

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 57 (1966)
Heft: 15

Artikel: Die Anwendung der kalorimetrischen Methode zur Bestimmung der Verluste von Grossmaschinen
Autor: Christen, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916618>

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: 18.01.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Die Anwendung der kalorimetrischen Methode zur Bestimmung der Verluste von Grossmaschinen

Von A. Christen, Zürich

621.317.384 : 621.313.017

Die kalorimetrische Methode zur Bestimmung der Verluste von Grossmaschinen mit geschlossenem Luftkreislauf und indirekter Wasserkühlung steht vor der Einführung in die Empfehlungen der CEI²⁾. Sie erfasst vor allem die tatsächlichen Gesamtverluste aus dem Vollastversuch besser als das konventionelle Einzelverlust-Verfahren, eignet sich aber auch zur Bestimmung der Einzelverluste. Oft stellt sie sogar die einzig mögliche Methode zur experimentellen Ermittlung des Wirkungsgrades dar. Nach der Erläuterung der Messtechnik wird die erreichbare Genauigkeit realistisch beurteilt. Die aus Versuchen an mehreren Grossmaschinen resultierenden direkt kalorimetrisch gemessenen Einzel- und Gesamtverluste werden miteinander verglichen und den Resultaten des konventionellen Einzelverlust-Verfahrens gegenübergestellt. Dabei zeigt es sich, dass die direkte kalorimetrische Verlustmessmethode dem Einzelverlust-Verfahren innerhalb der Messgenauigkeit ebenbürtig ist. An einem Beispiel wird die indirekte oder vergleichende kalorimetrische Methode erläutert. Interessante Nebenresultate liefern die Untersuchungen über die Temperaturabhängigkeit der Last- und Ventilationsverluste von Synchronmaschinen.

La méthode calorimétrique de détermination des pertes des grandes machines avec circuit d'air fermé et refroidissement indirect par eau va tantôt être introduite dans les Recommandations de la CEI²⁾. Cette méthode présente l'avantage essentiel de mieux préciser les pertes totales effectives de l'essai à pleine charge, que le procédé conventionnel par pertes séparées, mais demeure néanmoins également appropriée à la détermination de telles pertes séparées. Ce procédé présente même souvent la seule méthode applicable à la détermination expérimentale du rendement. Après avoir commenté la technique de mesure, le degré de précision, susceptible d'être atteint, est jugé d'un point de vue réaliste. Les pertes séparées et totales, résultant de mesures calorimétriques directes au cours d'essais effectués sur plusieurs grandes machines, sont mutuellement comparées puis confrontées aux résultats obtenus à l'aide du procédé conventionnel à pertes séparées. Cette confrontation prouve, qu'au point de vue de la précision des mesures, la méthode calorimétrique directe de détermination des pertes est équivalente au procédé par pertes séparées. Un exemple illustre la méthode calorimétrique indirecte ou comparative. L'examen se rapportant aux pertes de charge et de ventilation de machines synchrones en fonction de la température fournit en outre d'intéressants résultats complémentaires.

1. Allgemeines

Die Steigerung der Einheitsleistungen und der Wirkungsgrade von grossen elektrischen Maschinen sowie die erhöhte Bedeutung, welche heute der Verlustbewertung zukommt, ergeben neue Anforderungen bei der Nachprüfung der angegebenen Garantiewerte. Nach wie vor steht die Ermittlung der Generator-Wirkungsgrade nach dem konventionellen Einzelverlust-Verfahren im Vordergrund, doch kommt daneben auch der kalorimetrischen Verlustmessung immer mehr Bedeutung zu. Dies bestätigen verschiedene Publikationen [5; 6; 7; 8]¹⁾, welche sich mit den theoretischen Grundlagen, der Messtechnik und den Resultaten dieser Methode auseinandersetzen. Mehrfach wird dabei auch auf jene Fälle hingewiesen, bei welchen zur Bestimmung der Wirkungsgrade nur die kalorimetrische Verlustmessung in Frage kommt. Die vorläufig noch verbreitete Skepsis gegen die Anwendung dieser Methode darf aber nicht dazu führen, dass in solchen Fällen nach dem im Offertstadium hart geführten Kampf um die Wirkungsgrade die Überprüfung der im Pflichtenheft garantierten Verlustwerte fallengelassen wird. Vielmehr sollten durch vermehrte Anwendung der kalorimetrischen Methode Erfahrungswerte gesammelt und Vergleichsmessungen ermöglicht werden.

Die Materialprüfanstalt des SEV hatte in den vergangenen Jahren dank dem freundlichen Entgegenkommen verschiedener schweizerischer Kraftwerkgesellschaften mehrfach Gelegenheit, die Verluste grosser Synchronmaschinen mit indi-

rekter Wasserkühlung kalorimetrisch zu messen. Es wurden dabei sowohl die Einzel- als auch die Gesamtverluste ermittelt; in einzelnen Fällen konnten zum Vergleich auch die konventionelle wattmetrische Einzelverlustmessung und das Auslaufverfahren durchgeführt werden.

Im Falle eines grossen Asynchronmotors mit indirekter Wasserkühlung kam die sog. vergleichende oder indirekte kalorimetrische Methode zur Anwendung [3]. Eine ausführliche Beschreibung dieses Verfahrens findet sich in den neuen französischen Maschinenregeln [4] im Annexe II, Abschnitt A. Auf diese Weise konnten die Zusatzverluste des Asynchronmotors bei einem beliebigen Betriebszustand bestimmt werden.

Nachfolgend soll vor der Erörterung der Messtechnik und der Messergebnisse ein Überblick über die in internationalen und nationalen Fachgremien unternommenen Bestrebungen zur Einführung der kalorimetrischen Methode gegeben werden.

2. Internationale Bestrebungen zur Einführung der kalorimetrischen Verlustmessung in die Empfehlungen der CEI²⁾

Im Juli 1960 unternahm das Norwegische Nationalkomitee der CEI erstmals einen Vorstoss zur Normung der kalorimetrischen Messmethode für Generatoren mit indirekter Wasserkühlung. Das Sous-Comité 2D «Pertes et rendement» des Comité d'Etudes No 2 «Machines tournantes» hatte damals gerade die Revision der ersten Ausgabe der CEI-Publikation 34-2

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

²⁾ CEI = Commission Electrotechnique Internationale.

«Recommandations relatives à la détermination du rendement des machines électriques tournantes» abgeschlossen und sollte nun mit der Ausarbeitung entsprechender Empfehlungen für die kalorimetrische Verlustmessung beauftragt werden. Das Bureau Central der CEI wandte sich in der Folge mit der Aufforderung zur Stellungnahme an die verschiedenen Nationalkomitees und veranstaltete eine Umfrage, ob eine Erweiterung der CEI-Publikation 34-2 im vorgeschlagenen Sinne wünschbar sei und welche Vorschriften über das zur Diskussion stehende Messverfahren in den einzelnen Ländern bereits bestünden.

Die Antworten der Nationalkomitees auf diese Umfrage waren mit einer Ausnahme durchwegs positiv und zeigten das Interesse vieler Länder für das kalorimetrische Verfahren. Einzig die USA bezeichneten eine Diskussion über dieses Thema als «Zeitverschwendung» und betrachteten diese Messmethode als nicht wünschenswert. Allerdings enthielt die AIEE-Publ. Nr. 503³⁾ [1] schon damals Ausführungsbestimmungen zur Durchführung kalorimetrischer Messungen. Die Umfrage ergab ausserdem, dass Deutschland, Frankreich und die Schweiz in ihre Regeln für elektrische Maschinen mehr oder weniger ausführliche Bestimmungen über die kalorimetrische Wirkungsgrad-Messung aufgenommen hatten. Trotz der positiven Beantwortung der Umfrage wurden doch Bedenken angemeldet, und es zeigte sich, dass allgemein vermehrte Unterlagen und Erfahrungen über die praktische Anwendung der Wirkungsgradbestimmung nach der kalorimetrischen Methode gewünscht wurden.

Das Bureau Central veröffentlichte darauf im August 1961 einen ersten Textentwurf für einen Anhang III zur CEI-Publ. 34-2 und unterbreitete ihn den Nationalkomitees zur Stellungnahme. Bis zur CEI-Tagung in Leningrad im Oktober 1963 nahmen verschiedene Länder mehr oder weniger kritisch zu diesem Entwurf Stellung. Eine allgemeine Skepsis machte sich gegenüber einer Aufnahme in die CEI-Empfehlungen bemerkbar, die wiederum die mangelnde Erfahrung und damit auch das fehlende Zutrauen zur kalorimetrischen Messmethode erkennen liessen. Man verzichtete in Leningrad auf die Behandlung des Sekretariatsvorschlages, nachdem Frankreich einen erweiterten Entwurf in Aussicht stellte, der dann auch im Juni 1964 als Dokument 2D(France)5 erschien. Es handelte sich um ein Revisionsprojekt für die zweite Auflage der CEI-Publ. 34-2 mit ausführlichen Bestimmungen über die direkte und indirekte kalorimetrische Ermittlung der Verluste von rotierenden elektrischen Maschinen. Dieses Projekt fand in der Folge seine Ergänzung durch ähnliche Vorschläge von Grossbritannien, Schweden und Norwegen, so dass im Oktober 1965 an der CEI-Tagung in Tokyo eine Fülle von Diskussionsmaterial vorlag. Dort wurde beschlossen, innerhalb von 6 Monaten einen Sekretariatsentwurf auszuarbeiten, der die erwähnten Vorschläge zusammenfasst. Das Kapitel über die kalorimetrischen Messungen sollte einer besonderen Arbeitsgruppe zur Festlegung der Messverfahren übergeben werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass nach mehrjähriger Vorbereitungszeit die Einführung der kalorimetrischen Messmethode in die CEI-Empfehlungen vor der Verwirklichung steht. Dies ist vor allem für jene Fachleute erfreulich, die seit Jahren auf diesem Gebiet Erfahrungen gesammelt und an der Verfeinerung dieser Messtechnik gearbeitet haben.

³⁾ AIEE = American Institute of Electrical Engineers.

3. Nationale Regeln für die Wirkungsgradbestimmung nach der kalorimetrischen Methode

Gegenwärtig sind in den Vorschriften von 4 Ländern Bestimmungen über die Verlustmessung nach der kalorimetrischen Methode aufgenommen worden [1; 2; 3; 4;]. Während die VDE-Publikation 0530/3.59 keine Ausführungsbestimmungen enthält, sind in den schweizerischen und französischen Maschinenregeln die entsprechenden Messverfahren wesentlich detaillierter beschrieben.

4. Messtechnik und Messgenauigkeit der direkten kalorimetrischen Methode

Die untersuchten Maschinen wiesen durchwegs einen geschlossenen Luftkreislauf mit indirekter Wasserkühlung auf und eigneten sich deshalb besonders für die direkte kalorimetrische Verlustmessung im *Sekundärkreis*. Der messtechnische Aufwand bleibt bei dieser Art der Kalorimetrie in vernünftigem Rahmen und zudem ist die erreichbare Messgenauigkeit wesentlich grösser als bei Messungen im Primärkreis (Luftkalorimetrie).

Die für den Wirkungsgrad massgebenden Gesamtverluste $P_{d \text{ tot}}$ der Maschine setzen sich wie folgt zusammen:

- a) Aus der durch das Kühler-Kühlmittel weggeführten Verlustleistung P_{d1} ;
- b) Aus der durch Strahlung und Konvektion von Gehäuseteilen an die Umgebungsluft abgegebenen Wärmeleistung P_s ;
- c) Aus den normalerweise durch einen eigenen Kühlkreislauf abgeführten Lagerverlusten P_l ;
- d) Aus den Verlusten an Schleifringen und in Hilfsmaschinen;
- e) Aus Wärmeverlusten, welche über die Maschinenwelle und das Fundament abfliessen.

Zu a): Die Verlustleistung P_{d1} in kW lässt sich aus dem Kühlflüssigkeitsstrom Q_m in kg/s und der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ in °C zwischen Aus- und Eintritt der Kühlflüssigkeit berechnen, wenn deren spezifische Wärme c in kJ/kg°C bekannt ist. Für Wasser als Kühlflüssigkeit gilt mit $c = 4,185$ kJ/kg°C:

$$P_{d1} = 4,185 \cdot \Delta\vartheta \cdot Q_m$$

Zu b): Die durch Strahlung und freie Konvektion von Gehäuseteilen an die Umgebungsluft abgegebene Wärmeleistung P_s in Watt wird nach den Regeln für elektrische Maschinen des SEV [3] mit folgender Näherungsformel erfasst:

$$P_s = \alpha_s \cdot \Delta\vartheta_s \cdot A_s$$

worin:

- $\alpha_s = 10 \dots 20 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ die Wärmeabgabezahl,
 $\Delta\vartheta_s$ = die Übertemperatur der wärmeabgebenden Fläche über die umgebende Lufttemperatur in °C,
 A_s die wärmeabgebende Oberfläche der Maschine in m².

Zu c): Die Lagerverluste P_l werden bei flüssigkeitsgekühlten Lagern kalorimetrisch bestimmt und die durch Strahlung und Konvektion abgeführte Wärmeleistung berücksichtigt.

Zu d): Die Verluste an Schleifringen und in Hilfsmaschinen können auf Grund der dem Polrand zugeführten Erregerleistung genügend genau berechnet werden.

Zu e): Im allgemeinen werden die über Maschinenwelle und Fundament abfliessenden Wärmeverluste als vernachlässig-

bar klein betrachtet. Diese Annahme ist in einzelnen Fällen gerechtfertigt, wie K. Bitter [6] an einem Beispiel gezeigt hat. Dass dies aber nicht generell zutrifft, wird später noch erläutert.

4.1 Messung der elektrischen Grössen

Für die Durchführung und genaue Auswertung der Versuche müssen Statorspannung, Statorstrom, Wirkleistung, Polradstrom und Polradspannung gemessen und ihre Konstanz während der Messdauer überwacht werden. Die Materialprüfanstalt des SEV verwendet für ihre Untersuchungen und Abnahmeversuche in Prüffeldern und Kraftwerken ausschliesslich ihre eigenen Messwandler der Klasse 0,1 und Präzisionsinstrumente der Klasse 0,2, welche periodisch überprüft und nötigenfalls neu geeicht werden. Für die kalorimetrischen Verlustmessungen sind zur Ergänzung der Versuchsbedingungen aber auch die Anzeigen der betriebsmässig vorhandenen Temperatur-Messeinrichtungen wichtig. Es werden über die ganze Versuchsdauer — anfangs in grösseren Abständen, bei Erreichen des thermischen Beharrungszustandes häufiger — die Statorwicklungs-, Statoreisen-, Kühlluft- und Lagertemperaturen mit Hilfe der in die Maschine eingebauten Widerstands- oder Thermoelemente gemessen.

Die Konstanz der elektrischen Grössen während des Versuches, vor allem aber während der Messzeit im Beharrungszustand, darf als genügend bezeichnet werden, wenn die Ablesungen von Messpunkt zu Messpunkt um weniger als 1 % ändern. Diese Forderung ist bei Wasserkraftanlagen erreichbar, wenn die Regulierung dauernd überwacht wird und die Versuche in eine Zeit verlegt werden, wo grosse Laständerungen im Netz selten sind.

4.2 Messung des Kühlflüssigkeitsstromes

Zur Messung der Flüssigkeitsmenge können geeignete Flüssigkeitszähler, Düsen oder Blenden in die Kühlleitungen eingebaut werden. Ihre Genauigkeit ist bei sorgfältigem Einbau und luft- oder gasfreiem Wasser weitgehend durch die Genauigkeit der Eichung bestimmt. Da aber Behältermessungen die Grundlage für die Eichung der erwähnten Messgeräte darstellen, ist es naheliegend, für die kalorimetrischen Verlustmessungen direkt diese Eichmethode anzuwenden, d. h. die Flüssigkeitsmenge mit Hilfe eines geeigneten Behälters zu messen. Der Kühlflüssigkeitsstrom ergibt sich dann aus der während einer bestimmten Zeit in den Behälter fliessenden Flüssigkeitsmenge. Damit sind aber bereits die Grenzen, die der Anwendbarkeit der Behältermessung in der Praxis gesetzt sind, angedeutet: Die Messzeit, während welcher das Kühlmittel in den Behälter eingeleitet wird, muss so gewählt werden, dass Fehler in der Zeitmessung die Genauigkeit der Mengenmessung möglichst wenig beeinflussen. Bei grossen sekundlichen Flüssigkeitsmengen macht dies aber einen Behälter von derart grossen Dimensionen notwendig, dass diese Methode aus praktischen Gründen nicht mehr angewendet werden kann. In diesen Fällen ist dem geeichten Flüssigkeitszähler der Vorzug zu geben. Er erzeugt allerdings einen beträchtlichen Druckabfall, der sich mit dem Quadrat der sekundlichen Durchflussmenge ändert, was dazu führen kann, dass der notwendige Kühlflüssigkeitsstrom für Vollast nicht mehr zur Verfügung steht. Dimensioniert man mit Rücksicht auf diese Tatsache den Zähler reichlich, so weist er bei kleineren Flüssigkeitsströmen zu grosse Anzeigefehler auf.

Bei den von der Materialprüfanstalt des SEV untersuchten Maschinen betrugen die Kühlflüssigkeitsströme 30 l/s oder weniger, so dass mit einem Behälter von 2500 l Inhalt Mengenmessungen mit guter Genauigkeit durchgeführt werden konnten. Bei einem Kühlflüssigkeitsstrom von 20 l/s beträgt die maximal mögliche Messzeit 125 s. Sie wird mit einer Präzisionsstoppuhr gemessen, deren Zeiger in 10 s einmal umläuft. Nimmt man den Stoppfehler zu 0,2 s an, so ergibt sich die Genauigkeit der Zeitmessung zu 0,16 %. Für die Messung des Kühlflüssigkeitsstromes darf deshalb unter Berücksichtigung der Fehler bei der Bestimmung des Behälterinhaltes mit einer Genauigkeit von 0,5 % gerechnet werden. Dabei ist vorausgesetzt, dass die Mengenmessung für jeden Messpunkt mehrmals wiederholt und der Mittelwert bestimmt wird.

Der Kühlflüssigkeitsstrom soll während der Zeit des Versuchs auf $\pm 0,5$ % konstant sein.

4.3 Messung der Temperaturerhöhung des Kühlmittels

Zur Messung der Temperaturen des in die Kühler ein- bzw. austretenden Kühlmittels können Präzisionsthermometer mit $1/10^0$ -Einteilung, Widerstands- oder Thermoelemente verwendet werden. Geht man beim Einbau und bei der Messung mit der notwendigen Sorgfalt vor, so liefern diese Messgeräte gute Resultate. Allerdings besteht die Messaufgabe bei der kalorimetrischen Verlustmessung eigentlich nicht darin, zwei Temperaturen unabhängig voneinander zu messen, sondern ihre Differenz möglichst genau zu ermitteln. Dies führt auf andere Messanordnungen, deren eine beispielsweise im Cigré-Rapport Nr. 119, Session 1964, beschrieben und begründet ist [8]: Die Temperaturerhöhung des Kühlmittels wird mit Hilfe von Widerstandselementen und einer eigens für die Kalorimetrie entwickelten Messbrücke bestimmt. Die Materialprüfanstalt des SEV verwendete bereits bei ihren ersten kalorimetrischen Verlustmessungen im Kraftwerk Birsfelden [5] eine Thermosäule bestehend aus 2×10 in Serie geschalteter Thermoelemente, deren resultierende EMK mit Hilfe eines Präzisions-Gleichstromkompensators sehr genau gemessen werden kann. Nach eingehenden Vergleichsversuchen mit anderen Messmethoden wurde der Thermosäule mit Kompensator bis heute meistens der Vorzug gegeben. Die Vorteile dieser Anordnung sind:

- a) Direkte Messung der Temperaturerhöhung;
- b) Unabhängigkeit von der schlechten Zugänglichkeit der Messstelle; die Enden der Thermosäule können beliebig lang sein und der Kompensator dadurch an einem geeigneten Platz aufgestellt werden;
- c) Unempfindlichkeit der Thermosäule gegen Vibrationen und gegen Änderungen der Umgebungstemperatur.

Für den Einbau der Thermosäule haben sich ölgefüllte Thermometertaschen, die direkt in die Kühlflüssigkeit eintauchen, sehr gut bewährt. Die Kühlrohre sind vom Kühler bis über die Meßstelle hinaus mit einer Wärmeisolation zu versehen, um Wärmeverluste zu vermeiden. Bei indirekt gekühlten Grossmaschinen sind in der Regel mehrere parallel geschaltete Kühlelemente eingebaut. Die Temperaturmessungen werden normalerweise in den Hauptkühlleitungen durchgeführt. Es ist daher sehr wichtig, die aus den verschiedenen Kühlelementen austretende Kühlflüssigkeit auf praktisch gleiche Temperatur zu bringen, um an der Meßstelle eine möglichst ausgeglichene Temperaturverteilung über den Leitungsquerschnitt zu erreichen. In die einzelnen Kühlrohre am Austritt der Kühlelemente wird je ein Präzisionsthermometer

eingebaut und die Austrittstemperaturen der Kühlflüssigkeit werden so einreguliert, dass sie weniger als $0,1^{\circ}\text{C}$ voneinander abweichen. Setzt man voraus, dass die Temperaturerhöhung des Kühler-Kühlmittels durch entsprechende Einstellung des Kühlflüssigkeitsstromes immer 10°C oder mehr beträgt, so wird die erreichbare Genauigkeit der Temperaturmessung besser als 1%; dabei ist allerdings vorausgesetzt, dass die Kühlmitteltemperatur im Kühlereintritt auf mindestens $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ konstant ist.

4.4 Messung der Oberflächentemperaturen

Zur Berechnung der durch Strahlung und freie Konvektion an die Umgebung der Maschine abgegebene Wärmeleistung ist die mittlere Oberflächentemperatur der in Frage kommenden Gehäuseteile zu bestimmen. Für diese Messung hat sich allgemein das rasch anzeigende, elektrische Thermometer durchgesetzt. Die Umgebungstemperaturen der Maschine werden mit den üblichen Flüssigkeitsthermometern gemessen.

Die Unsicherheiten bei der Berechnung der Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion sind gross; die angenommene Wärmeabgabezahl von $10\ldots 20 \text{ W/m}^2^{\circ}\text{C}$ kann ganz beträchtlich grösser werden, wenn im Maschinenraum eine erzwungene Luftströmung herrscht. Bezogen auf die Gesamtverluste der Maschine sind die Strahlungsverluste zwar von untergeordneter Bedeutung; trotzdem sind Vorschläge gemacht worden, um durch Aufbringen einer Wärmeisolation oder durch Aufheizen des Maschinenraums ihren Einfluss noch mehr zu verringern oder sie ganz zum Verschwinden zu bringen [6; 8].

Die Wärmeisolation aller strahlenden Flächen einer Grossmaschine ist nur mit beträchtlichem Aufwand möglich. Dieser übersteigt im allgemeinen die im Rahmen normaler Abnahmeversuche zur Verfügung stehenden personellen und finanziellen Mittel. Der zweite Vorschlag, während der Versuche die Maschinensaaltemperatur der Oberflächentemperatur der Maschine anzupassen, ist vor allem für die kalorimetrische Bestimmung der Einzelverluste interessant und auch praktisch durchführbar, wenn eine entsprechende Raumheizung zur Verfügung steht. Die Oberflächentemperaturen der Maschine lassen sich weniger gut verändern, da der Kühlflüssigkeitsstrom mit Rücksicht auf die anzustrebende Temperaturerhöhung des Kühler-Kühlmittels von mindestens 10°C nicht beliebig vergrössert werden kann.

4.5 Bestimmung des thermischen Beharrungszustandes

Kalorimetrische Verlustmessungen können nur dann mit genügender Genauigkeit durchgeführt werden, wenn der thermische Beharrungszustand praktisch erreicht ist. Der theoretische Einwand, dass Beharrung auch nach sehr langer Versuchsdauer nie erreicht werden kann, ist für praktische Versuche nicht stichhaltig. Der Grund liegt darin, dass die Bezugsgrössen des Versuches (Spannung, Strom, Leistung, Kühlflüssigkeits- und Raumtemperatur) nie absolut konstant sind. Die Beharrungstemperaturen werden nach der Erfahrung des Autors dann erreicht, wenn die einzelnen Messwerte um einen mittleren Endwert zu pendeln beginnen.

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten die Kriterien für die Konstanz der einzelnen Messgrössen während des Versuches aufgezeigt worden sind, lässt sich für den Beharrungszustand der Temperaturen folgendes feststellen (vgl. [8]):

a) Die Erwärmung des Kühler-Kühlmittels soll keine ausgesprochene Tendenz zum Ansteigen oder Absinken zeigen, sondern um

einen Endwert pendeln. Die Abweichungen von diesem Endwert sollen kleiner als $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$ sein.

b) Die mit Hilfe der eingebauten Widerstandselemente gemessenen Kühlluft-, Statorwicklungs- und Statoreisentemperaturen dürfen um höchstens $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ um ihre jeweiligen Endwerte pendeln.

c) Die Raumtemperatur in der Umgebung der Maschine soll um weniger als $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ variieren.

Der so festgelegte thermische Beharrungszustand soll während 2...3 h eingehalten werden, bevor mit den Verlustmessungen begonnen wird.

Will man diese Bedingungen einhalten, so ergeben sich Versuchsdauern von vielleicht 10...12 h für Versuche unter Last, für Einzelverlustmessungen im Kurzschluss oder bei auf Nennspannung erregter, leerlaufender Maschine. Die Versuchsdauer für die Ventilationsläufe mit leerlaufender, unerregter Maschine kann 24 h oder auch wesentlich mehr betragen.

4.6 Erreichbare Messgenauigkeit

Eine realistische Fehlerbeurteilung ist im Cigré-Bericht Nr. 119 [8] vorgenommen worden. Es werden dort ausser den direkten Messfehlern bei der Bestimmung des Kühlflüssigkeitsstromes, der Temperaturerhöhung des Kühler-Kühlmittels und der Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion auch jene Fehler erfasst, welche durch die Variation der Bezugsgrössen und durch die Unsicherheiten bei der Umrechnung gemessener Verluste auf andere Spannungen, Ströme oder Wicklungstemperaturen entstehen können.

Berücksichtigt man die in den vorangegangenen Abschnitten festgelegten Kriterien und Messfehler, so ergibt sich der resultierende Fehler bei der kalorimetrischen Verlustmessung an indirekt gekühlten Maschinen im Sekundärkreis aus nachfolgender Rechnung:

a) Messfehler bei der Bestimmung des Kühlflüssigkeitsstroms	$\pm 0,5 \%$
b) Messfehler bei der Bestimmung der Temperaturerhöhung des Kühler-Kühlmittels	$\pm 0,7 \%$
c) Fehler bei der Bestimmung der Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion	$\pm 0,5\ldots\pm 0,8 \%$
d) Korrekturf Fehler bei der Umrechnung gemessener Einzelverluste auf andere Spannungen, Ströme oder Temperaturen	$\pm 0,5\ldots\pm 1,0 \%$
e) Fehler infolge Variation der Bezugsgrössen; Nichterreichen des Beharrungszustandes	$\pm 1,0\ldots\pm 2,0 \%$
Resultierender mittlerer Fehler $\sqrt{\sum \Delta^2} =$	$\pm 1,5\ldots\pm 2,6 \%$

Die erreichbare Genauigkeit beträgt bei der praktischen Durchführung der kalorimetrischen Verlustmessung demnach $\pm 2\ldots\pm 3 \%$.

5. Durchgeführte Versuche und Ergebnisse

5.1 Direkte kalorimetrische Methode

Alle untersuchten Maschinen wiesen einen geschlossenen Luftkreislauf und indirekte Wasserkühlung auf, so dass die Anwendung der direkten Verlustmessung im Sekundärkreis gegeben war. Die Versuche fanden ausnahmslos im Kraftwerk statt.

5.1.1 Versuchsobjekte

Die von F. Aemmer beschriebenen kalorimetrischen Verlustmessungen an den Generatoren des Kraftwerks Birsfelden [5], welche ebenfalls von der Materialprüfanstalt des SEV durchgeführt worden sind, werden in diesem Aufsatz nicht mehr behandelt. Bei allen in Tabelle I aufgeführten Versuchsobjekten handelt es sich um Drehstrom-Synchrongeneratoren.

Tabelle I

Versuchs- objekt Nr.	Nenn- leistung kVA	Nenn- spannung kV	Leistungs- faktor $\cos \varphi$	Nenn- drehzahl U./min	Frequenz Hz
1	100 000	13,0	0,8	600	50
2	60 000	13,5	0,7	375	50
3	60 000	13,5	0,8	428	50
4	25 000	9,5	0,8	428	50
5	42 000	10,0	0,83	215	50
6	80 000	13,0	0,8	500	50

5.1.2 Vergleich zwischen den kalorimetrisch ermittelten Einzel- und Gesamtverlusten

Für die Ermittlung des Wirkungsgrades ist bei der Anwendung der kalorimetrischen Methode den direkt gemessenen Gesamtverlusten der Vorzug gegenüber der Summe der Einzelverluste zu geben. Sie entsprechen den bei Nennbetrieb der Maschine entstehenden Verlusten und werden deshalb als Basis für die folgenden Vergleiche eingesetzt.

Daneben ist aber auch die Kenntnis der Einzelverluste von grosser Bedeutung für Hersteller und Käufer von Grossmaschinen. Ausserdem kann man sich vorstellen, dass die Ermittlung der Gesamtverluste aus dem Vollastversuch aus praktischen Gründen nicht möglich ist, wenn z. B. die Neendaten der Maschine nicht über die dafür notwendige Zeit genügend konstant gehalten werden können. Damit ist man aber auf das Einzelverlust-Verfahren angewiesen und es interessiert deshalb auch, welche Übereinstimmung die Summe der Einzelverluste mit den direkt ermittelten Gesamtverlusten aufweist.

Die Unsicherheiten, die bei diesen Vergleichen stets bestehen, sind in der Arbeit von K. Bitter [6] ausführlich diskutiert worden. Da die im Leerlauf bestimmten Eisenverluste kleiner und die im Kurzschluss ermittelten Zusatzverluste grösser sind, als die bei Vollast und Neendaten tatsächlich auftretenden entsprechenden Verluste, kann man mit einiger Sicherheit annehmen, dass die Summe der Einzelverluste wieder den direkt gemessenen Gesamtverlusten entspricht.

Das kalorimetrische Einzelverlustverfahren umfasst normalerweise folgende drei Versuchsläufe:

- Dauerleerlauf bei Nennspannung;
- Dauerkurzschluss bei Nennstrom;
- Ventilationslauf leer unerregt.

Um die aus diesen drei Versuchen sich ergebenden Einzelverluste mit den Gesamtverlusten vergleichen zu können, müs-

sen die Einzelverluste auf die Versuchsbedingungen des Vollastversuchs umgerechnet werden. Bei dieser Umrechnung werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Eisenverluste sind unabhängig von der Belastung, sie werden quadratisch mit der Statorspannung umgerechnet.
- Die Summe der Lastverluste (Statorcupfer- und Zusatzverluste) ist unabhängig von der Wicklungstemperatur (nach CEI). Die Lastverluste werden quadratisch mit dem Statorstrom umgerechnet.
- Die Ventilationsverluste sind temperaturunabhängig.

Die ausserhalb der kalorimetrischen Messung liegenden Verluste wie z. B. die Verluste in Schleifringen, Erregern und Hilfsmaschinen werden für den Vergleich nicht berücksichtigt, da sie sowohl beim Gesamtverlust- wie beim Einzelverlustverfahren jeweils rechnerisch ermittelt und addiert werden müssten. Dagegen werden die ebenfalls kalorimetrisch ermittelten Lagerverluste einbezogen und zwar in beiden Fällen die bei Vollast auftretenden Lagerverluste.

Unter diesen Voraussetzungen gelangt man zu den Vergleichswerten der Tabelle II.

Ohne näher auf die zum Ziel recht verschiedenen Versuchsdauern oder Stabilitätsverhältnisse im Netz einzutreten, kann man der Tabelle II entnehmen, dass die Übereinstimmung der Summe der kalorimetrisch ermittelten Einzelverluste mit den direkt ermittelten Gesamtverlusten durchwegs innerhalb $\pm 2\%$ und damit auch innerhalb der im Abschnitt 4.6 errechneten Messgenauigkeit liegt.

Beim Versuchsobjekt Nr. 5 handelte es sich um einen Vertikalgenerator mit einem Traglager fremder Lieferung, dessen Verluste nicht in den Generatorwirkungsgrad eingehen. Aus diesem Grund wurde auf die kalorimetrische Ermittlung der Traglagerverluste verzichtet und der Vergleich ohne diesen Verlustanteil durchgeführt.

5.1.3 Vergleich mit der wattmetrischen Einzelverlustmessung

An den vier Versuchsobjekten Nr. 1...4 konnte ausser der kalorimetrischen Methode auch das konventionelle Einzelverlustverfahren angewendet werden, so dass sich weitere interessante Vergleichsmöglichkeiten bieten (Tab. III).

Vorerst sollen die kalorimetrisch ermittelten Einzelverluste mit den wattmetrisch bestimmten Einzelverlusten verglichen werden. Es gelten dabei folgende Voraussetzungen:

- Die totalen mechanischen Verluste inkl. Lager, Hilfsmaschinen und Schleifringe werden einerseits dem Leerlaufversuch als

Vergleich der Messergebnisse der kalorimetrischen Einzel- und Gesamtverlustmessungen

Tabelle II

		Versuchsobjekt					
		1	2	3	4	5	6
<i>Einzelverlustmessung:</i>							
Ventilationsverluste aus Versuchslauf c)	kW	344,3	146,8	203,6	90,3	95,0	320,1
Lagerverluste bei Vollast (kalorimetrisch)	kW	135,4	37,7	58,2	27,2	—	93,8
Eisenverluste aus Versuchslauf a)	kW	300,4	186,6	190,2	126,9	190,6	261,8
Lastverluste aus Versuchslauf b)	kW	384,8	296,4	333,6	170,2	274,1	361,2
Polradverluste bei Vollast (elektrisch)	kW	231,8	232,4	176,7	70,6	284,4	282,7
A. Summe der Einzelverluste	kW	1396,7	899,8	962,3	485,2	844,1	1319,6
<i>Gesamtverlustmessung</i>							
B. Gesamtverluste kalorimetrisch aus Vollastversuch	kW	1380,8	905,0	979,3	487,9	857,0	1318,3
Abweichung A von B	%	+1,15	—0,56	—1,74	—0,55	—1,50	+0,10

Versuchs- objekt Nr.	Mechanische Verluste			Eisenverluste			Lastverluste		
	kalori- metrisch kW	elek- trisch kW	Abwei- chungen %	kalori- metrisch kW	elek- trisch kW	Abwei- chungen %	kalori- metrisch kW	elek- trisch kW	Abwei- chungen %
1	—	—	—	272,5	277,5	—1,80	417,9	418,2	—0,07
2	189,0	198,0	—4,45	189,2	202,0	—6,34	307,9	312,9	—1,60
3	271,8	288,0	—5,62	181,7	195,0	—6,82	333,6	331,2	+0,72
4	127,1	136,0	—6,54	128,0	135,0	—5,18	172,4	172,5	±0
Abweichungen im Mittel:			—5,57	—5,03			—0,26		

Die Abweichungen beziehen sich auf die elektrisch bestimmten Einzelverlustwerte.

Synchronmotor bei $\cos \varphi = 1$ und Nenndrehzahl durch Extrapolation entnommen. Dieser wattmetrischen Messung stehen andererseits die kalorimetrisch ermittelten mechanischen Verluste aus dem Versuchslauf c) gegenüber, zu welchen die ausserhalb der Kalorimetrie liegenden, rechnerisch gefundenen mechanischen Verluste in Schleifringen und Hilfsmaschinen addiert werden.

2. Die Eisenverluste bezogen auf Nennspannung ergeben sich ebenfalls aus dem Leerlaufversuch als Synchronmotor. Verglichen werden sie mit den aus dem Versuchslauf a) resultierenden Eisenverlusten.

3. Die Lastverluste, deren Summe wiederum als unabhängig von der Wicklungstemperatur betrachtet werden, ergeben sich aus einem oder mehreren Auslaufversuchen im Kurzschluss. Sie beziehen sich auf den Statornennstrom und werden mit den aus dem Versuchslauf b) resultierenden Lastverlusten verglichen.

Die Kupferverluste im Polrad und in den Hilfsmaschinen werden bei der Wirkungsgradberechnung nach beiden Methoden entweder elektrisch gemessen oder berechnet und interessieren in unserem Fall nicht.

Die mechanischen Verluste des Versuchsobjektes Nr. 1 können nicht verglichen werden, da die Versuchsbedingungen durch das Entfernen des Leitapparates vor den Ventilatorflügeln zwischen den beiden Messungen wesentlich geändert haben.

Berücksichtigt man die prozentualen Anteile der drei Verlustgruppen an der für die Ermittlung des Wirkungsgrades bei Vollast und Nenndaten massgebenden Summe der Einzelverluste, so betragen die Abweichungen bezogen auf die Gesamtverluste im Mittel:

Mechanische Verluste	— 1,49 %
Eisenverluste	— 1,09 %
Lastverluste	— 0,09 %

Der grösste prozentuale Fehler ergibt sich bei der Ermittlung der mechanischen Verluste aus dem Ventilationslauf. Dazu ist zu bemerken, dass die bei diesem Versuch kalorimetrisch gemessenen Verluste den kleinsten Anteil an den Gesamtverlusten ausmachen und deshalb vor allem die Messfehler bei der Ermittlung der ausserhalb der Kalorimetrie liegenden Verlustanteile stärker ins Gewicht fallen als bei den andern Versuchsläufen.

Im Abschnitt 4 wurde erläutert, dass die Wärmeverluste durch Wärmeabgabe an der Maschinenwelle im allgemeinen als vernachlässigbar klein betrachtet werden. Diese Annahme lässt sich für die untersuchten Maschinen kaum mehr aufrechterhalten, handelte es sich doch in 3 von 4 Fällen um Maschinen mit Doppelpeltonturbinen, wobei die zwei Laufräder beidseits des Generators angeordnet waren. Die Wassertemperaturen lagen zum Teil unter 10 °C, so dass die Temperaturdifferenzen auf der Welle zwischen Lager und Turbinenlaufrad beträchtlich gross werden. Die Berechnung der durch die Welle abfliessenden oder an die Umgebung abgegebenen Wärmeleistung ist allerdings ohne Kenntnis der genauen Temperaturverteilung auf den in Frage kommenden Wellenabschnitt

ten kaum mit genügender Genauigkeit möglich. Zusätzliche Fehlerquellen ergeben sich bei den Ventilationsläufen aus der im allgemeinen zu kurz gewählten Versuchsdauer. Die Fehler, welche durch das Nichterreichen des thermischen Beharrungszustandes entstehen können, sind beträchtlich.

Die mittlere Abweichung der Summe der kalorimetrisch bestimmten Einzelverluste von der Summe der wattmetrisch und aus dem Auslaufverfahren gewonnenen Einzelverluste wird ca. —2,7 %. Da sich aus der Tabelle I eine mittlere Abweichung der Summe der kalorimetrisch bestimmten Einzelverluste von den kalorimetrisch ermittelten Gesamtverlusten von ca. —0,5 % ergibt, so kann man daraus schliessen, dass die kalorimetrisch ermittelten Gesamtverluste von der Summe der im konventionellen Verfahren ermittelten Einzelverluste um —2,2 % abweicht. Dieser Wert liegt immer noch innerhalb der Messgenauigkeit.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die direkte kalorimetrische Methode für die Bestimmung des Generatorwirkungsgrades von indirekt gekühlten Grossmaschinen bei sorgfältiger Durchführung der Messung durchaus geeignet ist. Die Messfehler werden kleiner, je grösser die zu bestimmenden Verluste sind; damit lässt sich auch begründen, dass die kalorimetrische Gesamtverlustmessung der kalorimetrischen Einzelverlustmessung in diesem Fall vorzuziehen ist.

5.2 Indirekte kalorimetrische Methode

Neben der in den vorangegangenen Abschnitten ausführlich diskutierten direkten kalorimetrischen Methode wird in der neuesten Ausgabe der französischen Maschinenregeln [4] auch die indirekte oder vergleichende kalorimetrische Methode zur Ermittlung der sog. internen und externen Verluste erläutert. Sie eignet sich vorzugsweise für Maschinen mit offenem Kühlluftkreislauf, ist aber mit gewissen Einschränkungen auch bei geschlossener Ventilation anwendbar.

Bei der indirekten kalorimetrischen Methode wird der Proportionalitätsfaktor zwischen der Erwärmung des Kühlmittels und den internen Verlusten, die durch dasselbe abgeführt werden, ermittelt. Es wird eine Serie von Eichversuchen im Leerlauf unter den gleichen Kühlmittelbedingungen durchgeführt, für welche man später bei Belastung die internen Verluste bestimmen will. Man findet so die sog. «droite de tarage» oder Eichgerade. Misst man dann bei Belastung die Kühllufterwärmung, so erhält man mit Hilfe der Eichgeraden direkt die internen Verluste, welche diesem Betriebszustand entsprechen.

Die Hauptschwierigkeit liegt darin, dass während den Eichversuchen und dem Lastversuch die Verteilung von Temperatur und Geschwindigkeit der in die Maschine eintretenden

Kühlluft sowie die Druckverhältnisse unverändert bleiben müssen. Die Überprüfung dieser Forderungen ist mit einem beträchtlichen messtechnischen Aufwand verbunden. Immerhin wird für Maschinen mit offenem Kühlkreislauf eine Korrekturformel angegeben, nach welcher die Messergebnisse den ändernden Versuchsbedingungen angepasst werden können.

Bei Maschinen mit geschlossenem Kühlkreislauf wird lediglich darauf hingewiesen, dass die Druckverluste im Kühler zu den internen Verlusten zu addieren seien. Da aber bei dieser Kühlungsart die Temperatur der aus dem Kühler austretenden Kaltluft nicht ohne weiteres konstant gehalten werden kann, bleibt der Zusammenhang zwischen den internen Verlusten und der Kühllufterwärmung unter Umständen nicht mehr linear. Ausserdem ist die Überprüfung von Druck und Geschwindigkeitsverteilung schwierig und demzufolge eine Korrektur der Messresultate praktisch nicht durchführbar. Bei Maschinen mit geschlossener Ventilation lässt sich deshalb die indirekte kalorimetrische Verlustmessung nur durchführen, wenn die Eichkurve durch Messungen bis in den Bereich der Vollastverluste ausgedehnt werden kann, so dass zur Ermittlung der internen Verluste bei Belastung keine Extrapolation nötig ist. Daneben ist aber auch darauf zu achten, dass die äusseren Versuchsbedingungen sowohl bei der Eichung als auch beim Belastungsversuch praktisch gleich bleiben. Die Versuche sollen deshalb zum Beispiel bei gleichen Lagertemperaturen und konstantem Kühlflüssigkeitsstrom in den Kühlern durchgeführt werden.

Die praktische Anwendung dieser Methode sei am Beispiel eines grossen Asynchronmotors mit geschlossenem Kühlkreislauf und indirekter Wasserkühlung erläutert.

Der Motor wird im Leerlauf bei verschiedenen Klemmenspannungen betrieben und nach Erreichen des thermischen Beharrungszustandes in jedem Messpunkt die vom Netz bezogene Wirkleistung wattmetrisch bestimmt. Gleichzeitig misst man die Erwärmung der Kühlluft am Ein- und Austritt des Kühlers. Die Statorspannung ist bis auf den höchstzulässigen Wert zu steigern, so dass die Leerlaufverluste praktisch den Wert der bei Vollast und Nennspannung auftretenden Gesamtverluste erreichen und eine Extrapolation vermieden werden kann. Die gemessenen Totalverluste werden in Funktion der Kühllufterwärmung graphisch dargestellt (Fig. 1).

Durch Extrapolation der Eichkurve bis zum Schnittpunkt mit der Ordinatenachse erhält man die ausserhalb des Kühlkreislaufes liegenden Verluste (externe Verluste) wie Lagerreibung, Verluste durch Strahlung und Konvektion etc. Die Aufteilung der internen Verluste erfolgt nach Fig. 1. Der

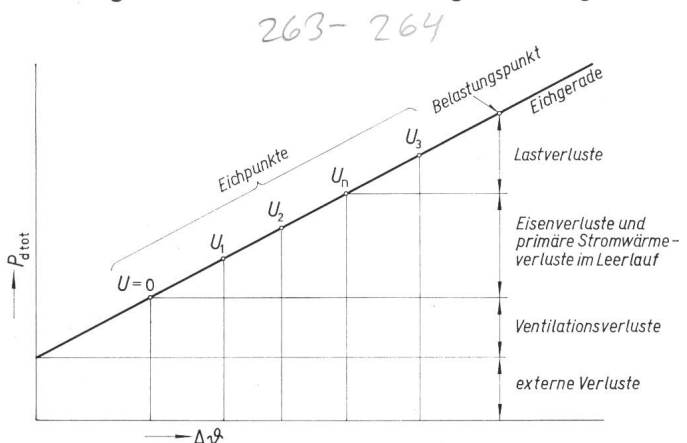


Fig. 1
Totalverluste $P_{d \text{ tot}}$ in Funktion der Kühllufterwärmung $\Delta\theta$

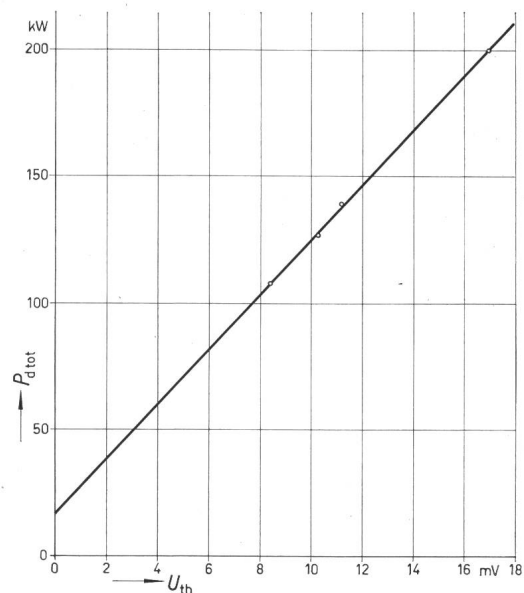


Fig. 2
Totalverluste $P_{d \text{ tot}}$ in Funktion der Thermospannung U_{th} (Eichkurve)

Eichpunkt für $U = 0$ wird durch Extrapolation aus der Kurve $P_d = f(U)$ gewonnen.

Nachdem die Eichung vorliegt, können in beliebigen Lastpunkten die Kühllufterwärmungen gemessen und die zugehörigen Verluste der Maschine aus der Eichkurve bestimmt werden. In diesem Anwendungsfall ergibt sich mit der indirekten Methode die Möglichkeit, die Zusatzverluste bei Last zu ermitteln, nachdem alle übrigen Verlustanteile bekannt oder aus den Versuchsdaten berechenbar sind. Auf einige messtechnische Einzelheiten soll im Abschnitt 5.2.2 noch kurz eingetreten werden.

5.2.1 Versuchsobjekt

Das Versuchsobjekt war ein Drehstrom-Asynchronmotor mit Schleifringanker mit folgenden Daten: 10 000 V, 246 A, 50 Hz, 2980...2400 U./min, 3680 kW dauernd, 4400 kW während max. 1 h, geschlossene Bauart mit 4 Wasser-Luftkühlern, Lager mit separater Ölkühlung, Schleifringe mit Fremdventilation.

5.2.2 Messergebnisse

Die Erwärmung der Kühlluft an den 4 Kühlern wurde mit 4 Thermosäulen von je 2×18 Thermoelementen gemessen, wobei die Elemente gleichmässig über die Kühlerfläche verteilt waren. Nachdem man die gleichmässige Verteilung der Kühlluft auf die 4 Kühlerelemente unabhängig vom Belastungszustand voraussetzen darf, wurde der Mittelwert der 4 gemessenen Thermospannungen gebildet und als repräsentativ für die Erwärmung der Kühlluft betrachtet, da die Eichkurven der Thermoelemente im in Frage kommenden Temperaturbereich linear verlaufen.

Die vom Motor aufgenommene Leistung wurde wattmetrisch gemessen und zur Kontrolle die ausserhalb des Kühlkreislaufes abgeführten Lagerverluste kalorimetrisch bestimmt. Für alle Versuche wurde auf gleiche Lagertemperaturen geachtet.

Der Kühlflüssigkeitsstrom im Sekundärkreis blieb sowohl für die Eichung wie für die Lastversuche konstant, was eine steigende Kaltlufttemperatur mit zunehmender Verlustleistung zur Folge hatte. Die Eichkurve war deshalb in ihrem oberen Teil nicht mehr linear, doch wurde die Leerlaufspannung bei der Eichung derart erhöht, dass die im Leerlauf auf-

treten den Verluste die Gesamtverluste bei den Belastungsversuchen überstiegen und eine Extrapolation der Eichkurve im nichtlinearen Teil vermieden werden konnte.

Die Resultate der Eichversuche bei leerlaufendem Motor sind in Tabelle IV zusammengestellt; die Eichkurve ist in Fig. 2 aufgetragen.

Messergebnisse der Eichversuche bei leerlaufendem Motor

Tabelle IV

Statorspannung V	Totale aufgenommene Leistung kW	Kühlluft- Eintritts- temperatur °C	Mittlere Spannung der Thermo- säulen an den Kühlern mV
4 000	108	20,0	8,44
10 000	127	21,5	10,18
11 000	139	22,2	11,19
12 600	200	27,5	17,01

Extrapoliert man die in Funktion der Spannung aufgenommenen totalen Leerverluste auf die Spannung von 0 V, so ergeben sich die mechanischen Verluste inkl. Lager und Schleifringe zu 105 kW. Trägt man diesen Punkt in die Eichkurve ein, so lassen sich den Eichversuchen folgende charakteristische Werte entnehmen:

Externe Verluste 16 kW
Ventilationsverluste 105 — 16 = 89 kW
Eisenverluste bei U_n 22 — 2 = 20 kW

Dabei sind die während dem Leerlaufversuch aufgetretenen Kupferverluste mit 2 kW berücksichtigt worden.

Die Belastungsversuche zur Ermittlung der Zusatzverluste ergaben im Beharrungszustand die in Tabelle V enthaltenen Messwerte.

Messergebnisse der Belastungsversuche

Tabelle V

		Versuch 1	Versuch 2
Statorspannung	V	10 050	10 000
Statorstrom	A	140	182
Aufgenommene Leistung	kW	2 135	2 820
Schlupf	%	0,37	0,50
Statorkupfertemperatur	°C	55	61
Kühllufteintrittstemperatur	°C	26	29
Mittlere Spannung der Thermo- säulen an den Kühlern	mV	11,70	13,02
Totale Verluste aus der Eichkurve	kW	143,5	158,0

Ermittelt man alle aus den Versuchsdaten bekannten oder berechenbaren Verluste — in diesem Fall nach den Regeln für elektrische Maschinen des SEV [3] — so erhält man die in Tabelle VI zusammengestellten Werte.

Zusammenstellung der direkt messbaren oder berechenbaren Verluste

Tabelle VI

		Versuch 1	Versuch 2
Ventilationsverluste	kW	89,0	89,0
Eisenverluste	kW	20,2	20,0
Primäre und sekundäre Kupfer- verluste	kW	13,6	24,9
Externe Verluste	kW	16,0	16,0
Summe der bekannten Einzel- verluste	kW	138,8	149,9

Die Zusatzverluste erhält man als Differenz zwischen den totalen Verlusten und der Summe der bekannten Einzelverluste.

Aus Versuch 1: $P_{sp} = 4,7$ kW für $I_1 = 140$ A
Aus Versuch 2: $P_{sp} = 8,1$ kW für $I_1 = 182$ A

Die quadratische Umrechnung dieser Verlustwerte auf den Nennstrom 246 A ergibt im Mittel Zusatzverluste von 14,6 kW oder 0,40 % der abgegebenen Nennleistung. Nach den Schweizerischen Maschinenregeln werden bei der Berechnung des Wirkungsgrades von Asynchronmaschinen die Zusatzverluste zu 0,5 % der abgegebenen Leistung angenommen.

6. Interessante Nebenresultate

Im Zusammenhang mit den Vergleichsversuchen nach der kalorimetrischen Methode und der konventionellen Einzelverlustmethode ergaben sich Probleme, welche die Genauigkeit der Methoden und die Zweckmässigkeit der getroffenen Annahmen für die Vergleiche betreffen. So wurde zum Beispiel vorausgesetzt, dass die im Leerlauf gegenüber Vollast zu klein gemessenen Eisenverluste durch die im Kurzschluss gegenüber Vollast zu gross gemessenen Zusatzverluste bei der Summierung kompensiert würden. Über die Temperaturabhängigkeit der Zusatzverluste ist damit allerdings noch nichts ausgesagt. Die momentan gültigen Maschinenregeln des SEV berücksichtigen diese Abhängigkeit noch nicht, während die entsprechenden Empfehlungen der CEI die Summe der Lastverluste als unabhängig von der Temperatur festlegen.

In ähnlicher Weise gibt die Temperaturabhängigkeit der Ventilationsverluste immer wieder Anlass zu Diskussionen, da diese Verluste beim Leerlaufversuch bei wesentlich tieferen Kühlmitteltemperaturen bestimmt werden, als sie bei Vollast tatsächlich auftreten.

Über einige Versuche, die im Zusammenhang mit diesen Problemen durchgeführt wurden, sei im folgenden kurz berichtet.

6.1 Temperaturabhängigkeit der Zusatzverluste

Durch eine Serie von Auslaufversuchen im Kurzschluss bei verschiedenen Statorkupfertemperaturen am Versuchsobjekt Nr. 2 der Tabelle I konnten die zugehörigen Lastverluste (Statorkupfer- plus Zusatzverluste) ermittelt werden.

Der quadratische Verlauf der Lastverluste in Funktion des Statorstromes bestätigt sich, und deren Summe erwies sich, bezogen auf Statornennstrom, als praktisch temperaturunabhängig. Die Abweichung vom Mittelwert beträgt nach Tabelle VII ± 1 % und liegt damit sicher innerhalb der Auswertegenauigkeit der Auslaufversuche.

Messergebnisse der Auslaufversuche im Kurzschluss

Tabelle VII

Statorkupfertemperatur °C	36	41,5	61	63,5	64,5
Statorstrom A	2570	1975	1340	1940	2570
Lastverluste kW	315,8	185,7	84,2	178,4	312,9
Lastverluste bezogen auf I_n kW	315,8	314,4	310,0	313,1	312,9

Stellt man die nach den Schweizerischen Maschinenregeln ermittelten Lastversuche für die Bezugstemperatur den nach den Empfehlungen der CEI temperaturunabhängigen Last-

verlusten gegenüber, so ergibt sich unter Benützung des Messwertes für eine mittlere Wicklungstemperatur von 36 °C:

Lastverluste nach SEV	335,2 kW
Lastverluste nach CEI	315,8 kW
Abweichung	6,1 %

Die mittlere Wicklungstemperatur von 36 °C ergibt die grösste Differenz, entspricht aber durchaus den bei Abnahmeversuchen üblichen Werten.

6.2 Temperaturabhängigkeit der Ventilationsverluste

In allen gültigen Regeln für elektrische Maschinen werden für die Wirkungsgradberechnung die im Leerlauf gemessenen Ventilationsverluste ohne Berücksichtigung ihrer Temperaturabhängigkeit eingesetzt. Im Verlauf der Abnahmeversuche am Versuchsobjekt Nr. 3 der Tabelle I wurde festgestellt, dass diese Berechnungsweise beträchtliche Abweichungen zur Folge hat, wenn die Resultate von Versuchen bei verschiedenen mittleren Kühllufttemperaturen miteinander verglichen werden sollten. Es war deshalb naheliegend, die Temperaturabhängigkeit der Ventilationsverluste näher zu untersuchen.

Die Ventilationsverluste rotierender Maschinen sind unter der Annahme konstanter Kühlmittelgeschwindigkeit im wesentlichen proportional zur Dichte ρ des Kühlmittels. Im weiteren darf man voraussetzen, dass das in einem geschlossenen Kühlkreislauf umgesetzte Gasgewicht und damit auch dessen Masse konstant sind. Ausserdem sind im Anwendungsgebiet der elektrischen Maschinen, d. h. bei statischen Drücken unter 10 kg/cm² und Temperaturen unter 100 °C, die Kühlmittel als ideale Gase zu betrachten. Unter diesen Voraussetzungen lässt sich aus der allgemeinen Zustandsgleichung der idealen Gase bezogen auf 1 kmol folgende Beziehung für das Kühlmittel Luft herleiten:

$$\rho_L = 0,464 \frac{p}{T}$$

worin

- ρ_L die Dichte der Kühlluft in kg/m³
- p der statische Luftdruck in mmHg (Torr) und
- T die absolute Temperatur der Kühlluft in °K

Für die betrachteten Versuche kann zudem der statische Luftdruck p als konstant angenommen werden, so dass sich die Luftdichte ρ_L und damit die Ventilationsverluste umgekehrt proportional zur absoluten Kühllufttemperatur T ändern.

Zur Bestätigung dieser Abhängigkeit wurden 10 Auslaufversuche zur Ermittlung der Ventilationsverluste bei 3 verschiedenen Kühllufttemperaturen durchgeführt. Die Messung der Auslaufkurven erfolgte mit Hilfe eines elektronischen Drehzahlmessgerätes hoher Genauigkeit, während die im Verlauf der Versuche aufgetretenen Lagerverluste kalorimetrisch ermittelt werden konnten, und bei allen Versuchen unverändert blieben. Zwei Auslaufversuche mit und ohne aufgesetzte Kohlebürsten auf Schleifringen und Kollektoren ermöglichten zusammen mit der Lagerverlustmessung die Trennung der Ventilationsverluste von den totalen mechanischen Verlusten. Als Kühllufttemperatur wurde der Mittelwert der mit Hilfe von Widerstandselementen gemessenen Kalt- und Warmlufttemperaturen eingesetzt. Die Messergebnisse sind in Tabelle VIII zusammengestellt.

Messergebnisse der Auslaufversuche zur Ermittlung der Ventilationsverluste

Tabelle VIII

Mittlere Kühllufttemperatur Ventilationsverluste	°C kW	10 224,0	26 209,6	38 199,3
---	----------	-------------	-------------	-------------

Diese Messwerte bestätigen die theoretisch zu erwartende Temperaturabhängigkeit der Ventilationsverluste, wobei die Abweichungen innerhalb der Mess- und Auswertegenauigkeit der Auslaufversuche liegen. Trotzdem eine Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Ventilationsversuche in den Maschinenregeln in nächster Zeit nicht zu erwarten ist, ergibt sich aus den Resultaten der beschriebenen Untersuchungen doch die Forderung, dass bei allen Verlustmessungen an rotierenden elektrischen Maschinen die mittlere Kühllufttemperatur als wichtige Bezugsgrösse anzugeben ist.

7. Schlussbemerkungen

Die kalorimetrische Methode zur Ermittlung des Wirkungsgrades von Grossmaschinen ist bei sorgfältiger Ausführung der Messung dem konventionellen Einzelverlustverfahren ebenbürtig, trifft sie doch vor allem beim Vollastversuch die tatsächlichen Verhältnisse besser und kommt auch mit weniger Annahmen aus. Sie ermöglicht ausserdem Untersuchungen, die mit der Verlustmessung im Leerlauf oder mit dem Auslaufverfahren nicht durchführbar sind. Als Beispiel sei die Untersuchung der Abhängigkeit der Zusatzverluste vom Leistungsfaktor angeführt. Auch können die Lagerverluste praktisch nur kalorimetrisch genügend genau bestimmt werden. Daneben eignet sich die kalorimetrische Methode aber auch zur Bestimmung der Einzelverluste, deren Summe mit den kalorimetrisch gemessenen Gesamtverlusten gut übereinstimmt. Allerdings ist die Zahl der von der Materialprüfanstalt des SEV ausgemessenen Versuchsobjekte noch zu klein, um definitive Vergleichswerte mit andern Messmethoden zu erhalten. Es ist deshalb unbedingt erforderlich, weitere Erfahrungen auf diesem Gebiet zu sammeln und auch die Messtechnik zu verfeinern.

Literatur

- [1] Test Code for Synchronous Machines. AIEE-Standard No. 503, June 1945.
- [2] Regeln für elektrische Maschinen. VDE-Vorschrift Nr. 0530a/3.59.
- [3] Regeln für elektrische Maschinen. Publikation 3009 des SEV, Zürich 1962.
- [4] Machines électriques tournantes. Norme française C51-100, 1965.
- [5] F. Aemmer: Über die Bestimmung der Verluste von elektrischen Generatoren nach der kalorimetrischen Methode. Bull. SEV 50(1959)24, S. 1165...1170.
- [6] K. Bitter: Die Wirkungsgradmessung nach dem Kalorimeter-Verfahren und die Anwendung desselben bei den Generatoren des Kraftwerks Ybbs-Persenbeug. Elin-Z. 12(1960)2, S. 71...80.
- [7] W. Liebe und W. Boldin: Die kalorimetrischen Verfahren zur Bestimmung des Wirkungsgrades von Grossmaschinen. Siemens Z. 35(1961)3, S. 166...172.
- [8] H. de Bourg et al: Détermination calorimétrique des pertes des alternateurs et des réactances. CIGRE-Rapport N° 119, 1964.

Adresse des Autors:

A. Christen, dipl. Ingenieur, Chef der Gruppe für auswärtige Messungen, Materialprüfanstalt des SEV, Seefeldstrasse 301, 8008 Zürich.