

# ANALYSE DES VERFAHRENS DER ZWEI ERWÄRMUNGSMESSUNGEN AN SYNCHRONMASCHINEN

Von

Gy. ISTVÁNFY

Lehrstuhl für Elektrische Maschinen, Technische Universität Budapest

(Eingegangen am 3. Juli 1962)

Vorgelegt von Prof. Dr. O. BENEDIKT

Die Methode der zwei Erwärmungsmessungen ermittelt die betriebsmäßigen Erwärmungen aus den Ergebnissen je einer Erwärmungsmessung im Leerlauf und im kurzgeschlossenen Zustand der Maschine. Zwei Messungen scheinen jedoch nicht zu genügen, da doch die Verluste der Maschine auf mindestens vier Teile aufgeteilt werden müssen und da man zur Ermittlung der Temperaturerhöhungskoeffizienten mindestens vier unabhängige Gleichungen benötigt. Die Methode der vier Erwärmungsmessungen verfährt denn auch auf diese Weise [1]. Die Erfahrung zeigt jedoch, daß die hier zu beschreibende Methode sehr gute, ja weit bessere Ergebnisse liefert als das Verfahren der viermaligen Erwärmungsmessung. Da sie in der Elektrizitätsfabrik Ganz entwickelt wurde, kann sie auch als Ganz-Verfahren bezeichnet werden.

Die vorliegende Arbeit setzt sich zum Ziel, die Unterschiede zwischen den beiden Verfahren klarzulegen und die den Ergebnissen anhaftenden Fehler bzw. Unsicherheiten zu bestimmen. Die vorzunehmende Analyse wird die Erfahrungen der Praxis auch theoretisch bestätigen; bei gleicher Meßgenauigkeit liegen die Fehler des Verfahrens der zwei Erwärmungsmessungen um nahezu eine ganze Größenordnung niedriger als die der Methode der vier Erwärmungsmessungen.

Der Beschreibung des Verfahrens im ersten Teil der Arbeit folgt im zweiten Teil die Beantwortung der Frage, mit welchen Abweichungen man bei diesem Verfahren im Vergleich zur fehlerlosen Ermittlung nach der Methode der vier Erwärmungsmessungen zu rechnen hat. Dieser zweite Teil erbringt auch den Beweis dafür, daß es im Prinzip auch Meßbedingungen gibt, unter denen sich die Endergebnisse der fehlerlosen zweimaligen Erwärmungsmessung von denen der fehlerlosen viermaligen Erwärmungsmessung in nichts unterscheiden. Diese idealen Bedingungen können in der Praxis wohl nicht verwirklicht werden, doch zeigen sie, was man anzustreben hat, um diese Fehler möglichst gering zu halten. Weit wichtiger als diese sind jedoch die weit größeren, sogenannten »ererbten Fehler«, die sich aus der Unsicherheit der Temperatur- und Leistungsmessungen ergeben. Der dritte Teil der Arbeit handelt von diesen Fehlern.

## 1. Beschreibung des Verfahrens der zwei Erwärmungsmessungen

Dieses Verfahren (Ganz-Verfahren) bestimmt die betriebsmäßige Überhitzung der Erreger- und der Ankerwicklung anhand je dreier Temperaturerhöhungskoeffizienten. Scheinbar läßt es mithin die erwärmende Wirkung des Eisenverlustes auf die Erregerwicklung und den unmittelbaren erwärmenden Einfluß der Erregerwicklung auf die Ankerwicklung unberücksichtigt. Die betriebsmäßige Übererhitzung der Erregerwicklung errechnet sich nach diesem Verfahren zu

$$\vartheta'_E = c'_1 P_l + c'_2 P_A + c'_4 P_E, \quad (1)$$

die der Ankerwicklung hingegen zu

$$\vartheta'_A = c'_1 P_l + c'_6 P_A + c'_7 P_F, \quad (2)$$

worin  $P_l$  die Ventilationsverluste,  $P_A$  den in der Ankerwicklung,  $P_E$  den in der Erregerwicklung entstehenden Verlust und  $P_F$  den Eisenverlust im Betriebszustand bezeichnen. Die aus den Ventilationsverlusten stammende Erwärmung der Erreger- und der Ankerwicklung wird mit ein und demselben Temperaturerhöhungskoeffizienten  $c'_1$  in Rechnung gestellt, der seinerseits so ermittelt wird, als wäre sowohl die Erreger- als auch die Ankerwicklung nahe an der Austrittsöffnung gelegen und als würden sie beide durch den gesamten Ventilationsverlust erwärmt. Für die Überhitzung der ausströmenden Kühlluft bei der Leerlauf-Erwärmungsmessung ( $\vartheta_{1L}$ ) bzw. bei der Kurzschlußmessung ( $\vartheta_{1K}$ ) hat man

$$c'_{1L} = \frac{\vartheta_{1L}}{P_l + P_{FL} + P_{EL}}; \quad c'_{1K} = \frac{\vartheta_{1K}}{P_l + P_{AK} + P_{EK}} \quad (3)$$

und für den Mittelwert der beiden

$$c'_1 = \frac{c'_{1L} + c'_{1K}}{2}. \quad (4)$$

Mißt man die Menge des Kühlmittels, so hat man auch eine Möglichkeit zur Kontrolle von  $c_1$  [4 (p. 289)].

Bei Ermittlung der weiteren Temperaturerhöhungskoeffizienten läßt sich die Überhitzung der Erregerwicklung beim Erwärmungsmessen im Leerlauf und im Kurzschlußzustand zu

$$\vartheta_{EL} = c'_1 P_l + c'_4 P_{EL} \quad (5)$$

bzw. zu

$$\vartheta_{EK} = c'_1 P_l + c'_2 P_{AK} + c'_4 P_{EK}. \quad (6)$$

Aus Gleichung (5) wird

$$c'_4 = \frac{\vartheta_{EL} - c'_1 P_l}{P_{EL}}, \quad (7)$$

aus (6) hingegen

$$c'_2 = \frac{\vartheta_{EK} - c'_1 P_l - c'_4 P_{EK}}{P_{AK}}, \quad (8)$$

statt  $c'_1$  und  $c'_4$  sind die anhand der Gleichungen (4) und (7) errechneten Werte einzusetzen.

Die Temperaturerhöhungskoeffizienten für die Ankerwicklung können aus der beim Leerlauf-Erwärmungsmessen ermittelten Überhitzung  $\vartheta_{AL}$  sowie aus der Überhitzung  $\vartheta_{AK}$  berechnet werden, wie man sie bei der Erwärmungsmessung im Kurzschlußzustand ermittelt. Die unmittelbare erwärmende Wirkung der Erregerwicklung wird hierbei scheinbar vernachlässigt.

Im Leerlauf hat man

$$\vartheta_{AL} = c'_1 P_l + c'_7 P_{FL} \quad (9)$$

und hieraus

$$c'_7 = \frac{\vartheta_{AL} - c'_1 P_l}{P_{FL}} \quad (10)$$

im Kurzschlußzustand hingegen

$$\vartheta_{AK} = c'_1 P_l + c'_6 P_{AK} \quad (11)$$

woraus

$$c'_6 = \frac{\vartheta_{AK} - c'_1 P_l}{P_{AK}}. \quad (12)$$

Damit sind die Temperaturerhöhungskoeffizienten der zwei Erwärmungsmessungen ermittelt. In den Indizes figurieren dieselben Bezeichnungen wie beim Verfahren der vier Erwärmungsmessungen [1], dagegen besteht ein Unterschied zwischen den Temperaturerhöhungskoeffizienten  $c'_1 \dots c'_7$  und den Temperaturerhöhungskoeffizienten  $c_1 \dots c_7$  des Verfahrens mit vier Erwärmungsmessungen. Letztere zeigen grundsätzlich an, inwieweit die einzelnen Verluste die Erreger- und die Ankerwicklung erwärmen. Die Beiwerte  $c'_1 \dots c'_7$  nennen wir gleichfalls Temperaturerhöhungskoeffizienten, doch bringen sie nicht bloß die erwärmende Wirkung der neben ihnen stehenden Verluste zum Ausdruck, sondern enthalten verhüllt auch die erwärmende Wirkung der scheinbar vernachlässigten Verlustgruppen. Dies soll im folgenden Punkt näher geprüft werden.

## 2. Die prinzipiellen Fehler des Verfahrens der zwei Erwärmungsmessungen

### 2.1. Bestimmung der idealen Meßbedingungen

Die Ansicht, das Ganz-Verfahren vernachlässige zur Gänze die erwärmende Wirkung des Eisenverlustes auf die Erregerwicklung und die erwärmende Wirkung der in der Erregerwicklung entstehenden Verluste auf die Ankerwicklung, ist irrig. Die einzelnen Temperaturerhöhungskoeffizienten des Ganz-Verfahrens schließen die erwärmenden Wirkungen der scheinbar vernachlässigten Verluste in sich ein. Messungen nach dem Ganz-Verfahren lassen sich — wie hier bewiesen werden soll —, grundsätzlich auch unter Meßbedingungen durchführen, die für die Überhitzungen im Betrieb dieselben Ergebnisse liefern wie die vier Erwärmungsmessungen. Ein solcher Vergleich ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn man bei beiden Methoden fehlerlose Messungen voraussetzt.

Vorerst sollen die Verhältnisse der *Erregerwicklung* geprüft werden. Beim Messen im Leerlauf erhält man für die Erregerwicklung gleiche Ergebnisse gleichviel, ob man nach der Methode der zwei oder der vier Messungen weiterrechnet. Es gilt also

$$\vartheta_{EL} = c'_1 P_l + c'_4 P_{EL} \quad (13)$$

$$\vartheta_{EL} = c_1 P_l + c_3 P_{FL} + c_4 P_{EL} \quad (14)$$

und aus den beiden Gleichungen

$$c'_4 = \frac{c_1 P_l - c'_1 P_l}{P_{EL}} + c_3 \frac{P_{FL}}{P_{EL}} + c_4. \quad (15)$$

Ebenso läßt sich die Erwärmung  $\vartheta_{EK}$ , die beim Messen im Kurzschlußzustand ermittelt wird, sowohl nach der Methode mit zwei als auch nach dem Verfahren mit vier Erwärmungsmessungen ausdrücken:

$$\vartheta_{EK} = c'_1 P_l + c'_2 P_{AL} + c'_4 P_{EK} \quad (16)$$

$$\vartheta_{EK} = c_1 P_l + c_2 P_{AK} + c_4 P_{EK}. \quad (17)$$

Aus diesen beiden Gleichungen hat man

$$c'_2 = c_2 + \frac{c_1 P_l - c'_1 P_l}{P_{AK}} + \frac{c_4 P_{EK}}{P_{AK}} + \frac{c'_4 P_{EK}}{P_{AK}} \quad (18)$$

und mit Gleichung (15)

$$c'_2 = c_2 + \frac{c_1 P_l - c'_1 P_l}{P_{AK}} \left(1 - \frac{P_{EK}}{P_{EL}}\right) - c_3 \frac{P_{EK}}{P_{AK}} \frac{P_{FL}}{P_{EL}}. \quad (19)$$

Setzt man in Gleichung (1) die Gleichungen (15) und (19) ein, so hat man nach entsprechender Ordnung

$$\vartheta'_E = \underbrace{c'_1 P_l + (c_1 P_l - c'_1 P_l) \left( \frac{P_E}{P_{EL}} + \frac{P_A}{P_{AK}} - \frac{P_A}{P_{AK}} \frac{P_{EK}}{P_{EL}} \right)}_{K1} + c_2 P_A + \underbrace{+ c_3 P_{FL} \left( \frac{P_E}{P_{EL}} - \frac{P_{EK}}{P_{AK}} \frac{P_A}{P_{EL}} \right)}_{K3} + c_4 P_E. \quad (20)$$

Ein Vergleich dieser Gleichung mit der für die Überhitzung nach der Methode der vier Erwärmungsmessungen ermittelten Gleichung

$$\vartheta_E = c_1 P_l + c_2 P_A + c_3 P_F + c_4 P_E \quad (21)$$

führt zu dem Resultat, daß das nach dem Verfahren mit zweimaliger Erwärmungsmessung ermittelte  $\vartheta'_E$  dem nach der Methode mit viermaliger Erwärmungsmessung bestimmten  $\vartheta_E$  gleich ist, sofern

$$c'_1 P_l + (c_1 P_l - c'_1 P_l) \left( \frac{P_E}{P_{EL}} + \frac{P_A}{P_{AK}} - \frac{P_A}{P_{AK}} \frac{P_{EK}}{P_{EL}} \right) = c_1 P_l \quad (22)$$

und

$$c_3 P_{FL} \left( \frac{P_{EL}}{P_E} - \frac{P_{EK} P_A}{P_{AK} P_{EL}} \right) = c_3 P_F. \quad (23)$$

Auf diese Weise ist eine Lösung der Gleichungen (20) und (21) gegeben. Wie noch zu sehen sein wird, befriedigt diese Lösung auch die Gleichungen für die Erwärmung der Ankerwicklung, sie bildet also die einzige Lösung. Nach Ordnung von (22) und (23) ergibt sich aus (22)

$$\frac{P_E}{P_{EL}} + \frac{P_A}{P_{AK}} - \frac{P_A}{P_{AK}} \frac{P_{EK}}{P_{EL}} = 1, \quad (24)$$

aus (23) hingegen

$$\frac{P_E}{P_{EL}} - \frac{P_F}{P_{FL}} - \frac{P_A}{P_{AK}} \frac{P_{EK}}{P_{EL}} = 0. \quad (25)$$

Führt man die Bezeichnung

$$\frac{P_A P_{EK}}{P_{AK}} = P_{EA} \quad (26)$$

ein, so nimmt die die Leerlaufverhältnisse bestimmende Gleichung (25) die

Form

$$\frac{P_{FL}}{P_{EL}} = \frac{P_F}{P_E - P_{EA}} \quad (27)$$

an, während sich die Gleichung (24), die die Verhältnisse beim Messen im Kurzschlußzustand bestimmt, gleichfalls nach Substitution und Ordnung, zu

$$\frac{P_E - P_{EA}}{P_{EL}} + \frac{P_A}{P_{AK}} = 1 \quad (28)$$

schreibt.

*Zusammenfassend* läßt sich feststellen: Wird die Leerlaufmessung bei einer Erregung durchgeführt, bei der der Quotient  $P_{FL}/P_{EL}$  der rechten Seite der Gleichung (27) gleich ist, und mißt man an der kurzgeschlossenen Maschine so, daß die Ankerwicklungsverluste die Gleichung (28) befriedigen, so erhält man für die Erwärmung der Erregerwicklung nach dem Verfahren mit zwei Erwärmungsmessungen dasselbe Ergebnis, wie bei Berechnung nach der Methode mit vier Erwärmungsmessungen.

Auch die Verhältnisse der *Ankerwicklung* müssen einer Prüfung unterzogen werden. Beim Messen im Leerlauf erhält man für die Überhitzung der Ankerwicklung dieselben Werte, gleichviel ob man sich der Methode mit zwei oder des Verfahrens mit vier Erwärmungsmessungen bedient:

$$\vartheta_{AL} = c'_1 P_l + c'_7 P_{FL} \quad (29)$$

$$\vartheta_{AL} = c_5 P_l + c_7 P_{FL} + c_8 P_{EL} \quad (30)$$

und aus diesen beiden Gleichungen

$$c'_7 = \frac{c_5 P_l - c'_1 P_l}{P_{FL}} + c_7 + c_8 \frac{P_{EL}}{P_{FL}} \quad (31)$$

Ähnlich hat man beim Messen im Kurzschlußzustand

$$\vartheta_{AK} = c'_1 P_l + c'_6 P_{AK} \quad (32)$$

$$\vartheta_{AK} = c_5 P_l + c_6 P_{AK} + c_8 P_{EK} \quad (33)$$

und aus diesen

$$c'_6 = \frac{c_5 P_l - c'_1 P_l}{P_{AK}} + c_6 + c_8 \frac{P_{EK}}{P_{AK}} \quad (34)$$

Mit (31) und (34) und nach Ordnung hat man aus Gleichung (2)

$$\begin{aligned} \vartheta'_A = & \underbrace{c'_1 P_l + (c_5 P_l - c'_1 P_l) \left( \frac{P_A}{P_{AK}} + \frac{P_F}{P_{FL}} \right)}_{K5} + c_6 P_F + \\ & + c_7 P_F + c_8 \underbrace{\left( \frac{P_{EK}}{P_{AK}} P_A + \frac{P_{EL}}{P_{FL}} P_F \right)}_{K8} \end{aligned} \quad (35)$$

Setzt man in das mit  $K5$  bezeichnete Glied von (35) den aus der Gleichung (28) gewonnenen Wert

$$\frac{P_A}{P_{AK}} = 1 - \frac{P_E - P_{EA}}{P_{EL}}$$

ein, so hat man

$$K5 = c'_1 P_l + (c_3 P_l - c'_1 P_l) \left( 1 - \frac{P_E - P_{EA}}{P_{EL}} + \frac{P_F}{P_{FL}} \right),$$

ferner im Sinne von (27)

$$\frac{P_E - P_{EA}}{P_{EL}} = \frac{P_F}{P_{FL}}$$

und damit

$$K5 = c_3 P_l.$$

In das Glied  $K8$  von Gleichung (35) läßt sich demgegenüber der aus (27) gewonnene Ausdruck

$$\frac{P_{EL}}{P_{FL}} P_F = P_E - P_{EA} = P_E - \frac{P_A P_{EK}}{P_{AK}}$$

einsetzen, womit

$$K8 = c_8 P_E,$$

d. h.

$$\vartheta'_A = \vartheta_A.$$

Nimmt man demnach die Messung im Leerlauf so vor, daß der Quotient  $P_{FL}/P_{EL}$  der durch die rechte Seite von (27) zum Ausdruck gebrachten Beziehung gleich ist, mißt man ferner die Erwärmung im Kurzschlußzustand so, daß die Ankerwicklungsverluste die Gleichung (28) befriedigen, so erhält man für die betriebsmäßige Überhitzung sowohl der Erreger- als auch der Ankerwicklung dieselben Werte gleichviel, ob man sich der Methode mit zwei oder des Verfahrens mit vier Erwärmungsmessungen bedient.

Die beschriebenen Bedingungen bezeichnen wir als die idealen Ausgangsbedingungen der Messung.

## 2.2 Die praktischen Hindernisse für die Verwirklichung der idealen Ausgangsbedingungen

Beim Messen der Erwärmung im Leerlauf ist es die Gleichung (27), die die ideale Beziehung zwischen Eisen- und Erregungsverlust bestimmt. Den Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen im Leerlauf veranschaulicht Abb. 1, deren Konstruktion in einer früheren Arbeit über das Verfahren

mit vier Erwärmungsmessungen beschrieben ist [1]. Das Verhältnis  $P_{FL}/P_{EL}$  ist in Abb. 1 durch den Schnittpunkt  $m$  der durch die Koordinaten  $P_F$  und  $(P_E - P_{EA})$  gekennzeichneten Geraden gegeben. In der Mehrzahl der Fälle liegt der so ermittelte Erregungsverlust  $P_{Em}$  so hoch, daß er sich aus Erwärmungsgründen nicht verwirklichen läßt. Darüber hinaus verbietet es auch ein zweiter Grund, die Leerlaufmessung bei einem weit über der Nennspannung liegenden Spannungswert vorzunehmen, und dies selbst dann, wenn sich die durch Erregungsverluste verursachte Erwärmung in zulässigen Grenzen hielt.

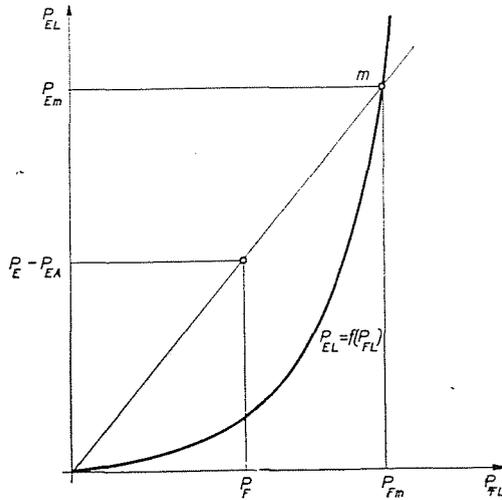


Abb. 1

Dieser Grund ist das Entstehen zusätzlicher Leerlaufverluste bei größerer Sättigung.

Erfahrungsgemäß steigt die auf Grund von Messungen aufgetragene Kurve  $P_0 = f(U_0)$  bei vielen Maschinen bei stärkerer Sättigung mehr oder weniger steiler als quadratisch an (Abb. 2). Bekanntlich ändern sich die Stämmeisenverluste und unter der Einwirkung jeder Zahnung auftretenden Oberflächenverluste mit der Luftspaltinduktion und der induzierten Spannung annähernd quadratisch. Bei normal gesättigten Maschinen findet man in der Nähe der Nennspannungswerte in der Regel noch kaum Abweichungen von der an die Kurve sich anschmiegenden quadratischen Parabel. Die über der quadratischen Kurve gelegenen Verluste nennt man die zusätzlichen Leerlaufverluste. Sie entstehen, weil als Folge der Sättigung eines Teiles des Eisenkerns Wechselfluxe auch die bei geringeren Sättigungen noch nicht Strom führenden Metallteile durchfließen und in diesen Wirbelstromverluste verursachen. Solche entstehen auch in den in die Nuten eingebetteten Ankerwicklungen.

Mit zunehmender Sättigung der Zähne wächst die auf diese entfallende magnetische Spannung, und auch die Nuten durchströmt ein Fluß, u. zw. im großen und ganzen in Längsrichtung. Diese Kraftlinien verlaufen durch die verhältnismäßig größer bemessenen Ankerleiter, werden doch diese eben in senkrechter Richtung auf die quer verlaufenden Kraftlinien klein ausgelegt, weil man im Normalbetrieb mit so großen längsgerichteten Kraftlinien nicht zu rechnen hat. Wird also die Maschine im Leerlauf auf eine hoch über der nominalen gelegene Spannung erregt, entstehen auch in den Ankerleitern Verluste. In der Verlustverteilung treten mithin wesentliche Änderungen ein, weshalb man die Berechnung keineswegs so durchführen kann, als entstände im Leerlauf in den Ankerleitern kein Verlust.

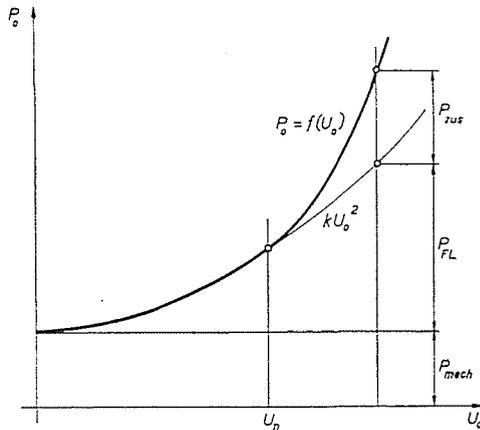


Abb. 2

Diese Verluste durch Messungen zu ermitteln ist überaus umständlich. Man erhält sie, wenn man Leerlaufverlustmessungen auch ohne Wicklungen, d. h. also vor deren Einbau vornimmt. Der zusätzliche Verlust ergibt sich hierbei aus dem Unterschied zwischen den demselben Erregerstrom zugehörigen Leerlaufverlusten.

Die zusätzlichen Leerlaufverluste bleiben bei der Methode mit zwei Erwärmungsmessungen unberücksichtigt. Aus diesem Grunde dürfen Leerlaufmessungen nur bei Erregungen durchgeführt werden, bei denen noch keine ins Gewicht fallende zusätzliche Leerlaufverluste entstehen.

### 2.3. Die Folgen der Abweichungen von den idealen Ausgangsbedingungen

Im vorangegangenen Punkt wurde gezeigt, daß Messungen nach der Methode mit zwei Erwärmungsbestimmungen unter den idealen Ausgangsbedingungen in der Mehrzahl der Fälle undurchführbar sind. Glücklicher-

weise verursachen jedoch selbst wesentliche Abweichungen von diesen keinen Fehler, die den Wert der Methode herabsetzen würden. Weichen die Leerlauf- und die Kurzschlußverluste von den durch die Gleichungen (27) und (28) bestimmten Werten ab, so besteht ein Unterschied zwischen dem mit  $K1$  bezeichneten Glied in Gleichung (20) und  $c_1 P_l$  und ein Unterschied zwischen dem Glied  $K3$  und  $c_3 P_F$ . An der Überhitzung der Erregerwicklung ist aber weder das eine, noch das andere Glied maßgeblich beteiligt. Ähnlich verhält es sich bei den Gliedern  $K5$  und  $K8$  der für die Ankerwicklung ermittelten Gleichung (35).

Bezeichnet man die aus den Gliedern  $K1$ ,  $K3$ ,  $K5$  und  $K8$  stammenden Fehler in dieser Reihenfolge mit  $h_1 \dots h_8$ , so hat man

$$h_1 = (c_1 P_l - c'_1 P_l) \left( \frac{P_E - P_{EA}}{P_{EL}} + \frac{P_A}{P_{AK}} - 1 \right) \quad (36)$$

$$h_3 = c_3 \left( \frac{P_{FL}}{P_{FL}} P_E - \frac{P_{FL}}{P_{EL}} P_{EA} - P_F \right) \quad (37)$$

$$h_5 = (c_5 P_l - c'_1 P_l) \left( \frac{P_A}{P_{AK}} + \frac{P_F}{P_{FL}} - 1 \right) \quad (38)$$

$$h_8 = c_8 \left( \frac{P_{EK}}{P_{AK}} P_A + \frac{P_{EL}}{P_{FL}} P_F - P_E \right). \quad (39)$$

In der Übererwärmung der Erregerwicklung beträgt der hier entstehende resultierende Fehler  $h_1 + h_3$ , in der Übererwärmung der Ankerwicklung hingegen  $h_5 + h_8$ . Zur Ermittlung dieser Fehler benötigt man leider auch die Temperaturerhöhungskoeffizienten  $c_1, c_3, c_5$  und  $c_8$ , die jedoch mittels besonders sorgfältig durchgeführter vier Erwärmungsmessungen bestimmt werden können. Für gewöhnlich kommt es aber nicht dazu, weil es sich nur um ganz geringe Fehler handelt. Der größte Teil der Fehler stammt aus den sogenannten überkommenen Fehlern.

### 3. Die überkommenen Fehler des Verfahrens mit zwei Erwärmungsmessungen

Die Fehler in den Werten der betriebsmäßigen Überhitzung stammen bei Ermittlung durch zwei Erwärmungsmessungen zur Hauptsache daraus, daß man bei den einzelnen Erwärmungsmessungen die Temperaturen und die Leistungen fehlerhaft mißt. Da diese in den zur Berechnung der Temperaturerhöhungskoeffizienten dienenden Gleichungen Beiwerte darstellen, werden wegen der in ihnen enthaltenen Fehler auch die anhand der Gleichun-

gen ermittelten Temperaturerhöhungskoeffizienten fehlerhaft sein, d. h. die Meßfehler »überkommen«.

Eine weitere Fehlerquelle liegt darin, daß die Temperaturen in der Maschine in dem Zustand, in welchem sich diese während der Prüfung befindet, andere Werte aufweisen als im Betriebszustand. Da die Temperaturerhöhungskoeffizienten von den Wärmeleitungs- und Wärmeübertragungsverhältnissen abhängen, die ihrerseits Funktionen der Temperaturen darstellen, muß in den verschiedenen Zuständen der Maschine während der Prüfungen und im Betriebszustand mit jeweils unterschiedlichen Temperaturerhöhungskoeffizienten gerechnet werden. Im Artikel über die Methode der vier Erwärmungsmessungen wurde das Verfahren beschrieben, welches die Wirkung der temperaturabhängigen Änderung des Temperaturerhöhungskoeffizienten zu berücksichtigen gestattet [1]. Dasselbe Verfahren läßt sich auch hier anwenden: Anhand der bei den einzelnen Prüfungen gemessenen und aus den berechneten Betriebstemperaturen werden die größtmöglichen Änderungen der einzelnen Temperaturerhöhungskoeffizienten und aus diesen die hieraus entstehenden Temperaturabweichungen bestimmt. Einschließlich der Meßunsicherheit bei Ermittlung der Temperaturen hat man damit die größtmöglichen Abweichungen in den Überhitzungen, wie sie in den nachstehenden Gleichungen figuriert. Diese größtmöglichen Abweichungen sollen im weiteren hinsichtlich der Erregerwicklung in Leerlauf mit  $\Delta\vartheta_{EL}$ , im Kurzschlußzustand mit  $\Delta\vartheta_{EK}$ , hinsichtlich der Ankerwicklung hingegen mit  $\Delta\vartheta_{AL}$  bzw. mit  $\Delta\vartheta_{AK}$  bezeichnet werden.

Bei annähernden Berechnungen kann man von der Temperaturabhängigkeit absehen und die Temperaturabweichungen mit den Temperaturmeßunsicherheiten gleichsetzen.  $\Delta\vartheta_{EL}$  ist dann der Unsicherheit der Leerlauftemperaturmessung an der Erregerwicklung gleich.

Die Fehler ergeben sich teils aus den Temperaturabweichungen, teils aus den Leistungsmeßunsicherheiten  $\Delta P_1 \dots \Delta P_{AK}$ , vererben sich also von diesen. Die größtmöglichen Abweichungen in den Temperaturerhöhungskoeffizienten der Erregerwicklung, d. h. die deren Unsicherheit bestimmenden Gleichungen werden anhand von (5) und (6) in Analogie zu den Gleichungen 2.13—2.16 des vorangegangenen Artikels [1] aufgeschrieben, man hat also

$$P_1 \Delta c'_1 + \quad + P_{EL} \Delta c'_4 = \Delta\vartheta_{EL} - (\Delta P_1 \cdot c'_1 + \Delta P_{EL} \cdot c'_4) \quad (40)$$

$$P_1 \Delta c'_1 + P_{AK} \Delta c'_2 + P_{EK} \Delta c'_4 = \Delta\vartheta_{EK} - (\Delta P_1 c'_1 + \Delta P_{AK} c'_2 + \Delta P_{EK} c'_4), \quad (41)$$

für die Unsicherheit der Temperaturerhöhungskoeffizienten der Ankerwicklung hingegen

$$P_1 \Delta c'_1 + \quad + P_{FL} \Delta c'_7 = \Delta\vartheta_{AL} - (\Delta P_1 c'_1 + \Delta P_{FL} c'_7) \quad (42)$$

$$P_1 \Delta c'_1 + P_{AK} \Delta c'_6 = \Delta\vartheta_{AK} - (\Delta P_1 c'_1 + \Delta P_{AK} c'_6). \quad (43)$$

Da diese vier Gleichungen fünf Unbekannte enthalten, benötigen wir noch einen weiteren Zusammenhang. Die Unsicherheit von  $c'_1$  wird aus (3) ermittelt, während sich die relative Unsicherheit von  $c'_{1L}$  und  $c'_{1K}$  aus der Summe der relativen Unsicherheiten im Zähler und Nenner ergibt. Es gilt also

$$\frac{\Delta c'_{1L}}{c'_{1L}} = \frac{\Delta \vartheta_{1L}}{\vartheta_{1L}} + \frac{\Delta P}{P} \quad \text{und} \quad \frac{\Delta c'_{1K}}{c'_{1K}} = \frac{\Delta \vartheta_{1K}}{\vartheta_{1K}} + \frac{\Delta P}{P}. \quad (44)$$

Die relativen Unsicherheiten sämtlicher Leistungsmessungen werden als gleich hoch angesetzt. Da  $c'_{1L}$  und  $c'_{1K}$  praktisch gleich groß sind, wird

$$\frac{\Delta c'_1}{c'_1} = \frac{\Delta c'_{1L}}{2c'_{1L}} + \frac{\Delta c'_{1K}}{2c'_{1K}}. \quad (45)$$

Aus den Gleichungen (40) und (5) ergibt sich für die relative Unsicherheit des Temperaturerhöhungskoeffizienten  $c'_4$

$$\frac{\Delta c'_4}{c'_4} = \frac{\Delta \vartheta_{EL} + P_l \Delta c'_1 + \Delta P_l c'_1}{\vartheta_{EL} - c'_1 P_l} + \frac{\Delta P_{EL}}{P_{EL}}. \quad (46)$$

Die Plus-Zeichen im Zähler ergeben sich daraus, daß die dortigen Glieder mit den gleichen Vorzeichen eingesetzt sind, wie sie für  $\Delta \vartheta_{EL}$  gültig sind. Auf die gleiche Weise wird bei Berechnung der relativen Fehler der weiteren Temperaturerhöhungskoeffizienten verfahren. Aus (41) und (6) hat man demnach

$$\frac{\Delta c'_2}{c'_2} = \frac{\Delta \vartheta_{EK} + P_l \Delta c'_1 + P_{EK} \Delta c'_4 + \Delta P_l c'_1 + \Delta P_E c'_4}{\vartheta_{EK} - c'_1 P_l - c'_4 P_{EK}} + \frac{\Delta P_{AK}}{P_{AK}} \quad (47)$$

und aus (42) und (43) sowie aus (10) und (12)

$$\frac{\Delta c'_6}{c'_6} = \frac{\Delta \vartheta_{AK} + P_l \Delta c'_1 + \Delta P_l c'_1}{\vartheta_{AK} - c'_1 P_l} + \frac{\Delta P_{AK}}{P_{AK}} \quad (48)$$

und

$$\frac{\Delta c'_7}{c'_7} = \frac{\Delta \vartheta_{AL} + P_l \Delta c'_1 + \Delta P_l c'_1}{\vartheta_{AL} - c'_1 P_l} + \frac{\Delta P_{FL}}{P_{FL}}. \quad (49)$$

Solcherart sind die relativen Unsicherheiten sämtlicher Temperaturerhöhungskoeffizienten der Methode Ganz bestimmt. Sie ergaben sich teils aus den Temperaturabweichungen, teils aus den Unsicherheiten der Leistungsmessungen. Unter Weglassung der Indizes lassen sich die Ausdrücke für die relative Unsicherheit von  $c'_1$ ,  $c'_4$ ,  $c'_6$  und  $c'_7$  mit einer verhältnismäßig geringfügigen Vernachlässigung in folgender einfacher Form aufschreiben:

$$\frac{\Delta c'}{c'} = \frac{\Delta \vartheta}{\vartheta} + \frac{\Delta P}{P}, \quad (50)$$

worin  $\Delta\vartheta/\vartheta$  die relative Unsicherheit der entsprechenden Überhitzung und  $\Delta P/P$  die der entsprechenden Leistung bedeutet. In den soeben abgeleiteten Ausdrücken  $\frac{\Delta c'_4}{c'_4}$ ,  $\frac{\Delta c'_6}{c'_6}$  und  $\frac{\Delta b'_7}{c'_7}$  werden die Zähler durch die Glieder  $P_l \Delta c'_1 + \Delta P_l c'_1$  etwas erhöht, die Nenner hingegen durch die Glieder  $c'_1 P_l$  herabgesetzt, so daß die tatsächlichen Werte etwas höher zu liegen kommen als die anhand der Gleichung (50) ermittelten Werte. Die Abweichungen sind jedoch verhältnismäßig gering, und *annähernd gilt die Feststellung, daß die relativen Unsicherheiten der Temperaturerhöhungskoeffizienten der Methode Ganz durch die Summe der relativen Unsicherheiten der entsprechenden Überhitzungen und Leistungen bestimmt werden.*

Die einzige Ausnahme bildet die relative Unsicherheit des Temperaturerhöhungskoeffizienten  $c'_2$ , denn im Ausdruck  $\frac{\Delta c'_2}{c'_2}$  gemäß (47) ist der Nenner klein, so daß der Quotient einen hohen Wert hat. Das im Nenner aufscheinende  $c'_4 P_{EK}$  hat nämlich nahezu die gleiche Größe wie  $\vartheta_{EK} - c'_1 P_l$ . Eine weitere Erhöhung erfährt der Wert von (47) dadurch, daß die Gleichung auch einen Zähler hat, dessen Wert höher liegt als derjenige der Zähler in den anderweitigen Ausdrücken für die relativen Fehler der Temperaturerhöhungskoeffizienten.

Für die Brauchbarkeit der Methode ist jedoch das Endergebnis, d. h. die Unsicherheit der betriebsmäßigen Überhitzung der Erreger- und der Ankerwicklung maßgebend. Die Unsicherheit der betriebsmäßigen Übererhitzung der Erregerwicklung schreibt sich im Sinne von (1) zu

$$\Delta\vartheta_E = \Delta c'_1 P_l + \Delta c'_2 P_A + \Delta c'_4 P_E, \quad (51)$$

die der Ankerwicklung hingegen zu

$$\Delta\vartheta_A = \Delta c'_1 P_l + \Delta c'_6 P_A + \Delta c'_7 P_F. \quad (52)$$

$c'_1 \dots c'_7$  sind die absoluten Unsicherheiten, die man als Produkt der relativen Unsicherheiten gemäß (45), (46), (47), (48) und (49) und der Temperaturerhöhungskoeffizienten erhält:  $\Delta c'_1 = \left(\frac{\Delta c'_1}{c'_1}\right) c'_1 \dots \Delta c'_7 = \left(\frac{\Delta c'_7}{c'_7}\right) c'_7$ . Die große relative Unsicherheit des Temperaturerhöhungsfaktors  $c'_2$  beeinflusst das Endergebnis nur unwesentlich, weil sein Wert klein ist und im allgemeinen nach Größenordnung unter dem von  $c'_4$  liegt. Annähernd zeigt  $c'_2$ , inwieweit der Ankerwicklungsverlust die Erregerwicklung erwärmt, diese Wirkung aber ist bekanntlich klein.

Als Beispiel seien hier die Fehler in den Ergebnissen einer Messung angeführt, die in einem 6300 V, 5000 kVA — Turbogenerator der Elektrizitätsfabrik Ganz nach dem Ganz-Verfahren vorgenommen wurde. Bei Berechnung der vererbten Fehler war hierbei eine Meßunsicherheit von  $\pm 2^\circ \text{C}$  bei der

Temperatur und von  $\pm 2\%$  bei der Leistung in Rechnung gestellt worden. Bei den einzelnen Temperaturerhöhungskoeffizienten haben sich folgende Unsicherheiten ergeben:

$$\frac{\Delta c'_1}{c'_1} = 8\% \quad \frac{\Delta c'_2}{c'_2} = 93,5\% \quad \frac{\Delta c'_4}{c'_4} = 7,4\%$$

$$\frac{\Delta c'_6}{c'_6} = 8,6\% \quad \frac{\Delta c'_7}{c'_7} = 7,4\% .$$

Als resultierende Unsicherheit in der betriebsmäßigen Erwärmung der Erregerwicklung ergab sich ein  $\frac{\Delta \vartheta_E}{\vartheta_E} = 12,7\%$ , in der betriebsmäßigen Erwärmung der Ankerwicklung hingegen ein  $\frac{\Delta \vartheta_A}{\vartheta_A} = 8,1\%$ .

#### 4. Vergleich der Fehler bei Ermittlungen nach den Methoden der zwei und der vier Erwärmungsmessungen

Die Fehler der Methode mit zwei Erwärmungsmessungen stammen zum größten Teil, die des Verfahrens mit vier Erwärmungsmessungen zur Gänze aus den sogenannten überkommenen Fehlern, deren Ursachen in den Unsicherheiten der Temperatur- und der Leistungsmessung, ferner darin zu suchen sind, daß die Temperaturerhöhungskoeffizienten Funktionen der Temperatur darstellen und daß zwischen den betriebsmäßigen Temperaturen einerseits und den in den einzelnen Prüfungszuständen meßbaren Temperaturen andererseits Unterschiede auftreten. Der Unterschied zwischen den Ergebnissen der beiden Methoden ergibt sich seinem Wesen nach daraus, daß die überkommenen Fehler beim Verfahren mit vier Erwärmungsmessungen eben wegen der Eigenart der Methode überaus groß, beim Verfahren mit zwei Erwärmungsmessungen hingegen verhältnismäßig klein sind.

Der Vergleich der Fehler der beiden Methoden führt zu der Feststellung, daß das Verfahren mit zwei Erwärmungsmessungen der Methode mit vier Erwärmungsmessung gegenüber auch mit zusätzlichen Fehlern behaftet ist, wenn man von der Überlegung ausgeht, daß die Ausgangs-Meßdaten fehlerfrei sind. Im Prinzip lassen sich zwar auch Meßbedingungen finden, unter denen diese zusätzliche Fehler nicht auftreten, doch können diese Bedingungen praktisch nicht eingehalten werden. Die zusätzlichen Fehler bedeuten jedoch höchstens eine Abweichung um  $1-2^\circ \text{C}$  und können im Sinne von Punkt 2.3 bestimmt werden.

Beim vier Erwärmungsmessen können in den meisten Temperaturerhöhungskoeffizienten selbst bei kleinen Meßfehlern unschwer 100 prozentige

Unsicherheiten entstehen. In dem im vorangegangenen Artikel [1] beschriebenen Beispiel erreichten die relativen Fehler der einzelnen Temperaturerhöhungskoeffizienten bis zu hundert Prozent, und in der betriebsmäßigen Übererhitzung der Erregerwicklung ergab sich eine Unsicherheit von 60 Prozent, in der der Ankerwicklung eine solche von 50 Prozent.

Beim zwei Erwärmungsmessen zeigen sämtliche Temperaturerhöhungskoeffizienten, mit Ausnahme des einen weniger wichtigen, annähernd die geringe relative Unsicherheit gemäß Gleichung (50). Sie ergeben sich praktisch als Summe der relativen Unsicherheiten der entsprechenden Übererwärmungen und der Leistungsmessungen. Die große relative Unsicherheit des Temperaturerhöhungskoeffizienten  $c_2'$  verursacht deshalb keinen wesentlichen Fehler in der Berechnung der betriebsmäßigen Übererhitzung, weil es sich bei ihm um einen kleinen Wert handelt, denn die von der Ankerwicklung stammenden Verluste bleiben ohne wesentlichen Einfluß auf die Übererwärmung der Erregerwicklung.

Ein Vergleich der überkommenen Fehler gestattet die Feststellung, daß gleich große Meßfehler, bei der Methode mit zwei Erwärmungsmessung, in den Temperaturerhöhungskoeffizienten um annähernd eine Größenordnung kleinere relative Fehler ergeben als bei der vier Erwärmungsmessung Methode. Annähernd dasselbe gilt auch für die betriebsmäßigen Übererwärmungen. Wesentliche Änderungen ergeben sich hieran auch aus den zusätzlichen Fehlern nicht, die der Methode mit zwei Erwärmungsmessungen zum Unterschied von jener mit vier Erwärmungsmessungen anhaften.

Bei Bewertung der beiden Methoden darf außer dem Vergleich der Fehler auch der Umstand nicht unberücksichtigt bleiben, daß die zweimalige Erwärmungsmessung nur etwa die Hälfte jener Arbeit beansprucht, die man auf das viermalige Erwärmungsmessen aufzuwenden hat. Bei großen Maschinen aber erfordern die Erwärmungsmessungen bekanntlich viel Zeit.

### Zusammenfassung

Zwei Erwärmungsmessungen genügen zur Bestimmung der betriebsmäßigen Erwärmungen im allgemeinen nicht. Aus diesem Grund arbeitet diese Methode mit gewissen Annäherungsannahmen, die im Vergleich zum Verfahren mit vier Erwärmungsmessungen prinzipielle zusätzliche Fehler in sich bergen. Trotzdem beweist die Praxis, daß das Verfahren für gewöhnlich weit genauere Ergebnisse liefert als die Methode mit vier Erwärmungsmessungen. Durch Analyse des Verfahrens wird im vorliegenden Artikel nachgewiesen, daß es Ausgangsmeßbedingungen gibt, bei welchen sich die Wirkungen der Vernachlässigungen kompensieren und zwischen dem Endergebnis der Methode mit zwei fehlerlosen Messungen und dem des Verfahrens mit vier fehlerlosen Erwärmungsmessungen kein Unterschied auftritt. Wenngleich sich diese idealen Ausgangsbedingungen in der Mehrzahl der Fälle nicht verwirklichen lassen, entstehen hieraus keine ins Gewicht fallende Fehler.

Die wesentlichen Abweichungen zwischen den Endergebnissen der beiden Methoden entstammen den sogenannten »überkommenen Fehlern«, die sich aus den Meßfehlern bei Bestimmung der Temperatur und Leistung ergeben. Wie die Analysen zeigen, liegen die überkommenen Fehler — gleiche Temperatur- und Leistungsmeßfehler vorausgesetzt —, beim Verfahren mit zwei Erwärmungsmessungen um eine Größenordnung niedriger als beim Verfahren mit vier Erwärmungsmessungen.

**Literatur**

1. ISTVÁNFY, GY.: A négy melegedési mérési módszer analízise (Analyse der Methode der vier Erwärmungsmessungen). *Periodica Polytechnica* 6, 87 (1962).
2. MÁNDI, A.: Nagy villamos gépek (Grosse Elektromaschinen). Kolleghefte der Technischen Universität Budapest 1951.
3. ZSERVE, G. K.: Villamosgépek ipari vizsgálata (Industrielle Untersuchung elektrischer Maschinen). Nehézipari Kiadó, Budapest 1953.
4. ISTVÁNFY, GY.: Villamos gépek mérése (Die Prüfung elektrischer Maschinen) II. Tankönyvkiadó, Budapest 1960.

GY. ISTVÁNFY: Budapest XI., Egry József u. 18, Ungarn.