Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 58 (1967)

Heft: 8

Artikel: Die Abnahmeversuche am Phasenschieber von 60/70 Mvar für das Unterwerk Breite der NOK

Autor: Christen, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916243

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: 20.02.2026

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

Die Abnahmeversuche am Phasenschieber von 60/70 Mvar für das Unterwerk Breite der NOK [1])

Von *A. Christen*, Zürich

621.313.335

Im Verlauf der Abnahmeversuche an einem wasserstoffgekühlten Phasenschieber konnten die Gesamtverluste der Maschine mit drei verschiedenen Messmethoden ermittelt werden. Ausser dem konventionellen Einzelverlustverfahren und der kalorimetrischen Verlustmessmethode kam erstmals die direkte wattmetrische Gesamtverlustmessung zur Anwendung. Die Gegenüberstellung der Messresultate zeigt, dass die Ergebnisse der drei Messmethoden gut übereinstimmen, da die mittleren Abweichungen durchwegs innerhalb der Messgenauigkeit liegen. Zudem konnte durch Vergleichsversuche mit und ohne Wärmeisolation auf der Maschinenoberfläche die Wärmeabgabezahl für Strahlung und freie Konvektion experimentell bestimmt werden. Sie beträgt im untersuchten Fall 14 W/m² °C.

Au cours des essais de réception d'un compensateur refroidi à l'hydrogène, les pertes totales de la machine ont pu être déterminées par trois méthodes de mesure. Outre la mesure des pertes séparées et la mesure calorimétrique des pertes, on a procédé pour la première fois à la mesure wattmétrique directe des pertes totales. La comparaison des résultats des mesures montre une bonne concordance des trois méthodes, car les écarts moyens ne dépassent pas la précision de mesure. En outre, par des essais comparatifs avec et sans isolation thermique à la surface de la machine, l'indice de déperdition de chaleur par rayonnement et convection libre a été déterminé expérimentalement. Dans le cas de ce compensateur, cet indice est de 14 W/m² °C.

1. Allgemeines [1; 2] [2])

Ein wichtiger Schritt im Ausbau des schweizerischen Höchstspannungsnetzes stellte die Inbetriebnahme der ersten 380-kV-Übertragungsleitung von Tavanasa bzw. Sils im Kanton Graubünden nach dem Unterwerk Breite der NOK im Jahre 1964 dar. Unterdessen ist durch den Ausbau der Verbindung Breite—Tiengen der Zusammenschluss der schweizerischen 380-kV-Anlage mit dem deutschen Übertragungssystem dieser Spannung vollzogen worden. Das Unterwerk Tiengen des Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerkes (RWE) bildet den südlichen Endpunkt der 380-kV-Verbindung zwischen der grossen Braunkohle-Kraftwerkgruppe Frimmersdorf und den Wasserkraftwerken des Kantons Graubünden.

Den wichtigsten Knotenpunkt in dieser 380-kV-Verbindung bildet auf schweizerischem Gebiet das Unterwerk Breite, welches eine 600-MVA-Transformatorgruppe mit der entsprechenden Schaltanlage sowie die erforderlichen Reguliereinrichtungen für Spannung und Blindleistung enthält. Zu diesen Reguliereinrichtungen gehört unter anderem ein wasserstoffgekühlter Phasenschieber für 60/70 Mvar Blindleistung, an welchem die Materialprüfanstalt des SEV im Auftrag der NOK sowohl im Werk des Herstellers als auch im Unterwerk Breite eingehende Abnahmeversuche durchgeführt hat.

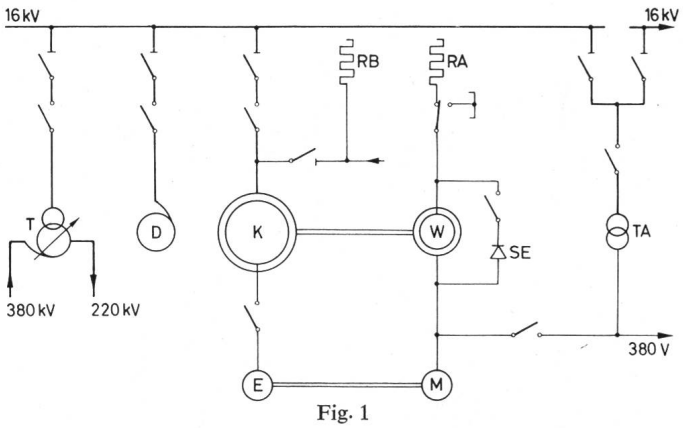


Fig. 1

Prinzipieller Aufbau der Phasenschieber-Anlage

K Kompensator, 60/70 Mvar; *W* Wellenmaschine; *E* Erregermaschine; *M* Antriebsmotor; *D* Drosselspule, 60 MVA; *T* Haupttransformator, 600 MVA; *TA* Anwurfstransformator; *RA* Anlasswiderstand; *RB* Bremswiderstand; *SE* Selbsterregungseinrichtung

[1]) NOK = Nordostschweizerische Kraftwerke AG.
[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2. Die Phasenschieber-Anlage im Unterwerk Breite

Der Aufbau der Phasenschieber-Anlage geht aus dem Schema in Fig. 1 hervor. Die Tertiärwicklung der 600-MVA-Transformatorgruppe speist die 16-kV-Sammelschiene der Anlage, an welcher zusätzlich eine Drosselspule mit einer Scheinleistung von 60 MVA angeschlossen ist.

Der *Anlauf* des Phasenschiebers erfolgt über einen Anwurfstransformator mit Hilfe der eingebauten Synchron-Induktionsmaschine (Wellenmaschine). Nach erfolgter Synchronisierung auf das 16-kV-Netz arbeitet die mit einer Selbsterregungsvorrichtung versehene Wellenmaschine als Generator und speist unabhängig vom 380-V-Hilfsnetz die separate Erreger-Umformergruppe des Phasenschiebers.

Zur *Bremsung* kann das Polrad des Phasenschiebers mit einer Batterie fremderregt und die Maschine auf einen Bremswiderstand belastet werden.

Die *Kühlung* von Phasenschieber und Wellenmaschine erfolgt mit Wasserstoff, welcher in vier wasserdurchflossenen Wärmeaustauschern rückgekühlt wird. Der Schleifringraum und die Lager sind ausserdem mit einer eigenen Wasserkühlung ausgerüstet. Zur Kühlung des Kühlwassers sind im Freien hinter dem Maschinenhaus drei Verdunstungskühler aufgestellt. Die Kühlwassertemperatur kann mit Hilfe einer Berieselungsanlage und mehrstufigen Ventilatoren an den Verdunstungskühlern reguliert werden.

Der Phasenschieber ist in einem geschlossenen Gebäude aufgestellt. Wie Fig. 2 zeigt, ist das Statorgehäuse vollständig geschlossen und weist keine Wellendurchführung auf; es hat mit Ausnahme von vier relativ kleinflächigen Auflagestellen praktisch keinen direkten Kontakt mit dem Fundament. Dies ist vor allem für die später beschriebenen kalorimetrischen Gesamtverlustmessungen von grosser Bedeutung, können doch die durch Wärmeabgabe über die Welle und an das Fundament abgeführten Verluste bei diesem Prüfobjekt vernachlässigt werden.

Die Wellenmaschine ist in einem schleifringseitig eingeschweissten zylindrischen Gehäuse eingebaut und in den Kühlgas-Kreislauf der Hauptmaschine einbezogen. Phasenschieber und Wellenmaschine sind eigenventiliert.

3. Abnahmeversuche

Zur Überprüfung der vertraglich festgelegten technischen Garantien waren unter anderem folgende Abnahmeversuche durchzuführen:

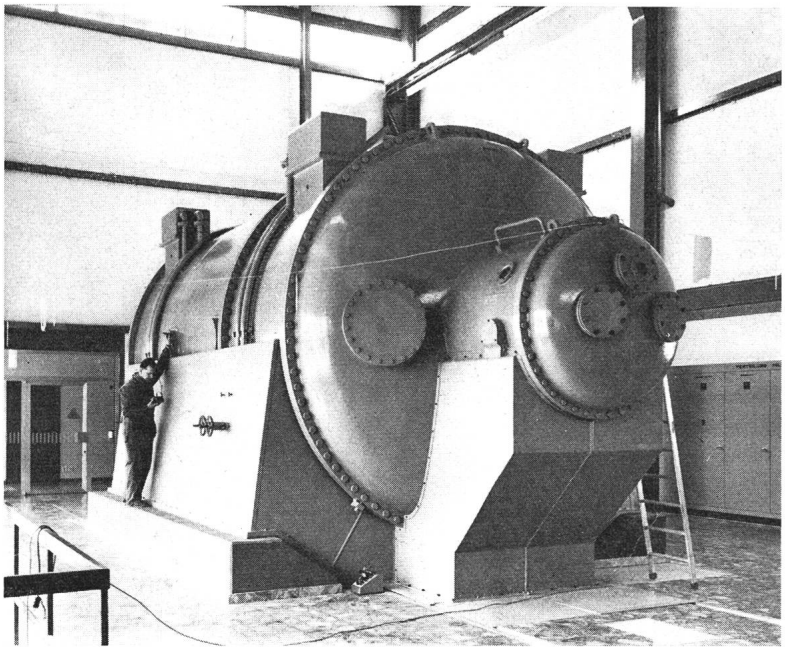


Fig. 2
Ansicht des Phasenschiebers von der Seite der Wellenmaschine

Im Lieferwerk:
a) Ermittlung der Verluste des Phasenschiebers nach dem konventionellen Einzelverlustverfahren.
Im Unterwerk Breite:
b) Kalorimetrische Gesamtverlustmessungen bei verschiedenen Betriebszuständen.
c) Wattmetrische Gesamtverlustmessungen bei verschiedenen Betriebszuständen.
d) Erwärmungsversuche bei verschiedenen Wasserstoffdrücken und Leistungen.

Die wattmetrischen Gesamtverlustmessungen wurden auf Vorschlag des Autors gleichzeitig mit den kalorimetrischen durchgeführt, um Vergleiche zu ermöglichen.

Im folgenden seien die Versuche und Messresultate näher beschrieben.

3.1 Versuchsobjekte

a) Dreiphasen-Synchron-Phasenschieber 60 000 kvar: 16 000 V, 2165 A, 1000 U./min, 50 Hz, cos $\varphi = 0$, Wasserstoffdruck 0,035 atü.

b) Synchron-Induktions-Motor-Generator, 380 V, 50 Hz:
Als Motor:
Drehmoment: 2250...1450...1450...50 kpm
Drehzahl: 0... 300... 920...999 U./min
Statorstrom: 4150...2700...2700...800 A
Als Generator:
Nennleistung: 340 kVA, cos $\varphi = 0{,}85$
Stossleistung 10 s: 600 kVA, cos $\varphi = 0{,}8$
Drehzahl: 1000 U./min

c) Erreger-Umformergruppe, bestehend aus:
Dreiphasen-Asynchronmotor
350 PS, 380 V, 485 A, 975 U./min
Gleichstrom-Erregermaschine
230 kW, 200 V, 1150 A, 975 U./min

Es ist vorgesehen, den Phasenschieber im Bedarfsfall auch bei einem Wasserstoffdruck von 1,0 atü zu betreiben, wobei die Leistung bei Übererregung auf 70 000 kvar gesteigert werden kann. Die Untersuchungen wurden deshalb auch auf diesen Betriebsfall ausgedehnt.

3.2 Messverfahren

Das konventionelle *Einzelverlustverfahren* ist in den schweizerischen Maschinenregeln [3] ausführlich beschrieben. Die im Fall des Phasenschiebers durchgeführten Versuche zur Ermittlung der Einzelverluste sind im Abschnitt 4.1 erläutert.

Die Messtechnik bei der Anwendung der *kalorimetrischen Methode* zur Bestimmung der Gesamtverluste von Grossmaschinen ist in einer früheren Arbeit des Autors [4] eingehend dargelegt worden. Einzelheiten, die speziell für die Abnahmeversuche im Unterwerk Breite gelten, ergeben sich aus dem Abschnitt 4.2.

Neuartig ist der Versuch, die vom Phasenschieber dem 16-kV-Netz entnommene Wirkleistung *wattmetrisch* zu messen. Damit werden die *Gesamtverluste* von Phasenschieber, Wellengenerator, Erreger-Umformergruppe und Hilfseinrichtungen direkt erfasst und ermöglichen interessante Vergleiche mit den übrigen Verlustmessmethoden. Der sehr kleine Leistungsfaktor cos φ von im Mittel 0,02 erforderte den Einsatz der bei Transformator-Abnahmeversuchen üblicherweise verwendeten Wattmeter mit Vollausschlag bei cos $\varphi = 0{,}1$ und der Genauigkeitsklasse 0,5. Bei sehr kleinen Leistungsfaktoren kommt der Genauigkeit der eingesetzten Messwandler erhöhte Bedeutung zu. Für die Versuche im Unterwerk Breite wurden Strom- und Spannungswandler der Materialprüfanstalt des SEV eingebaut und anschliessend an die Versuche zusammen mit den verwendeten Sekundärkabeln und Instrumenten in ihrer Eichstätte geeicht. Im verwendeten Messbereich lagen die Übersetzungsfehler durchwegs unter 0,1 %, die Fehlwinkel waren kleiner als 1′. Für die Genauigkeit von Leistungsmessungen bei kleinen Leistungsfaktoren ist es vor allem wichtig, die Fehlwinkel der Messwandler klein zu halten, da sonst die Korrekturen der Messresultate unvernünftig gross werden können. Es wurde die Dreiwattmetermethode angewendet und die sich ergebenden Wandlerkorrekturen für jedes Instrument berechnet und berücksichtigt.

3.3 Verlustbilanz

Die Gesamtverluste des Phasenschiebers und seiner Hilfseinrichtungen können aufgeteilt werden in interne und ex-

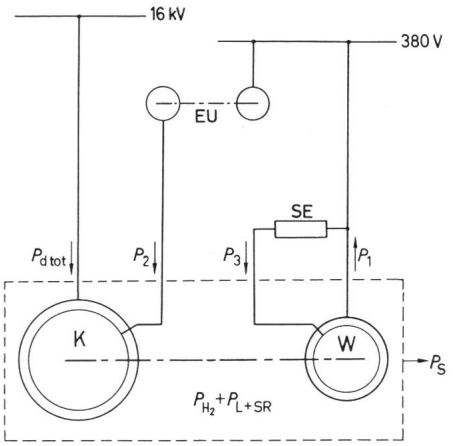


Fig. 3
Verlustbilanz des Phasenschiebers und seiner Hilfseinrichtungen
K Kompensator, 60/70 Mvar; *W* Wellenmaschine; *EU* Erreger-Umformergruppe; *SE* Selbsterregungseinrichtung

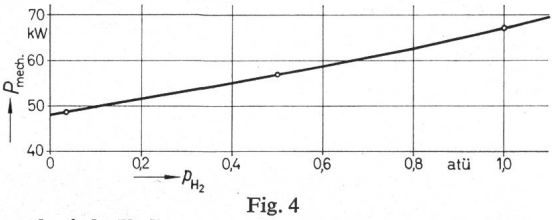


Fig. 4
Totale mechanische Verluste $P_{mech.}$ in Funktion des Wasserstoffdruckes p_{H2}

terne Verluste. Als interne Verluste bezeichnet man die durch das Kühlwasser der Wasserstoff-, Lager- und Schleifringkühler in Form von Wärme abgeführten Verluste. Sie bilden den Hauptanteil der Gesamtverluste und können kalorimetrisch gemessen werden. Die externen Verluste enthalten die von der Gehäuseoberfläche durch Strahlung und Konvektion an die Umgebungsluft abgegebenen Verluste, die Verluste durch Wärmeleitung über das Maschinenfundament, die Verluste in der Erreger-Umformergruppe, in der Selbsterregungseinrichtung des Wellengenerators sowie in Kabeln und Zuleitungen. Während die Wärmeabgabe an das Fundament vernachlässigt werden kann, lassen sich die Verluste im Erregerkreis durch elektrische Messungen erfassen. Die Verluste durch Strahlung und Konvektion waren Gegenstand besonderer Versuche, deren Ergebnisse im Abschnitt 5 kommentiert werden.

Die Verlustbilanz wird in Fig. 3 veranschaulicht und kann wie folgt formuliert werden:

$$P_{d\,tot} = P_{d\,int} + P_{d\,ext}$$

wobei

$$P_{d\,int} = P_{H2} + P_{L+SR}$$

$$P_{d\,ext} = P_1 - P_2 - P_3 + P_s$$

4. Durchgeführte Versuche und Ergebnisse

4.1 Konventionelles Einzelverlustverfahren

Die Einzelverluste des Phasenschiebers wurden im Werk des Herstellers aus einem Leerlaufversuch als fremderregter Synchronmotor bei cos $\varphi \approx 1$ und mehreren Auslaufversuchen ermittelt. Da die Maschine bei verschiedenen Wasserstoffdrücken arbeiten kann, wurde die Abhängigkeit der mechanischen Verluste vom Wasserstoffdruck gemessen. Sie ist in Fig. 4 graphisch dargestellt. Die mechanischen Verluste der leer unerregt mitdrehenden Wellenmaschine sind in den gemessenen mechanischen Totalverlusten inbegriffen.

Zur Berechnung der Erregungsverluste des Phasenschiebers musste der Erregerbedarf graphisch ermittelt werden. Die Potierspannung wurde mit Hilfe der Resultate einer Impedanzmessung an der Statorwicklung bei ausgebautem Polrad berechnet. Der graphisch ermittelte Erregerstrom für Vollast und Nennspannung stimmt mit den im Unterwerk Breite gemessenen Werten gut überein. Die Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten beträgt +1,4 %.

Für die Berechnung der Einzelverluste aus den Leerlauf- und Auslaufversuchen sowie für ihre Umrechnung auf die Versuchsbedingungen der Volllastversuche wurden folgende Annahmen getroffen:

a) Die Eisenverluste sind unabhängig von der Belastung, sie werden quadratisch mit der Statorspannung umgerechnet;
b) Die Summe der Lastverluste (Statorkupfer- und Zusatzverluste) ist unabhängig von der Wicklungstemperatur. Die Lastverluste werden quadratisch mit dem Statorstrom umgerechnet;
c) Die Ventilationsverluste sind temperaturunabhängig.

Man erhält unter Berücksichtigung dieser Annahmen folgende Einzelverluste des Phasenschiebers bei 60 000 kvar, 16 000 V, 2165 A, 50 Hz, 1000 U./min, einem Wasserstoffdruck von 0,035 atü und einer mittleren Wicklungstemperatur von 75 °C:

Totale mechanische Verluste (inkl. Wellenmaschine)	48,6 kW
Eisenverluste	198,4 kW
Lastverluste	256,6 kW
Polradverluste (inkl. Schleifringe)	128,5 kW

4.2 Kalorimetrische Gesamtverlustmessungen

Die Voraussetzungen für die Anwendung der kalorimetrischen Verlustmessung waren beim Phasenschieber Breite besonders günstig, werden doch über 90 % der Totalverluste durch das Kühlwasser der Wasserstoff- bzw. Lager- und Schleifringkühler abgeführt. Ausserdem war es möglich, die ausserhalb der Kalorimetrie liegenden Verluste weitgehend durch elektrische Messungen zu erfassen. Den einzigen Unsicherheitsfaktor stellten die vom Gehäuse an die Umgebungsluft abgegebenen Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion dar. Auf Vorschlag der Herstellerfirma des Phasenschiebers erklärte sich die NOK bereit, die Maschine für einen Teil der Versuche mit einer Wärmeisolation zu versehen (Fig. 5) und auf diese Weise optimale Bedingungen für die kalorimetrischen Verlustmessungen zu schaffen. Es ergab sich so die Möglichkeit, durch die Wiederholung von Versuchen mit isolierter und nichtisolierter Maschine die Verluste durch Strahlung und Konvektion kalorimetrisch zu messen. Ausführlicher wird über diese speziellen Untersuchungen im Abschnitt 5 berichtet.

Die kalorimetrischen Gesamtverlustmessungen wurden im Anschluss an die Erwärmungsversuche durchgeführt und zwar bei folgenden Betriebsdaten:

Versuch 1: 70 240 kvar, 16 015 V, 2532 A, 1000 U./min, 1,0 atü
Versuch 2: 60 370 kvar, 16 020 V, 2176 A, 1000 U./min, 0,035 atü
Versuch 3: 60 090 kvar, 16 035 V, 2164 A, 1000 U./min, 0,035 atü
Versuch 4: 70 160 kvar, 16 000 V, 2532 A, 1000 U./min, 1,0 atü

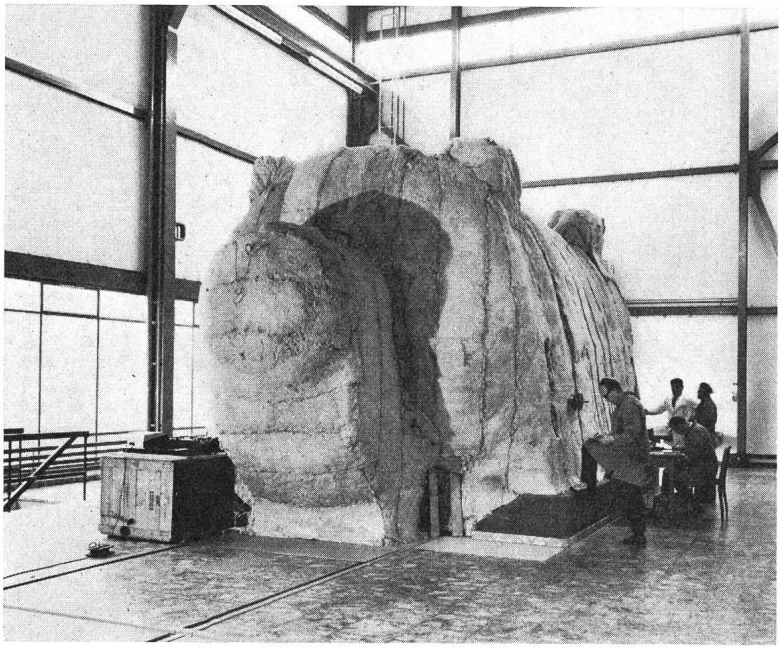


Fig. 5
Ansicht des Phasenschiebers mit Wärmeisolation von der Seite der Wellenmaschine

Für die Versuche 1 und 2 war die Maschine wärmeisoliert, die Versuche 3 und 4 wurden zu Vergleichszwecken ohne Wärmeisolation durchgeführt.

Die *Messung der Kühlwassermengen* erfolgte mit geeichten Kaltwasserzählern (Fig. 6 und 7). Eine Behältermessung kam nicht in Frage, da das unter Druck stehende geschlossene Kühlwassersystem nicht geöffnet werden konnte.

Zur *Messung der Temperaturerhöhung des Kühlwassers* waren in die wärmeisolierten Hauptleitungen der Wasserstoffkühler Thermometerstutzen für Präzisionsthermometer mit 1/10°-Einteilung eingebaut (Fig. 8). Die Temperaturerhöhungen im Kühlkreislauf der Lager- und Schleifringkühler wurden mit Thermoelementen und Kompensator gemessen.

Für die Messung aller elektrischen Grössen kamen Präzisionsmessgeräte der Genauigkeitsklassen 0,1 und 0,2 zur Anwendung.

Die *Versuchsdauer* betrug für die Versuche 1, 2 und 3 je ca. 11 h, für Versuch 4 aber ca. 15 h, da im Verlauf der Aufheizperiode eine Abschaltung durch einen Lagerthermostaten erfolgt war.

Die *Konstanz der Messgrössen* während des Versuchs ist ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der erreichbaren

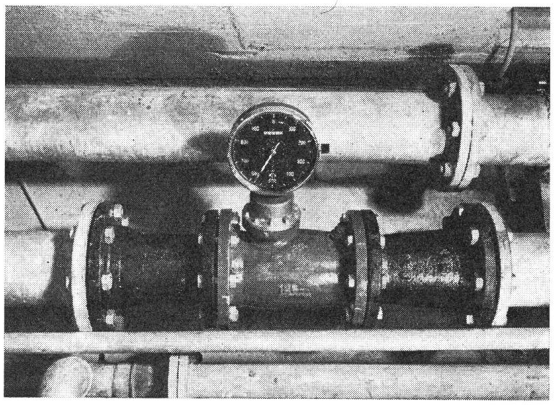


Fig. 6
Messung der Kühlwassermenge der Wasserstoffkühler

Messgenauigkeit. Während die in der Literatur angegebenen Bedingungen sowohl für die elektrischen Grössen als auch für die Kühlwassermengen durchwegs eingehalten werden konnten, ergaben sich bei der Stabilisierung der Kaltwassertemperaturen beträchtliche Schwierigkeiten, welche im angewendeten Rückkühlprinzip begründet sind. Die Kaltwassertemperatur kann bei konstanter Kühlwassermenge und konstanten Verlusten im Wasserstoffkühler nur mit Hilfe der Kühlstufen der Verdunstungskühler beeinflusst werden. Während der kalorimetrischen Verlustmessungen musste aber praktisch immer volle Kühlung angewandt werden, um das unzulässige Ansteigen von Kaltwasser-, Kaltgas- und Lagertemperaturen bei den gedrosselten Kühlwassermengen verhindern zu können. Eine Regulierung der Kaltwassertemperatur war daher nicht mehr möglich. Ausserdem spielten die klimatischen Verhältnisse (Aussentemperatur, Sonnenbestrahlung der im Freien stehenden Verdunstungskühler) eine wesentliche Rolle. Es zeigte sich, dass die frühen Nachtstunden die günstigsten Messbedingungen boten.

Nach Erreichen des thermischen Beharrungszustandes wurden jeweils während einer Stunde 4 Messungen durchgeführt, deren Auswertung im Mittel die in der Tabelle I

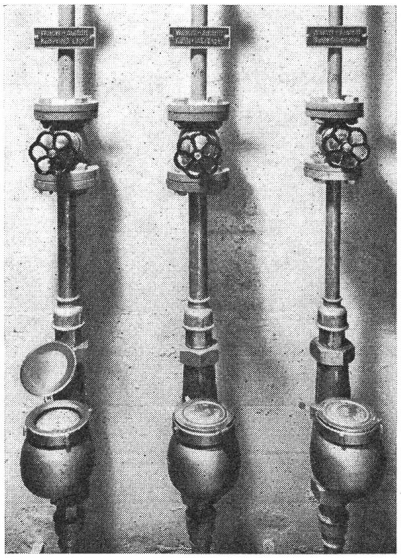


Fig. 7
Messung der Kühlwassermengen von Lager- und Schleifringkühler

aufgeführten Resultate ergaben. Bei den Versuchen mit wärmeisolierter Maschine wurde die Wärmeleitung durch das Mineralfasermaterial ($\lambda = 0{,}038$ W/m °C bei 50 °C) berücksichtigt. Die Verluste durch Strahlung und Konvektion sind nach dem im Abschnitt 5 erläuterten Verfahren ermittelt worden.

4.3 Wattmetrische Verlustmessungen

Gleichzeitig mit den kalorimetrischen Verlustmessungen wurde für jeden Messpunkt die vom 16-kV-Netz bezogene Wirkleistung, welche den Gesamtverlusten von Phasenschieber, Wellenmaschine, Erreger-Umformergruppe und Hilfseinrichtungen entspricht, nach der im Abschnitt 3.2 erläuterten Methode wattmetrisch bestimmt. Die Messunsicherheit wegen den teilweise beträchtlich pendelnden Wattmeter-Ausschlägen wurde dabei durch eine grosse Zahl von Ablesungen verringert und für jeden Versuch der Mittelwert über die Messdauer von ca. einer Stunde berechnet. Die aus den Wandlerfehlern sich ergebenden Korrekturen waren in allen Fällen kleiner als 1 % der wattmetrisch gemessenen Gesamtverluste.

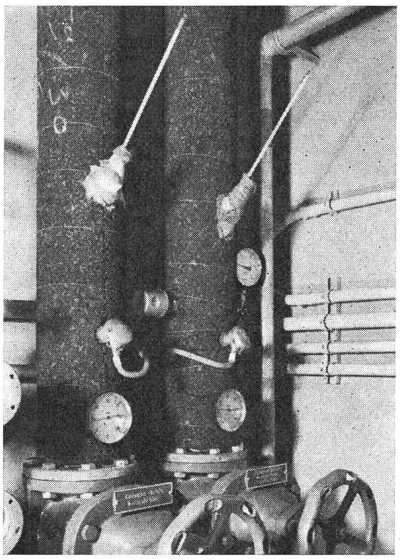


Fig. 8
Messung der Temperaturerhöhung des Kühlwassers der Wasserstoffkühler

Ergebnisse der kalorimetrischen Gesamtverlustmessungen

Tabelle I

Versuch Nr.	Wasserstoff-Kühler kW	Lager- und Schleifring-kühler kW	Externe Verluste (elektr.) kW	Wärmeleitung durch Isolation kW	Strahlung und Konvektion kW	Gesamt-Verluste kW
1	782,1	21,5	31,6	2,5	—	*837,7*
2	634,8	19,3	27,9	3,0	—	*685,0*
3	622,6	18,3	27,5	—	17,0	*685,4*
4	764,8	22,7	32,3	—	17,8	*837,6*

Ergebnisse:

Versuch 1: $P_{d_{tot}} = 841{,}9$ kW
Versuch 2: $P_{d_{tot}} = 700{,}6$ kW
Versuch 3: $P_{d_{tot}} = 694{,}2$ kW
Versuch 4: $P_{d_{tot}} = 840{,}0$ kW

4.4 Vergleich der Ergebnisse der 3 Verlustmessmethoden

Um die Ergebnisse der drei Verlustmessmethoden miteinander vergleichen zu können, müssen die im Werk des Herstellers gemessenen Einzelverluste auf die Betriebszustände der Vollastversuche 1...4 umgerechnet werden. Die Voraussetzungen für diese Berechnungen sind zum Teil im Abschnitt 4.1 festgelegt. Ergänzend sei bemerkt, dass die Polradverluste des Phasenschiebers sowie die externen Verluste (ohne Strahlung) während der kalorimetrischen Gesamtverlustmessung jeweils direkt elektrisch gemessen werden konnten. Die Einzelverluste der Wellenmaschine ergaben sich aus Versuchen im Werk des Herstellers.

Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich durch Summation aller Einzelverluste folgende Gesamtverluste:

Versuch 1: $P_{d_{tot}} = 831{,}6$ kW
Versuch 2: $P_{d_{tot}} = 692{,}2$ kW
Versuch 3: $P_{d_{tot}} = 686{,}1$ kW
Versuch 4: $P_{d_{tot}} = 833{,}6$ kW

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der drei Verlustmessmethoden erfolgt in Tabelle II.

Vergleich der Ergebnisse der drei Verlustmessmethoden

Tabelle II

		Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
A. Summe der Einzelverluste	kW	831,6	692,2	686,1	833,6
B. Gesamtverluste, kalorimetrisch	kW	837,7	685,0	685,4	837,6
C. Gesamtverluste, wattmetrisch	kW	841,9	700,6	694,2	840,0
Abweichung A von B	%	—0,73	+1,05	+0,10	—0,48
Abweichung A von C	%	—1,22	—1,20	—1,17	—0,76
Abweichung B von C	%	—0,50	—2,23	—1,27	—0,28

Die Ergebnisse der Tabelle II sind in zweifacher Hinsicht aufschlussreich:

a) Die mittlere Abweichung der kalorimetrisch gemessenen Gesamtverluste von der Summe der im konventionellen Verfahren bestimmten Einzelverluste ist praktisch Null. Dies ist ein Resultat, das sich erfahrungsgemäss bei der Anwendung der kalorimetrischen Methode an grossen Synchrongeneratoren nie erreichen lässt. Zum Teil wird dieses Ergebnis auf die bei der Umrechnung der Einzelverluste getroffenen Annahmen zurückzuführen sein, indem besonders beim Phasenschieber die bei Vollast auftretenden Eisenverluste am meisten von den im Leerlauf bei $\cos \varphi = 1$ gemessenen Werten abweichen. Andrerseits trifft die Annahme, dass die Summe der Lastverluste unabhängig von der Wicklungstemperatur und dem Leistungsfaktor einzusetzen sind, die Wirklichkeit auch nicht genau. Während die Eisenverluste bei Vollast grösser werden, vermindert sich die Summe der Lastverluste um einen Teil der Zusatzverluste. Da diese Abhängigkeit aber qualitativ nur schwer zu erfassen sind, beschränkt man sich bei Vergleichen mit Vorteil auf die in den Regeln für elektrische Maschinen des SEV getroffenen Annahmen. Ausschlaggebend für die sehr gute Übereinstimmung der verglichenen Messresultate dürfte aber doch das für kalorimetrische Verlustmessungen sehr geeignete Prüfobjekt sein, bei welchem die schwer erfassbaren und bei Wasserkraftgeneratoren nicht vernachlässigbaren Verlustanteile wie Wärmeleitung durch die Welle und Wärmeabgabe an das Fundament wegfallen.

b) Die grösste mittlere Abweichung tritt beim Vergleich der Summe der Einzelverluste mit den wattmetrisch gemessenen Gesamtverlusten auf; sie beträgt —1,1 %. Darauf lässt sich ersehen, dass die bei Vollast auftretenden Gesamtverluste im Fall des Phasenschiebers tatsächlich etwas grösser sind, als die unter den Voraussetzungen des Abschnitts 4.1 errechnete Summe der Einzelverluste. Die praktisch erreichbare Messgenauigkeit der kalorimetrischen Verlustmessung wird in der Literatur im allgemeinen mit ±2...±3 % angegeben; sie kann jedoch im Fall des Phasenschiebers auf ± 1,5...±2 % festgesetzt werden, da die Unsicherheiten bei der Ermittlung der Verluste durch Wärmeleitung, Strahlung und Konvektion praktisch wegfallen. Für die wattmetrische Gesamtverlustmessung kann mit einer erreichbaren Messgenauigkeit von ±1...±1,5 % gerechnet werden. Dabei sind ausser den Ablese- und Eichfehlern immer auch die Fehler infolge Nichterreichen des thermischen Beharrungszustandes sowie die Variationen der Bezugsgrössen berücksichtigt. Die Abweichungen nach Tabelle II liegen also im Mittel innerhalb der Messgenauigkeit und der Versuch mit der direkten wattmetrischen Gesamtverlustmessung kann als Erfolg bezeichnet werden.

5. Ermittlung der Verluste durch Strahlung und Konvektion

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

α_s 10...20 W/m² °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.

Die Unsicherheiten bei der Berechnung der Verluste durch Strahlung und Konvektion bestehen zum Teil darin, dass die Wärmeabgabezahl beträchtlich grösser werden kann, wenn im Maschinenraum eine erzwungene Luftströmung herrscht. Dies war allerdings im Phasenschiebergebäude während den Abnahmeversuchen nicht der Fall, so dass mit der üblicherweise angenommenen Wärmeabgabezahl von 15 W/m² °C gerechnet werden konnte.

Dieser Erfahrungswert kann selten überprüft werden, es sei denn, die Maschine werde, wie in diesem Fall auf der ganzen Oberfläche mit einer Wärmeisolation versehen. Als

Isolationsmaterial dienten Mineralfasermatten von ca. 50 mm Dicke mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0{,}038$ W/m² °C bei 50 °C. Die isolierte Maschine zeigt Fig. 5.

Die Verluste infolge Wärmeleitung durch die Isolation ergeben sich für die Versuche 1 und 2 zu 2,5 bzw. 3 kW, während die Verluste durch Strahlung und Konvektion vernachlässigbar klein werden. Aus den korrespondierenden Versuchsläufen 1 und 4 bzw. 2 und 3 war es möglich, die Verluste durch Strahlung und Konvektion als Differenz der im Kühlwasser abgeführten Verluste zu bestimmen. Diese Differenz betrug 18,6 bzw. 16,2 kW.

Bei den kalorimetrischen Verlustmessungen wurde im thermischen Beharrungszustand die Übertemperatur der Gehäuseoberfläche über die Umgebungsluft gemessen. Für die Temperaturmessungen auf der Oberfläche kamen raschanzeigende elektrische Thermometer zur Anwendung, die Temperatur der Umgebungsluft wurde auf der Höhe der Maschinenwelle mit 11 im Abstand von 2 m vom Gehäuse verteilt aufgehängten Quecksilberthermometer ermittelt. Die Oberfläche war in 9 charakteristische Teile aufgeteilt, deren Fläche möglichst genau ausgemessen wurde. Auf diesen Teilflächen waren 23 Meßstellen für die Oberflächen-Temperaturmessung bezeichnet.

Aus den gemessenen Übertemperaturen und den kalorimetrisch ermittelten Strahlungsverlusten ergaben sich Wärmeabgabezahlen von 14,6 bzw. 13,3 W/m² °C. Für die Versuche 3 und 4 wurde deshalb mit einer mittleren Wärmeabgabezahl von 14 W/m² °C gerechnet. Dieser Wert liegt innerhalb dem in den Regeln für elektrische Maschinen des SEV angegebenen Bereich von 10...20 W/m² °C und bestätigt die üblicherweise getroffene Annahme von 15 W/m² °C.

6. Schlussbemerkungen

Die Abnahmeversuche am Phasenschieber im Unterwerk Breite bestätigen, dass die kalorimetrische Verlustmessmethode dem konventionellen Einzelverlustverfahren ebenbürtig ist. Dies trifft vor allem dann zu, wenn die im Vollastbetrieb auftretenden Gesamtverluste ermittelt werden müssen und ihre Aufteilung nicht primär interessiert. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Gesamtverluste ergibt sich bei Phasenschiebern durch die direkte wattmetrische Verlustmessung, welche bei Verwendung geeigneter Messgeräte Resultate liefert, die sehr gut mit denjenigen der bekannten Messmethoden übereinstimmen und zudem messtechnisch den geringsten Aufwand erfordert.

Literatur

[1] *F. Aemmer:* Das schweizerische Höchstspannungsnetz und die 380-kV-Verbindung Tavanasa-Sils-Breite. Elektr.-Verwertg. 39(1964)12, S. 305...308.

[2] *M. Keppler:* Die Schaltanlage Breite der Nordostschweizerischen Kraftwerke AG. Elektr.-Verwertg. 39(1964)12, S. 309...312.

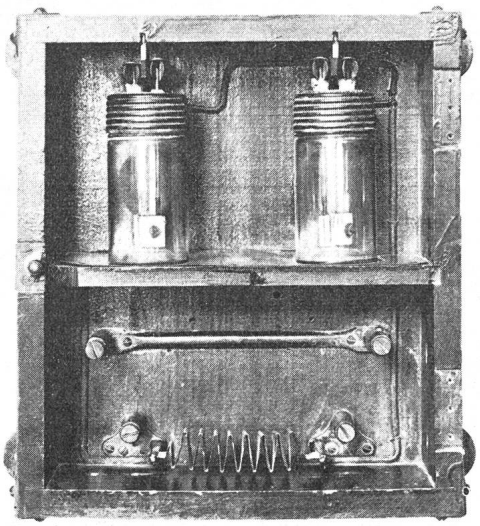
[3] Regeln für elektrische Maschinen. Publikation 3009 des SEV, Zürich 1962.

[4] *A. Christen:* Die Anwendung der kalorimetrischen Methode zur Bestimmung der Verluste von Grossmaschinen. Bull. SEV 57(1966)15, S. 643...651.

Adresse des Autors:
A. Christen, Dipl. Ingenieur, Chef der Gruppe für auswärtige Messungen, Materialprüfanstalt des SEV, Seefeldstrasse 301, 8008 Zürich.

EIN BLICK ZURÜCK

Der erste Zähler 1882



Deutsches Museum, München

Als *Edison* 1882 die erste elektrische Zentralstation in der Pearlstreet in New York baute, hatte er keinerlei Vorbilder, weder für die Anlage der Station noch für die Verteilung des elektrischen Stromes in Strassen und Häusern. Es gab zwar schon Einzelanlagen, bei welchen allerdings der Erzeuger von Strom mit dem Verbraucher identisch war, aber Edison wollte ja Elektrizität verkaufen, so wie ein Gaswerk das Gas. Er musste also einen Weg finden, um die gelieferte Elektrizitätsmenge einwandfrei zu messen. Hiefür gab es noch keine Vorrichtungen. Die Nachteile einer Pauschale, oder einer nach Lampenzahl und Benutzungsdauer berechneten Bezahlung, hatte Edison klar erkannt. Eine Kontrolle des wirklichen Verbrauchs war auf diese Weise in einem Verteilernetz nicht möglich.

Edison benötigte also einen Elektrizitätszähler. Am brauchbarsten erschien ihm ein elektrolytischer Zähler. Er wählte den Niederschlag von Zink als Mass für den Strom (s. Bild). Die Spannung musste ja schon mit Rücksicht auf die Glühlampen verhältnismässig konstant gehalten werden. Deren Schwankungen übten also einen geringen Einfluss auf die Energiemessung aus. Aus der Lösung eines Zinksalzes wurde in einem Glasgefäss Zink auf einen Zylinder niedergeschlagen. Parallel hiezu war ein Widerstand geschaltet, so dass nur ein kleiner Anteil des Stromes die elektrolytische Zelle durchfloss. Die Messung des Stromverbrauches erfolgte dadurch, dass der Zink-Zylinder in bestimmten Zeitabständen gewogen wurde. Die Gewichtszunahme war direkt proportional dem Verbrauch. Viele Abnehmer standen nun diesem Verfahren skeptisch gegenüber, da sie natürlich ihrerseits, im Gegensatz zum Gasmesser, ihren Energieverbrauch nicht kontrollieren konnten. Edison fand da auch einen Ausweg. Er setzte zwei derartige Zellen auf die beiden Schalen einer Waage, welche bei einem gewissen Übergewicht einer Seite die betreffende Schale senkte, ein Zählwerk betätigte und den Strom durch die sich nun oben befindliche Zelle leitete. Das war eigentlich erst das, was wir heute einen Zähler nennen.

A. Wissner