

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 50 (1959)
Heft: 24

Artikel: Über die Bestimmung der Verluste von elektrischen Generatoren nach der kalorimetrischen Methode
Autor: Aemmer, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059490>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 03.04.2025

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)

Über die Bestimmung der Verluste von elektrischen Generatoren nach der kalorimetrischen Methode

Von F. Aemmer, Birsfelden

621.313.322-82 : 621.317.384.082.63

An den Generatoren des Schirmtyps, wie sie bei grossen Flusskraftwerken heute vorwiegend zur Anwendung kommen, ist die Messung der Verluste nach einer der konventionellen Methoden nicht durchführbar. In solchen Fällen leistet die kalorimetrische Methode wertvolle Dienste. Auf Grund von Messungen, die an Generatoren des Kraftwerks Birsfelden durchgeführt wurden, wird über die praktische Anwendung dieser Messmethode und über die erzielten Ergebnisse berichtet.

La mesure des pertes selon l'une des méthodes conventionnelles n'est guère possible pour les alternateurs du type parapluie, qui sont généralement installés dans les grandes usines hydroélectriques au fil de l'eau. Dans ces cas, la méthode calorimétrique rend de précieux services. En se basant sur des mesures effectuées à des alternateurs de l'usine de Birsfelden, l'auteur donne des renseignements sur l'application pratique de cette méthode et sur les résultats obtenus.

A. Allgemeines

Beim Vergleich von Konkurrenzofferten als Grundlage der Vergabe von Lieferaufträgen für Maschinen kommt neben Preis, Gewicht, Liefertermin, Zahlungsbedingungen und dergleichen auch den Verlustwerten, die von den konkurrierenden Firmen für ihre Lieferungen in Aussicht gestellt werden, entscheidende Bedeutung zu. Sehr oft ist der Besteller bereit, für die Lieferung einer Maschine einen gegenüber dem Konkurrenzangebot erhöhten Preis in Kauf zu nehmen, falls diesem Mehrpreis entsprechend kleinere Verluste, bzw. entsprechend erhöhte Wirkungsgrade gegenüberstehen. Bei Maschinen, die in einem Kraftwerk eingebaut sind, wirken sich diese verkleinerten Verluste dahin aus, dass eine entsprechend vergrösserte Energiemenge für den Verkauf zur Verfügung steht, währenddem bei Maschinen, die von einem Energiebezüger benützt werden, die Kosten für dessen Energieankauf eine entsprechende Verminderung erfahren. Der Mehrpreis, der für eine Verlustverkleinerung aufgewendet werden kann, entspricht in der Regel dem kapitalisierten Wert der jährlich erzeugbaren Mehrlieferung, bzw. der jährlich erzielbaren Einsparung an Fremdenergie-Ankauf, wobei bei der Festsetzung des Kapitalisierungssatzes der voraussichtlichen Lebensdauer der anzuschaffenden Maschine, d. h. der Dauer der Verlusteinsparung, Rechnung zu tragen ist.

Diese Bewertungen der Verlust-Differenzen von Konkurrenzofferten können bei grossen Maschinen sehr beträchtliche Geldbeträge erreichen. Der Besteller wird deshalb alle Anstrengungen unternehmen, um zu bewirken, dass die im Angebot angegebenen Verlustwerte bei der Lieferung tatsächlich auch eingehalten und nicht etwa überschritten werden. Dies erfolgt dadurch, dass die Verlustwerte im Pflichtenheft der Lieferung als Garantiewerte verankert und in der Regel für deren Überschrei-

zung entsprechende Abzüge am Lieferpreis der Maschine vereinbart werden. Sehr oft erklärt sich der Besteller auch bereit, bei einer grösseren Unterschreitung der garantierten Verlustwerte der Lieferfirma eine Prämie auszurichten. Es ist deshalb nicht ausreichend, die garantierten Verlustwerte im Pflichtenheft festzuhalten, sondern es muss auch deren Einhaltung durch entsprechende Abnahmeversuche am Lieferobjekt geprüft werden. Auch Maschinen-Konstrukteure haben an der Durchführung sorgfältiger Abnahmeversuche grosses Interesse, geben sie ihnen doch Gelegenheit, die Richtigkeit der von ihnen durchgeführten Berechnungen nachzuprüfen. Sehr oft veranlassen die Ergebnisse der Abnahme-Versuche Konstruktionsänderungen bei späteren Lieferungen ähnlicher Maschinen.

Bei Transformatoren ist die Messung der garantierten Verlustwerte im Versuchslokal der Lieferfirma durch Vornahme eines Leerlauf- und eines Kurzschlussversuches mit verhältnismässig kleinem messtechnischen Aufwand leicht möglich. Auch bei Generatoren und Motoren ist dies, allerdings mit vergrössertem Aufwand, durchführbar, sofern diese Maschinen in der Werkstätte der Lieferfirma mit der zugehörigen Lagerung oder allfällig auch mit behelfsmässiger Lagerung soweit zusammengebaut werden, dass sie zur Vornahme von Messungen in Drehung versetzt werden können, wobei unter Umständen auch eine aufgebaute Erregermaschine als geeichter Antriebsmotor für den Versuchsbetrieb benützt werden kann. Die Bestimmung der Leerverluste erfolgt dabei je nach den vorliegenden Verhältnissen durch Messung im Leerlauf als Motor, durch Messung im Auslauf, oder durch Messung mit geeichtem Hilfsmotor (Erregermaschine). Zur Bestimmung der Lastverluste kommen bei grossen Synchron-Maschinen in erster Linie die Messung im Auslauf oder die Messung mit geeichtem Hilfsmotor

in Frage. In allen Fällen ist der Erregerstrom für die Versuche durch eine separate Gleichstrom-Maschine zu liefern, und die Erregungsverluste werden aus dem Strom in der Erregerwicklung und aus der Spannung an den Erregerschleifringen berechnet. Bezüglich der Einzelheiten sei auf die «Regeln für elektrische Maschinen», Publikation Nr. 188 des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) verwiesen.

Vollständig anders liegen die Verhältnisse bei den grossen vertikalachsigen Synchron-Generatoren, angetrieben durch Kaplan-turbinen, wie sie heute bei grossen Flusskraftwerken allgemein Verwendung finden und auch beim Kraftwerk Birsfelden zum Einbau kamen. Infolge der grossen Abmessungen — der Rotordurchmesser der Generatoren Birsfelden z. B. beträgt 11,25 m und das Rotorgewicht 250 t — kommt bei solchen Maschinen ein Zusammenbau der Rotoren in der Werkstätte der Lieferfirma nicht in Frage. Die Rotoren solcher Grossgeneratoren werden vielmehr als Kettenläufer an Ort und Stelle, d. h. unter dem Kran des Maschinenhauses, aus einer Vielzahl einzelner Blechsegmente aufgebaut und auf den Rotorstern warm aufgezogen. Der Rotorstern wiederum wird auf die der Turbine und dem Generator gemeinsame Welle warm aufgezogen, und nach vollständigem Zusammenbau bilden Turbine und Generator ein einheitliches Ganzes, mit je einem Führungslager oberhalb des Turbinenlaufrades und unterhalb des Generator-Rotors. Auch das Spurlager, das auf dem Turbinendeckel angeordnet ist und ein Gewicht von 640 t zuzüglich einer Wasserauflast von max. 260 t zu tragen hat, ist beiden Maschinen gemeinsam.

Es wäre nun denkbar, eine solche Maschinengruppe bei entleerter Turbinenspirale in Drehung zu versetzen, wie dies bei leichteren Maschinen schon durchgeführt wurde. Dabei wäre der Generator als fremderregter Synchronmotor durch Speisung von einer benachbarten, ebenfalls fremderregten Maschinengruppe vom Stillstand aus hochzufahren, um danach durch Messungen im Auslauf die Leerverluste und die Lastverluste zu bestimmen. Es ist aber unwahrscheinlich, dass ein solcher Hochfahrversuch gelingen wird, da das verfügbare Drehmoment kaum dazu ausreichen wird, die Reibung der Ruhe, die bis zur vollständigen Bildung des Ölfilmes im Spurlager ganz beträchtlich ist, zu überwinden. Aber auch, falls ein Hochfahren der Maschine gelingen würde, wäre es unmöglich, die Ventilationsverluste des Generators von den Ventilationsverlusten des in Luft mitdrehenden Kaplan-Laufrades zu trennen, und im weiteren wären auch geeignete Massnahmen zu treffen, um eine übermässige Erwärmung des in Luft drehenden und nicht durch Wasser gekühlten Turbinenlaufrades zu vermeiden. Eine Demontage der Kaplanschaufeln zur Vermeidung dieser unbekanntenen Ventilationsverluste kommt aber nicht in Frage, da hierfür ein Montageaufwand von mehreren Monaten erforderlich wäre.

Es ist somit festzustellen, dass bei Generatoren dieses Typs die Vornahme von Verlustmessungen nach einer der oben angeführten konventionellen Methoden weder in der Werkstätte der Konstruktionsfirma noch im Kraftwerk nach durchgeführter

Fertigmontage praktisch durchführbar ist. Man hat deshalb unseres Wissens bei allen Generatoren dieses Typs auf Abnahmemessungen zur Bestimmung der Leer- und Lastverluste verzichtet und sich auf die Nachkontrolle der Garantiewerte für die Erregungsverluste und Erwärmungen, sowie auf die Aufnahme der Leerlauf- und Kurzschluss-Charakteristiken beschränkt. In einzelnen Fällen haben die Besteller, in Ermangelung einer andern Möglichkeit, lediglich eine rechnerische Nachkontrolle der garantierten Verlustwerte auf Grund der charakteristischen Dimensionen der Maschine und der gemessenen Verlustwerte der einzelnen Eisenlieferungen durchgeführt.

Es besteht nun aber, ausser den vorstehend aufgeführten Messmethoden, eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Verluste bzw. des Wirkungsgrades, nämlich die *kalorimetrische Methode*, die sich darauf stützt, dass alle in einer Maschine auftretenden Verlustenergien in Wärme umgeformt werden, dass also die Verlustenergie durch Messung der durch sie erzeugten Wärmemenge ermittelt werden kann. Diese Messmethode ist in der Publ. Nr. 188 des SEV ebenfalls beschrieben, mit der Beurteilung, dass sie umständlich sei und grossen messtechnischen Aufwand erfordere. Diese Beurteilung trifft zweifellos zu für Maschinen mit offenem Kühlsystem, da die Bestimmung der durch die Kühlluft wegtransportierten Verlustwärme eine nicht einfache messtechnische Aufgabe darstellt. Generatoren des betrachteten Typs und grosse Synchrongeneratoren im allgemeinen werden aber heute in überwiegender Mehrzahl mit geschlossenem Kühlsystem ausgeführt, wobei die Kühlung der im Kreislauf zirkulierenden Luft durch an zweckmässiger Stelle eingebaute Wasserkühler erfolgt. Die Verlustwärme wird somit schlussendlich, abgesehen von einem kleinen Wärmeübergang vom Maschinengehäuse an die umgebende Raumluft, durch das Kühlwasser abgeführt, und sie lässt sich durch Bestimmung der Kühlwassermenge und der Temperaturdifferenz zwischen Kühlwasser-Austritt und -Eintritt verhältnismässig einfach und genau bestimmen. Diese Verhältnisse veranlassten die Kraftwerk Birsfelden AG, an drei Generatoren des Kraftwerkes Birsfelden umfangreiche kalorimetrische Verlustmessungen durch die Technischen Prüfanstalten des SEV vornehmen zu lassen, wobei sowohl die Einzelverluste als auch die Totalverluste für gewisse Belastungsverhältnisse ermittelt wurden. Der Vergleich des gemessenen Totalverlustes mit der auf dieselbe Belastung umgerechneten Summe der gemessenen Einzelverluste erlaubt interessante Rückschlüsse auf die unter praktischen Verhältnissen erzielbare Genauigkeit dieser Methode. Das Ergebnis ist ausserordentlich ermutigend, denn es hat gezeigt, dass bei Maschinen des vorliegenden Typs kalorimetrische Verlustmessungen mit einem mässigen Zeit-, Personal- und Apparate-Aufwand durchführbar sind, wobei die Genauigkeit der Ergebnisse kaum hinter derjenigen der eingangs aufgeführten üblichen Messmethoden (die bei diesem Maschinentyp gar nicht anwendbar sind) zurückbleiben dürfte. So war es möglich, innerhalb einer zusammenhängenden Zeitspanne von ca. 100 h an einer Maschinengruppe insgesamt 8 Messungen, und zwar 4 Messungen von

Einzelverlusten und 4 von Totalverlusten, durchzuführen, wobei der Hauptanteil des Zeitaufwandes auf das Abwarten des Beharrungszustandes der Temperaturverhältnisse entfiel. Bei den Messungen der Totalverluste stand die Maschine jeweils im regulären Netzbetrieb, und nur während der Messungen der Einzelverluste musste auf deren betriebsmässigen Einsatz verzichtet werden. Der zusätzliche Personalaufwand bestand lediglich aus dem Versuchs-Ingenieur und einem Assistenten, jeweils für die kurze Zeit von ca. 3 h pro Messung, anschliessend an den Betrieb mit konstanten Belastungsverhältnissen, der jeweils ca. 7 h dauerte bis zum Erreichen konstanter Temperaturen. Beim betriebsmässigen Einsatz vorgängig der Messung der Totalverluste verschiedener Belastungspunkte wurden gleichzeitig noch die Messungen zur Prüfung der Erwärmungsgarantien durchgeführt.

Diese kalorischen Messungen und deren Ergebnis sind im nachfolgenden kurz beschrieben.

B. Die Messungen an den Generatoren des Kraftwerkes Birsfelden

1. Die charakteristischen Daten der Generatoren

Bei den Generatoren Fig. 1 handelt es sich um einen Schirmtyp mit einem einzigen Führungslager unterhalb des Polrades, mit einer Drehzahl von

Die Kühlung der im Kreislauf zirkulierenden Kühlluft erfolgt durch 12 aussen am Stator aufgesetzte Röhrenkühler, deren Rohre vom Kühlwasser, das dem Rhein entnommen wird, durchströmt sind. Die umgewälzte Kühlluftmenge beträgt ca. $34 \text{ m}^3/\text{s}$, der Kühlwasserbedarf ca. 48 l/s bei einer Kühlwassertemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Das im Kühllufttraum des Generators liegende Führungslager besitzt keine eigene Wasserkühlung. Es gibt somit seine Wärme, gleich wie die Verlustwärme des Generators, über die Generatorluft an das Generatorkühlwasser ab. Der über dem Generator-Polrad eingebaute Hilfs-generator von 600 kVA für $380/220 \text{ V}$ ist mit Frischluft ventiliert, die er vom Maschinensaal ansaugt und wieder dahin ausstösst. Er beeinflusst somit den Wärmehaushalt des Hauptgenerators nicht.

Bei dieser konstruktiven Anordnung werden alle im Hauptgenerator entstehenden Verluste, einschliesslich die Verluste in dem unter dem Polrad angeordneten Führungslager, im wesentlichen durch das Kühlwasser abgeführt. Einzig durch den Generatormantel, der eine wirksame Oberfläche von ca. 140 m^2 aufweist, treten noch zusätzliche Wärmeübergänge durch Strahlung nach dem Maschinensaal auf. Diese wurden rechnerisch ermittelt und bei der Bestimmung der Maschinenverluste berücksichtigt. Ihr Anteil ist unbedeutend gegenüber den durch das Kühlwasser abgeführten Verlusten, so dass auch eine

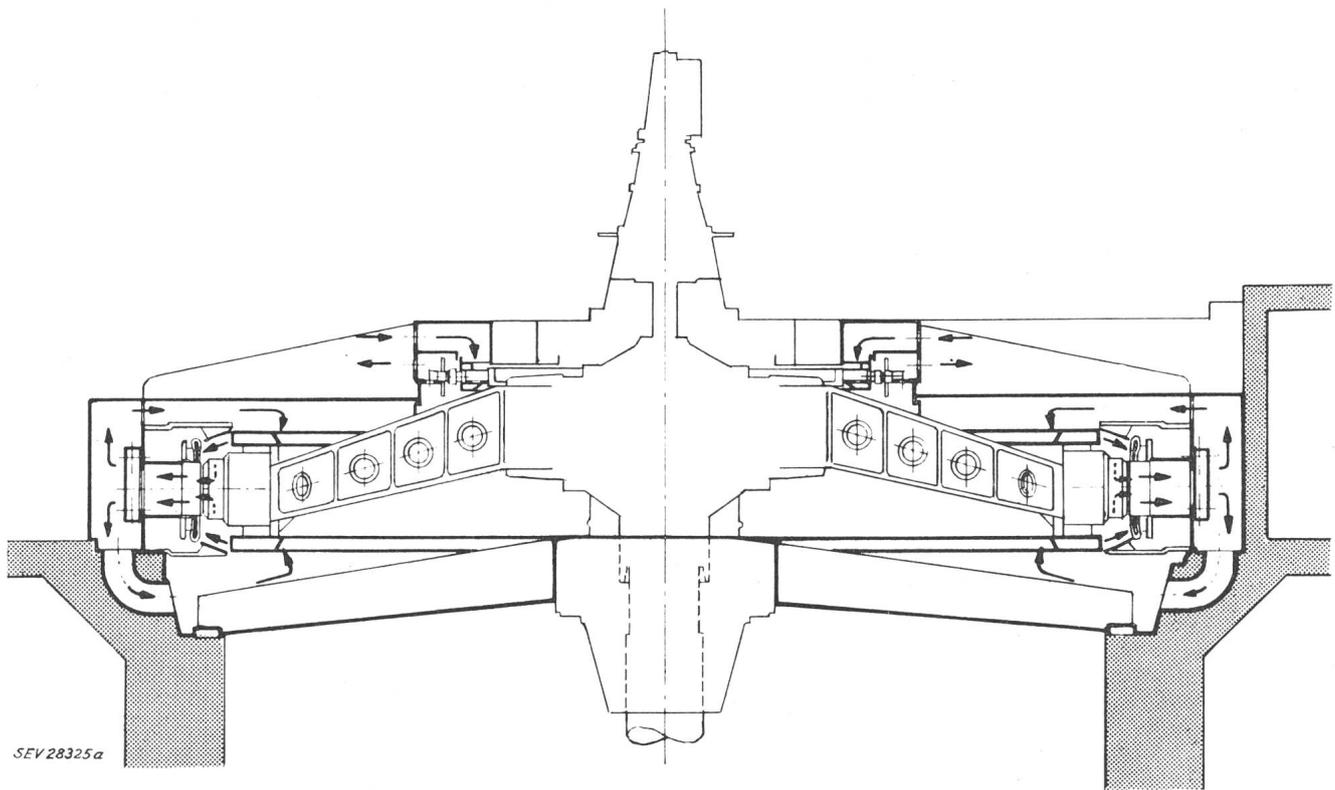


Fig. 1
Typenzeichnung eines Generators des Kraftwerkes Birsfelden

$68,2/\text{min}$. Die Generatorleistung beträgt $28\,600 \text{ kVA}$ bei allen Spannungen zwischen 6600 und 7260 V und bei allen Leistungsfaktoren zwischen $0,5$ und 1 . Die Wirkleistung ist durch die antreibende Turbine auf $22\,000 \text{ kW}$ begrenzt. Der Rotordurchmesser beläuft sich auf $11,2 \text{ m}$, das Rotorgewicht auf ca. 250 t und das Statorgewicht auf ca. 130 t .

Ungenauigkeit in der rechnerischen Bestimmung dieser Strahlungsverluste das Endergebnis der Verlustbestimmung kaum beeinflusst.

2. Die Messung der Kühlwassermenge

Die Bestimmung der Kühlwassermenge erfolgte durch eine Behältermessung unter Verwendung

eines Holztroges von 2700 l Inhalt (Fig. 2). Das normalerweise in einen Kontrolltrichter austretende Kühlwasser wurde zur Durchführung der Messung durch den Mantel eines Fasses dem Holztroge zugeleitet, und die zur Füllung benötigte Zeit gemessen, wobei auch bei einer Kühlwassermenge von 50 l/s noch eine gute Messgenauigkeit erreicht werden konnte. Die Messung wurde für jeden Messpunkt drei Mal durchgeführt und der Mittelwert der Auswertung zu Grunde gelegt.

3. Die Messung der Temperaturerhöhung des Kühlwassers

Der Kühlwasser-Eintritt und -Austritt vom Leitungsgang in den Generator erfolgt durch zwei unmittelbar benachbarte Stahlrohre von 18 cm Durchmesser (Fig. 3). Bei allen kalorimetrisch aus-



Fig. 2

Messung der Kühlwassermenge mit Hilfe eines Holztroges von 2700 l Inhalt

geführten Verlustmessungen wurden die Ein- und Austrittstemperaturen des Kühlwassers durch drei verschiedene Messgeräte bestimmt, und zwar durch Präzisionsthermometer, durch eine Thermosäule (10 kalte und 10 warme Lötstellen) und durch geeichte NTC-Widerstände. Währendem bei der Messung der Totalverluste die Temperaturdifferenz des Kühlwassers zwischen Austritt und Eintritt ca. 4 °C betrug, wurde bei der Messung der Einzelverluste zur Erhöhung der Messgenauigkeit die Kühlwassermenge so weit gedrosselt, dass eine Erwärmung derselben von 8...10 °C eintrat. In keinem Messpunkt war die Verschiedenheit der Temperaturangaben der Messgeräte grösser als 0,1 °C. Das Hauptgewicht wurde jedoch der gut verteilbaren und gegen Wärme leicht zu isolierenden Thermosäule zugeteilt und deren Angaben der Berechnung der Verluste zu Grunde gelegt.

4. Die Bestimmung des Beharrungszustandes der Temperaturen

Bei der Verlustmessung nach der kalorimetrischen Methode ist es ausserordentlich wichtig, dass bei jedem einzelnen Messpunkt der Beharrungszustand der Temperaturverhältnisse innerhalb des Generators und des Kühlsystems abgewartet wird. Wie früher ausgeführt, wurden gleichzeitig mit den Verlustmessungen auch Erwärmungsmessungen durchgeführt, zu welchem Zwecke in den Maschinen zahlreiche Thermometer, Thermolemente und Widerstandselemente eingebaut waren, mit denen sich der Verlauf der Temperaturen genau über-

wachen liess. Aus den aufgenommenen Abkühlungskurven ergab sich für den Stator eine Zeitkonstante

von ca. 1 h, so dass der Beharrungszustand auf 3 ‰ nach ca. 6 h, auf 1 ‰ nach ca. 7 h erreicht werden konnte. Berücksichtigt man, dass die Temperaturänderungen zwischen den einzelnen Versuchen im ungünstigsten Fall 35 °C betragen, und dass bei einem Totalgewicht von ca. 390 t für eine Änderung von 1 °C/h ca. 53 kWh nötig sind, so ist festzustellen, dass ein eventuell noch nicht ganz stationärer Zustand höchstens Fehler von 10...15 kW erzeugen könnte, eine Ungenauigkeit also, mit der bei kalorimetrischen Verlustmessungen mit einer Temperaturdifferenz von nur 4 °C im Kühlwasser ohnehin gerechnet werden muss.

Die Aufnahme der einzelnen Messpunkte erfolgte jeweils erst, nachdem das Erreichen des Beharrungszustandes während ca. 2 h überwacht worden war.

5. Die Messung der Erregungsverluste

Die Erregungsverluste, d. h. die Stromwärmeverluste in der Rotorwicklung, werden gleich wie die übrigen im Generator auftretenden Verluste als Wärme dem Kühlwasser zugeführt, und sie sind deshalb in den kalorimetrisch gemessenen Verlustwerten eingeschlossen. Die Erregungsverluste lassen sich auf einfache Weise durch Messung des Erregerstromes und der Spannung an den Schleifringen bestimmen. Diese elektrische Bestimmung der Erregungsverluste ist erforderlich, um bei den in den nachfolgend beschriebenen Versuchen 2 und 3 kalorimetrisch gemessenen Verlustwerten eine Aufteilung in Eisenverluste einerseits und Erregungsverluste andererseits vornehmen zu können.

C. Das Versuchsprogramm

Die kalorimetrischen Verlustbestimmungen wurden an drei der insgesamt vier im Maschinenhaus des Kraftwerkes Birsfelden eingebauten Generatoren durchgeführt. Das Versuchsprogramm für jeden Generator umfasste die folgenden kalorimetrischen Einzelmessungen, wobei zusätzlich der Erregungsverlust durch Messung des Erregerstromes und der Erregerspannung an den Schleifringen bestimmt wurde. Wie bereits früher ausgeführt, wurde bei der Auswertung zum kalorimetrischen Wert des Kühlwassers die rechnerisch ermittelte Wärmeabgabe über den Generatormantel zugezählt.

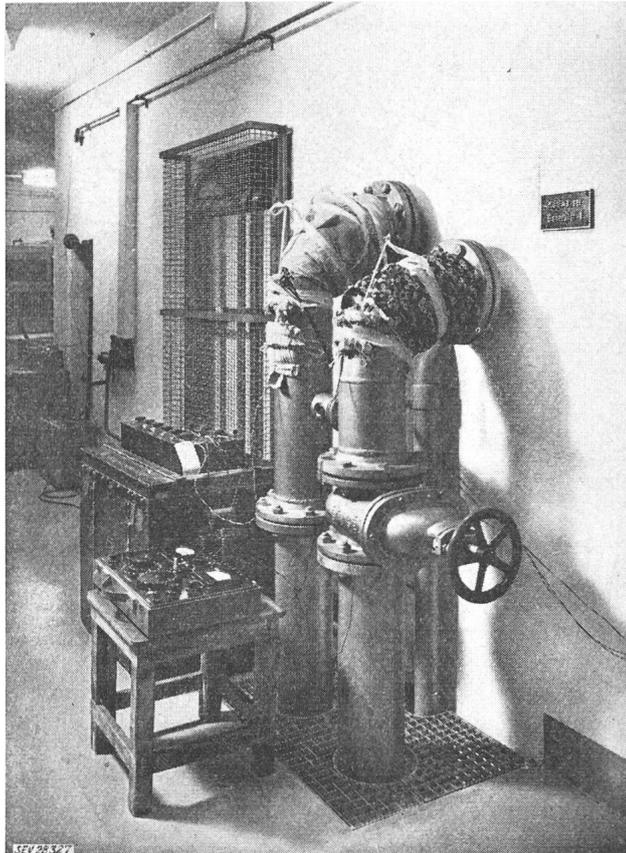


Fig. 3

Einrichtung zur Messung der Temperaturen des Kühlwassers

Versuch 1: Betrieb im Leerlauf, unerregt

Die Messung ergibt die Reibungs- und Ventilationsverluste, und zwar wurden die folgenden Werte bestimmt:

Generator 1	100 kW
Generator 2	108 kW
Generator 4	88 kW

Garantie-Richtwert 100 kW

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Konstruktion der Ventilatoren und die Anordnung der Kühlkanäle bei den 3 Generatoren nicht genau übereinstimmt, worauf die Abweichungen der Messwerte zurückzuführen sind.

Versuche 2 und 3: Betrieb im Leerlauf, erregt auf 6600 V und 7260 V

Die Messungen ergeben nach Abzug der aus Versuch 1 bekannten Reibungs- und Ventilationsver-

luste und der elektrisch gemessenen Erregungsverluste die im aktiven Eisen und andern Metallteilen bei Leerlauf auftretenden Verluste, zuzüglich die vernachlässigbar kleinen Dielektrikumsverluste, die üblicherweise als unter den Eisenverlusten eingeschlossen betrachtet werden. Es wurden die folgenden Werte ermittelt:

	bei 6600 V	bei 7260 V
Generator 1	221 kW	282 kW
Generator 2	201 kW	263 kW
Generator 4	177 kW	234 kW
Garantie-Richtwert	180 kW	220 kW

Die Verschiedenheit der Eisenverluste der einzelnen Generatoren ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass Unterschiede in der Qualität des verwendeten Statorbleches, in der Anzahl der Kühlschlitze, sowie in der nachträglichen Oberflächenbehandlung der Blechpakete vorhanden sind.

Versuch 4: Betrieb im Kurzschluss, erregt auf 2270 A

Die Messung ergibt nach Abzug der aus Versuch 1 bekannten Reibungs- und Ventilationsverluste und der elektrisch gemessenen Erregungsverluste die Lastverluste, d. h. die Stromwärmeverluste in der Statorwicklung zuzüglich der Zusatzverluste, die durch Wirbelströme in der Statorwicklung und in den Metallteilen des Stators und Rotors entstehen. Die gemessenen Verlustwerte wurden nach der Publ. Nr. 188 des SEV auf die Bezugstemperatur von 75 °C umgerechnet. Es wurden die folgenden Werte bestimmt:

Generator 1	247 kW
Generator 2	247 kW
Generator 4	237 kW
Garantie-Richtwert	240 kW

Versuche 5...8: Betrieb mit Vollast-Energieabgabe an das Netz

Es wurden an jedem der drei Generatoren vier Messungen mit verschiedenen Belastungen, Leistungsfaktoren und Klemmspannungen durchgeführt, wobei die folgenden Belastungsverhältnisse angestrebt wurden:

	Versuch	5	6	7	8
Scheinleistung	kVA	28 600	28 600	28 600	26 000
Wirkleistung	kW	14 300	14 300	21 500	19 500
Leistungsfaktor	cos φ	0,5	0,5	0,75	0,75
Spannung	V	6 600	7 260	7 260	6 600
Strom	A	2 500	2 270	2 270	2 270

Die Spannungsschwankungen des Netzes ermöglichen es leider nicht, die erwähnten Sollwerte genau einzuhalten, sondern es mussten vielmehr kleinere Abweichungen in Kauf genommen werden.

Durch die Versuche 5 bis 8 wurden jeweils die Totalverluste für den entsprechenden Belastungsstand kalorimetrisch gemessen. Es ist nun von grossem Interesse, diese gemessenen Totalverluste zu vergleichen mit der Summe der aus den Versuchen 1 bis 4 ermittelten Einzelverluste zuzüglich der elektrisch bestimmten Erregungsverluste. Dieser Vergleich ist in den Tabellen I...III für die einzelnen Generatoren zusammengestellt, wobei die Einzelverluste jeweils für die Belastungswerte und die Wicklungstemperaturen umgerechnet sind, die beim entsprechenden

Belastungsversuch tatsächlich vorhanden waren. Diese Umrechnung erfolgte nach der Publ. Nr. 188 des SEV.

D. Beurteilung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Aus den Tabellen I...III geht hervor, dass die im Belastungsversuch gemessenen Totalverluste mit der Summe der aus Einzelmessungen bestimmten Ein-

Messergebnisse des Generators Nr. 1 Tabelle I

	Versuch			
	5	6	7	8
Belastungsverhältnisse				
Scheinleistung kVA	28 100	28 300	28 800	26 200
Wirkleistung kW	14 050	14 050	21 500	19 600
Leistungsfaktor cos φ	0,500	0,497	0,746	0,748
Spannung V	6 660	7 340	7 280	6 620
Strom A	2 430	2 225	2 280	2 280
A. Messungen der Totalverluste (Versuch 5...8): kW				
	802	878	830	710
Messungen der Einzelverluste:				
Reibungs- und Ventilationsverluste aus Versuch 1 kW	100	100	100	100
Eisenverluste aus Versuch 2 und 3 kW	225	291	284	222
Lastverluste aus Versuch 4 kW	274	230	241	238
Erregungsverluste aus Erregerstrom und Spannung kW	210	264	204	137
B. Summe der Einzelverluste kW				
	809	885	829	697
Abweichung B von A	+ 7,0 + 0,88	+ 7,0 + 0,80	- 1,0 - 0,12	- 13 - 1,86

Messergebnisse des Generators Nr. 2 Tabelle II

	Versuch			
	5	6	7	8
Belastungsverhältnisse				
Scheinleistung kVA	28 500	27 900	28 300	26 050
Wirkleistung kW	14 300	14 940	21 450	19 600
Leistungsfaktor cos φ	0,502	0,535	0,758	0,752
Spannung V	6 610	7 190	7 260	6 600
Strom A	2 485	2 240	2 250	2 280
A. Messungen der Totalverluste (Versuch 5...8): kW				
	800	813	805	686
Messungen der Einzelverluste:				
Reibungs- und Ventilationsverluste aus Versuch 1 kW	108	108	108	108
Eisenverluste aus Versuch 2 und 3 kW	202	255	263	201
Lastverluste aus Versuch 4 kW	305	244	246	250
Erregungsverluste aus Erregerstrom und Spannung kW	179	200	178	126
B. Summe der Einzelverluste kW				
	794	807	795	685
Abweichung B von A	- 6,0 - 0,76	- 6,0 - 0,74	- 10 - 1,26	- 1,0 - 0,14

	Versuch			
	5	6	7	8
Belastungsverhältnisse				
Scheinleistung kVA	28 650	28 900	28 700	25 800
Wirkleistung kW	14 400	14 450	21 450	19 600
Leistungsfaktor cos φ	0,503	0,500	0,748	0,760
Spannung V	6 600	7 240	7 280	6 620
Strom A	2 505	2 310	2 280	2 250
A. Messungen der Totalverluste (Versuch 5...8): kW				
	754	806	768	657
Messungen der Einzelverluste:				
Reibungs- und Ventilationsverluste aus Versuch 1 kW	88	88	88	88
Eisenverluste aus Versuch 2 und 3 kW	177	231	237	179
Lastverluste aus Versuch 4 kW	291	247	240	230
Erregungsverluste aus Erregerstrom und Spannung kW	188	228	183	125
B. Summe der Einzelverluste kW				
	744	794	748	622
Abweichung B von A	- 10 - 1,34	- 12 - 1,50	- 20 - 2,64	- 37 - 5,80

zelverluste mit grosser Genauigkeit übereinstimmen. So beträgt die Abweichung der beiden Verlustwerte voneinander bei 10 der durchgeführten Versuche weniger als 2%, und zwar im Durchschnitt nur 0,94%. Einzig bei zwei Versuchen am Generator 4 hat sich offenbar eine etwas grössere Messgenauigkeit eingeschlichen, indem hier die Abweichungen 2,64% und 5,8% betragen. Beim letzten Versuch war trotz stationärem Zustand der Maschine die Kühlwassererwärmung nicht konstant, was nur durch einen auf eine Verschmutzung des Filters bedingten Rückgang der Kühlwassermenge erklärt werden konnte. Bei der Beurteilung der Grösse dieser Abweichungen ist in Betracht zu ziehen, dass die Publ. Nr. 188 des SEV für den Garantiewert der Gesamtverluste eine Toleranz von 10% zulässt, also ein Mehrfaches der oben aufgeführten Abweichungen der Ergebnisse der beiden Messmethoden.

Als Ergebnis dieser zahlreichen Messungen kann festgestellt werden, dass die kalorimetrische Messmethode für zahlreiche Generatortypen ein durchaus brauchbares und zuverlässiges Mittel zur Bestimmung der Verluste darstellt, das verdient, weit häufiger Anwendung zu finden, als dies bis anhin der Fall war. Die Bedingung für genaue Messung ist allerdings die Notwendigkeit des zweckmässigen Einbaues der Temperaturdifferenz-Messgeräte und die exakte Bestimmung der Kühlwassermenge. Dass die Durchführung der Messungen grosse Sorgfalt und Fachkenntnisse verlangt, ist eine Selbstverständlichkeit. Es rechtfertigt sich durchaus, dass sich auch die Elektroingenieure mit dieser Methode vertraut machen, nachdem sie den Maschineningenieuren, z. B. zur Bestimmung der Verluste wassergekühlter Lager, seit langem geläufig ist.

Adresse des Autors:
F. Aemmer, dipl. Ingenieur, Direktor der Kraftwerk Birsfelden AG, Birsfelden (BL).