theorie und Berechnung. 2. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer Verlag, 1961.

[4] *B. Eck:* Ventilatoren. Entwurf und Betrieb der Radial-, Axial- und Querstromventilatoren. 4. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer Verlag, 1962.

[5] *G. Macioschek:* Belüftungsrechnungen an elektrischen Maschinen mit elektronischem Digitalrechner. Elektrie 23(1969)3, S. 113...115.

[6] *H. Bendziula:* Vorausberechnung des Kühlkreislaufes elektrischer Maschinen. ETZ-A 87(1966)13, S. 442...447.

[7] *B. Eck:* Technische Strömungslehre. 7. Auflage. Berlin/Heidelberg/New York, Springer Verlag, 1966.

[8] *H. Richter:* Rohrhydraulik. Ein Handbuch zur praktischen Strömungsberechnung. 5. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer Verlag, 1962.

[9] *I. E. Idel'chik:* Handbook of hydraulic restistance: coefficients of local resistance and friction. Springfield, Va., U. S. Department of Commerce Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, 1966.

[10] *Y. Yamada:* Resistance of a flow through an annulus with an inner rotating cylinder. Bulletin JSME (Japan Society of Mechanical Engineers) 5(1962)18, S. 302...310.

[11] *B. Münch* et *H. Zardin:* Etude analytique et expérimentale des problèmes posés par le refroidissement des machines électriques tournantes. Rapport Cigré N° 115, 1964.

[12] *W. Liebe:* Kühlung von Grossmaschinen. ETZ-A 87(1966)13, S. 434 ...442.

[13] *H. Winter:* Beitrag zum hydraulischen Verzweigungsproblem. Teil I und II. Österreichisches Ingenieur Archiv 9(1955)2/3, S. 239...249 + Vol. 10(1956)4, S. 317...328.

[14] *J. Hak:* Kanal mit Abzweigungen; ein Beitrag zum Ventilationsproblem des Turbogenerators. E und M 73(1956)15/16, S. 373...379 + Nr. 17, S. 418...420.

[15] *H. Winter:* Modellversuche über die Belüftung eines Grossgenerators. Elin Z. 2(1950)3, S. 85...91.

[16] *J. Baer:* Axialventilatore für eigenbelüftete rotierende elektrische Maschinen. Konstruktion 25(1973)1, S. 25...28.

[17] *J. Hak:* Zur Berechnung der Lüfter elektrischer Maschinen. ETZ-A 80(1959)9, S. 264...268.

[18] *M. Schwarz:* Ein neues Laboratorium für strömungs- und wärmetechnische Untersuchungen an Elektromaschinen. Brown Boveri Mitt. 55(1968)10/11, S. 631...639.

[19] *H. Marcinowski:* Optimalprobleme bei Axialventilatoren. Heizung, Lüftung, Haustechnik 8(1957)11, S. 273...285 + 295...296.

[20] *F. Maier:* Berechnung des Erwärmungsverlaufs elektrischer Maschinen mittels Digitalrechner. Teil I, II und III. Mathematik, Technik und Wirtschaft 9(1962)4, S. 166...170, 10(1963)1, S. 22...28 + 10(1963)2, S. 71...81.

[21] *J. Hak:* Lösung eines Wärmequellen-Netzes mit Berücksichtigung der Kühlströme. Arch. Elektrotechn. 42(1955)3, S. 137...154.

[22] *W. Liebe* und *A. Schwab:* Verfahren zur Erwärmungsberechnung auf der Grundlage erweiterter Wärmequellen-Netze. Siemens-Schriftenreihe data praxis -(1971)076, S. 1...28.

[23] *R. Liebe:* A linearization to analyze the coolant flow through electrical machines. Paper of the IEEE Power Engineering Soyiety at the IEEE PES Winter Meeting 1973, C 73 230-0.

Adresse der Autoren:

J. Baer und *I. Novosel,* Fachassistenten für Kühlung elektrischer Maschinen, BBC – AG Brown, Boveri & Cie., Baden.