Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 70 (1979)

Heft: 23

Artikel: Gedanken zur vorbeugenden Instandhaltung von Generatoren

Autor: Teichmann, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905451

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: 04.07.2025

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

Gedanken zur vorbeugenden Instandhaltung von Generatoren

Von H. Teichmann

621.313.12:658.58

Die vorbeugende Instandhaltung grosser Generatoren ist aufwendig, aber wirtschaftlich gerechtfertigt. Bei der Instandhaltungsplanung sind das Ausfallverhalten der Maschinen, die wahrscheinliche Brauchbarkeitsdauer ihrer Konstruktionselemente, besondere Betriebsbeanspruchungen und die Betriebserfahrung mit möglichst vielen Generatoren ähnlicher Konstruktion zu berücksichtigen.

L'entretien préventif des grands alternateurs est onéreux mais justifié au point de vue économique. Le planning de l'entretien doit tenir compte des points suivants: de la fréquence des défaillances des machines, de la vie utile probable des éléments constitutifs, des sollicitations de service excessives, ainsi que des expériences d'exploitation faites avec autant d'alternateurs semblables que possible.

1. Einleitung

Die Wirtschaftlichkeit eines Kraftwerkes hängt entscheidend von seiner Verfügbarkeit ab. Da es nicht möglich ist, Schäden und Störungen an den verschiedenen Anlagenteilen gänzlich zu vermeiden, fällt der Instandhaltung die Aufgabe zu, den *vermeidbaren* Schadenfällen vorzubeugen. Mit der Schadenverhütung befassen sich die Hersteller, Betreiber und Versicherer der Anlagen [1].

Das vielschichtige Gebiet der Schadenverhütung entwickelt sich allmählich zu einem selbständigen technisch-wirtschaftlichen Arbeitsgebiet, dem insbesondere die folgenden Problemkreise angehören: Technik, Arbeitsmethodik, Personalwesen, Organisation, Gesetz, Sicherheit und Kostenwesen [2]. Die nachfolgenden, am Beispiel der Generatoren orientierten Ausführungen legen einige Gedanken dar, welche zum Erfolg der vorbeugenden Instandhaltung beitragen sollen.

2. Wesen und Ziele der vorbeugenden Instandhaltung

Die Instandhaltung geht weit über den Rahmen einzelner, akuter Massnahmen der Inspektion oder der Reparatur hinaus. Von der Arbeitsmethodik her kann man vier verschiedene Instandhaltungsstrategien unterscheiden:

a. Die vorbeugende Beseitigung von Schwachstellen: Dies ist die Verbesserung des alten Zustandes durch kleinere konstruktive Änderungen oder durch Verwendung von besser geeigneten Materialien. Falls die Beseitigung der Schwachstellen nicht möglich ist, kann dadurch gegebenenfalls die Störanfälligkeit verringert werden.

b. Die störungsabhängige Instandsetzung: Hierbei wird, von der laufenden Wartung abgesehen, erst dann eine Reparatur vorgenommen, wenn eine Störung eingetreten ist.

c. Die zustandsabhängige Instandhaltung: In Abhängigkeit vom jeweiligen Zustand, aber im allgemeinen schon *vor* Auftreten einer Störung und ohne vorbestimmte Termine, wird geplant, wann ein Bestandteil ausgebessert oder ersetzt werden soll. Diese Art der Instandhaltung stützt sich auf Messungen an der Maschine.

d. Die vorbeugende Instandhaltung: Periodische Revisionsarbeiten werden schon vor dem Auftreten von Störungen ausgeführt, um Betriebsunterbrechungen nach Möglichkeit zu vermeiden. Selbstverständlich werden dabei auch die Ergebnisse der laufenden Betriebsmessungen mitberücksichtigt.

Grundsätzlich hat jede dieser Strategien in gewissen Fällen ihre Berechtigung. Für Generatoren und andere grosse Maschinen ist, nach Ablauf einer durch Anfangsschwierigkeiten geprägten Periode, die *vorbeugende* Instandhaltung am besten geeignet. Sie ist aber für sich allein nicht ausreichend und wird in der Praxis durch die vorbeugende Beseitigung von Schwachstellen, die störungsabhängige Instandsetzung sowie die zustandsabhängige Instandhaltung ergänzt. Mit weiteren Teilbereichen der Instandhaltung, wie der Arbeitsvorbereitung, der Ausbildung der Fachkräfte, der Erstellung von Arbeitsunterlagen und der Ausstattung der Werkstatt bildet sie ein Ganzes. Sie kann folgenden Zwecken dienen:

Hauptziele: Verkürzung der Ausfallzeiten der Anlage, längere Brauchbarkeitsdauer, geringere Anzahl grosser Reparaturen bei gleichzeitiger Verringerung der Zahl gleichartiger Schäden.

Betriebliche und wirtschaftliche Vorteile: Möglichkeit zur Einschränkung der Produktionsreserven, Identifizierung von Schwachstellen in der Anlage, geringerer Verbrauch sowie rationelle Haltung von Ersatzteilen, niedrigere Arbeitskosten durch verringerten Personalaufwand und weniger störungsbedingte Überzeit, geringere Reparaturkosten durch kleineren Arbeitsumfang (im Vergleich mit dem plötzlichen Ausfall der Anlage), erhöhte Arbeitssicherheit, Ermittlung von Verstössen gegen die Betriebsvorschriften.

Dazu kommt im allgemeinen Fall (Fabrikationsbetrieb) eine höhere Qualität der erzeugten Produkte und damit weniger Ausschuss.

Verschiedene der genannten Punkte stehen in einem inneren Zusammenhang, und ihr individuelles Gewicht kann in Funktion der jeweiligen Verhältnisse sehr verschieden sein.

Die vorbeugende Instandhaltung soll die Funktionstüchtigkeit der Betrachtungseinheit erhalten. Dabei wird aber die Verfügbarkeit um die Revisionszeiten verkürzt, weshalb der betriebene Aufwand nur bis zu einer gewissen Grenze hin sinnvoll sein kann. Daher gilt es, die Summe der folgenden drei Komponenten zu minimieren: die Kosten für die vorbeugende Instandhaltung, die verbleibenden Reparaturkosten sowie die Kosten infolge der Ausfallzeiten.

Am Erfolg der Wartungsmassnahmen ist neben dem Betreiber auch der Konstrukteur der Maschinen wesentlich beteiligt. Seine Massnahmen bezwecken neben einer hohen Verfügbarkeit auch die Verbesserung der Revisionsfreundlichkeit hochbeanspruchter Konstruktionsteile [1; 19].

3. Ausfallverhalten der Generatoren

Das Ausfallverhalten vieler technischer Anlagen, darunter auch der Generatoren, kann durch die momentane Ausfallrate beschrieben werden [3]. Wie die Erfahrung zeigt, lässt sich die gesamte Brauchbarkeitsdauer diesbezüglich in drei Abschnitte unterteilen (Fig. 1):

I. Die *Anfangsperiode,* also die Zeit der Inbetriebnahme und der ersten Betriebsjahre (ca. 15% der gesamten Brauchbarkeitsdauer), ist gekennzeichnet durch die relativ starke Anhäufung von Frühausfällen. Diese sind grossenteils auf konstruktive und qualitative Mängel (Produktfehler) zurückzuführen. Während dieser Periode muss die Maschine besonders

sorgfältig überwacht werden, damit Änderungen des Schwingungsverhaltens, der Temperatur, der elektrischen Grössen sowie Geräusche rechtzeitig erkannt werden. Die Anzeichen jeder Störung im Betriebsverhalten sind zu analysieren und auszuwerten. Auch durch mangelnde Betriebserfahrung des Personals bedingte Fehlhandlungen (z.B. asynchrones Zuschalten) gehören vorwiegend zu dieser Gruppe. Hingegen werden die nicht periodenabhängigen Betriebsfehler (z.B. transiente Überspannungen) zu den Zufallsfehlern (Gruppe b) gerechnet.

Die vorbeugende Instandhaltung tritt während dieser Anfangsperiode kaum in Erscheinung.

II. Die *mittlere Periode* (ca. 60...65 % der Brauchbarkeitsdauer) weist eine relativ niedrige und weitgehend konstante Ausfallrate auf. Die entsprechenden Ausfälle sind nicht periodenabhängig (Gruppe b). Sie sind entweder auf Produktfehler (z.B. schwache Abstützung der Wickelköpfe) oder Ursachen wie Bedienungsfehler, mangelnde Betriebsüberwachung (z.B. zu hohe Lagertemperatur), unzureichende Inspektionen oder Störungen in der Anlage zurückzuführen.

Ein wichtiges Ziel der vorbeugenden Instandhaltung ist es, das Ende dieser mittleren Periode möglichst lange aufzuschieben.

III. Während der *Endperiode* (ca. 20...25 % der totalen Brauchbarkeitsdauer) dominiert die Abnutzung wichtiger Konstruktionsteile infolge von Verschleiss, Alterung und Ermüdung (z.B. Leiterbrüche im Bereich der Erregerwicklung). In dieser Periode muss der Anstieg der momentanen Ausfallrate durch geeignete Instandhaltungsmassnahmen in annehmbaren Grenzen gehalten werden. Dazu sind alle Arbeiten der Wartung und Inspektion lückenlos weiterzuführen. Der Bereitstellung von Ersatzteilen kommt eine noch höhere Bedeutung zu als während der vorhergehenden Perioden. Schliesslich wird der Betrieb der Betrachtungseinheit mit fortschreitendem Betriebsalter unwirtschaftlich.

4. Aussergewöhnliche Beanspruchungen

Wie ausgeführt wurde, liefern Betriebsstörungen und Fehlhandlungen durch das Betriebspersonal während der gesamten Brauchbarkeitsdauer einen Beitrag zur momentanen Ausfallrate. Nach besonders schweren Störungen ist zu entscheiden, ob ein möglicher Schaden sofort abgeklärt werden muss, oder ob eine eingehende Untersuchung bis zur nächsten Revision aufgeschoben werden darf. Gegebenenfalls wird der Revisionstermin entsprechend angepasst.

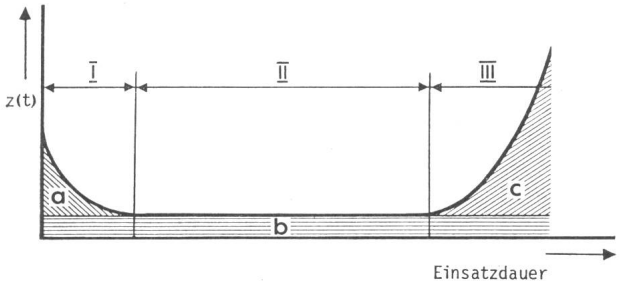

Fig. 1 Typischer Verlauf der momentanen Ausfallrate z(t)
Perioden der Brauchbarkeitsdauer:
I Anfangsperiode, mit Frühausfällen a und periodenunabhängigen Zufallsausfällen b
II Mittlere Periode, gekennzeichnet durch Zufallsausfälle b
III Endperiode, mit Verschleissausfällen c und periodenunabhängigen Zufallsausfällen b

Unzulässige Erwärmung einzelner Maschinenteile kann insbesondere durch folgende Störungen verursacht werden: Überlastung, Schieflast, Abweichung von der Nennfrequenz oder Nennspannung, Unterbrechung des Erregerkreises, einphasiger Lauf und Unterbrechung der Kühlwasserzufuhr ohne gleichzeitige Reduktion der Last. Dazu kommen Überdrehzahl, asynchrones Zuschalten, transiente Überspannungen und Kurzschluss in der Anlage.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass die Spannungsprüfung der Hochspannungswicklung, wie sie häufig im Rahmen der Revision vorgenommen wird, keinen nennenswerten Einfluss auf die Lebensdauer der Isolation hat, sofern diese betriebstüchtig ist. Zweck dieser Prüfung ist es, die bei der visuellen Kontrolle nicht erkennbaren Schwachstellen zu ermitteln (z.B. Isolationsfehler innerhalb der Statornut). Erfolgt während der Prüfung ein Durchschlag, so wird wegen der Begrenzung des Fehlerstromes das Statoreisen nicht beschädigt. Dagegen wären z.B. im Falle eines im Betrieb auftretenden doppelten Erdschlusses schwere Schäden am Stator zu erwarten. Ferner ist zu bedenken, dass die Reparatur beim plötzlichen Ausfall der Maschine wesentlich mehr Schwierigkeiten bereitet als im Rahmen einer geplanten Revision.

5. Grundsätzliches zur Brauchbarkeitsdauer

Im Bereich der elektrischen Maschinen ist die Brauchbarkeitsdauer kein streng gefasster Begriff. Vielmehr wird den einzelnen Konstruktionselementen eine Zeitspanne zugewiesen, innerhalb derer sie ihren Zweck erfüllen und nicht plötzlich versagen sollen. Wie am Beispiel von Dampfturbinenbauteilen gezeigt wurde [4], erreichen die einzelnen Bauteile die ihnen zugewiesene Dauer unter drei Voraussetzungen:

a. Die Betriebsweise und die Betriebsbedingungen entsprechen in der Praxis den bei der Auslegung zugrunde gelegten Bedingungen.

b. Die aus dieser Betriebsweise resultierenden Beanspruchungen können mit genügender Genauigkeit berechnet werden.

c. Das Verhalten der Werkstoffe unter den verschiedenen Betriebsparametern ist kurz- und langfristig bekannt.

Somit stellt sich die Frage, wie weit diese Voraussetzungen für Generatoren erfüllt sind.

a. Während der Projektierungsphase ist nur schwer abzusehen, in welchem Ausmass während der mittleren und späteren Betriebsperiode der Maschine Lastschwankungen auftreten werden. Unsicherheit liegt bisweilen auch in der Zahl der Starts und im dynamischen Verhalten des Fundamentes. Wichtig für den Grad der Beanspruchungen sind ferner der Umfang und die Qualität der Schutzeinrichtungen.

b. Die Höhe der mechanischen, elektrischen und thermischen Beanspruchungen kann heute wesentlich genauer ermittelt werden als noch vor einigen Jahren. Dies trifft beispielsweise für die Wickelköpfe, die Konstruktionselemente des Rotors und die Temperaturverteilung innerhalb der Maschine zu.

c. Neben der Qualität der Werkstoffe wurde auch die Kenntnis ihres Alterungsverhaltens wesentlich verbessert, z.B. der Einfluss von Schwingungsbeanspruchungen oder die Alterung der Hochspannungsisolation [5]. Andererseits wurden die älteren Maschinen im allgemeinen mit einer relativ grossen Sicherheitsmarge ausgelegt.

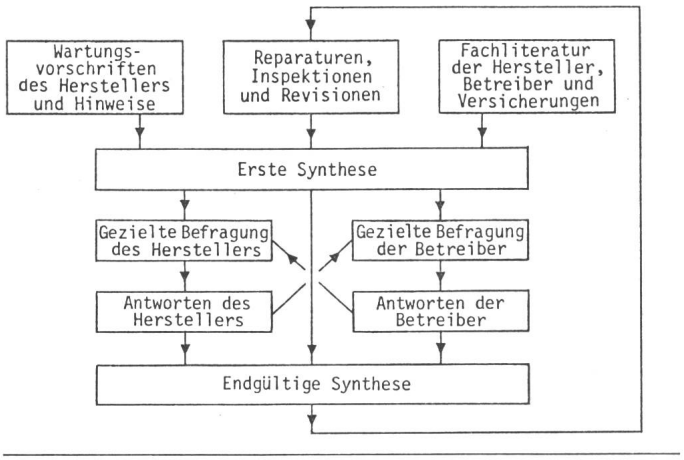

Fig. 2 Informationsfluss zur Planung der vorbeugenden Instandhaltung

Die Schätzung der Brauchbarkeitsdauer eines Generators kann daher zum Zeitpunkt seiner Auslegung nur innerhalb bestimmter Grenzen genau sein. Die Kenntnis der tatsächlichen Betriebsverhältnisse, der Einsatz von verfeinerten Berechnungsmethoden und vertiefte Werkstoffkenntnisse ermöglichen später laufend eine genauere Aussage. Daher sollten die Massnahmen zur vorbeugenden Instandhaltung auch nicht ein für allemal festgelegt werden, sondern im Gegenteil den jeweiligen Wissensstand reflektieren.

6. Notwendige Planungsunterlagen

Voraussetzung für eine gezielte Schadenverhütung ist in erster Linie, durch systematische Auswertung von möglichst vielen eingetretenen Schadensfällen echte Schadenschwerpunkte und deren Ursachen zu kennen. Wie am Beispiel der Schadenserfassung für Turbinen gezeigt wurde [6], erfordert die Erarbeitung brauchbarer Unterlagen einen grossen Aufwand. So müssen zur Beschreibung eines Fehlers oder eines Schadens der Ort, die Art, die Ursache, das Gewicht und die Abhilfe bekannt sein. Die in jenem Aufsatz angegebenen Ursachen lassen sich in die genannten Gruppen Betriebsweise, Technik und Werkstoffe gliedern.

Die Fachliteratur über Instandhaltungsfragen enthält sowohl Beiträge zur Strategie [1; 2; 7; 8] als auch Erfahrungsberichte und Empfehlungen zur praktischen Durchführung [1; 5; 9...18], wobei die Wartung der Statorwicklungen einen besonderen Schwerpunkt bildet.

Uecker und *Tillson* haben über die systematische Auswertung von Schäden an grossen Turbogeneratoren berichtet [7]. Aufgrund der Ergebnisse können dem Betreiber für eine bestimmte Maschine unter anderem folgende Angaben zur Verfügung gestellt werden: Schäden und Störungen an ähnlichen Generatoren, Empfehlungen zur vorbeugenden Instandhaltung und die Liste der notwendigen Reserveteile. Der mit der Instandhaltung betraute Ingenieur kann sich in diesem Fall auf eine umfassende Information stützen und seine eigenen Erfahrungen sowie die früheren und geplanten Betriebsverhältnisse berücksichtigen.

Im allgemeinen steht ihm jedoch die notwendige Information nicht in dieser Vollständigkeit zur Verfügung, sondern er muss sich an den Wartungsvorschriften orientieren, alle früheren Schadensfälle analysieren und die Fachliteratur auswerten. Das sich aus dieser Synthese abzeichnende Bild ist nicht unbedingt eindeutig und vollständig, es enthält vielmehr Widersprüche und wirft neue Fragen auf. Um die fehlenden Antworten sollte beim Hersteller und nach Möglichkeit auch bei Betreibern gleicher Generatoren nachgesucht werden. Eine *gezielte* Befragung wird wertvolle Hinweise z.B. zur Brauchbarkeitsdauer oder zur Möglichkeit der Beseitigung von Schwachstellen erbringen.

Wie die Erfahrung zeigt, ist die Erstellung einer vollständigen Liste spezifischer Fragen die Voraussetzung für wirklich aussagefähige Antworten. Diese sollen nicht nur den Fehler oder Schaden umfassend beschreiben, sondern auch darüber informieren, ob in der Folge irgendwelche Betriebsvorschriften geändert oder zusätzliche Kontrollmassnahmen eingeführt werden mussten, und ob die Gesamtheit der getroffenen Massnahmen das Problem endgültig beseitigt hat. Die aus diesem Informationsaustausch resultierenden Gesichtspunkte können weitere Präzisierungen von Seiten des Herstellers oder der Betreiber erfordern, bevor sich eindeutige Schlüsse ergeben (Fig. 2). Die endgültige Synthese wird sich von der ersten Version insbesondere durch die angemessene Berücksichtigung des Abnützungsverhaltens unterscheiden.

7. Schlussbemerkung

Bei der vorbeugenden Instandhaltung kommt dem Informationsaustausch zwischen Herstellern und Betreibern eine grosse Bedeutung zu. Einerseits muss sich der Betreiber auf die viel breitere Erfahrung des Herstellers stützen, und umgekehrt ist der Hersteller auf Informationen angewiesen, die grossenteils nur vom Betreiber gesammelt werden können. Daher ist das Interesse an der Weitergabe der Informationen beiderseitig.

Literatur

[1] Handbuch der Schadenverhütung. 2. Auflage. München/Berlin, Allianz-Versicherungs AG, 1976.
[2] *H.-J. Marx:* Entwicklungslinien der Instandhaltung. Maschinenschaden 50(1977)1, S. 1...7.
[3] *A. Birolini:* Qualitäts- und Zuverlässigkeitssicherung komplexer Systeme – Teil 2: Methoden. Bull. SEV/VSE 70(1979)5, S. 237...243.
[4] *A. Hohn:* Lebensdauer von Dampfturbinenbauteilen. VGB Kraftwerkstechnik 55(1975)8, S. 519...529.
[5] *R. Schuler:* Beurteilung des Wicklungszustandes von in Betrieb stehenden Wasserkraftgeneratoren. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich –(1979)34, S. 193...200.
[6] *H. Kramer, R. Schönefeld* und *W. Stodieck:* Anforderungen an eine einheitliche Schadenserfassung aus der Sicht der Turbinenhersteller. VGB Kraftwerkstechnik 53(1973)1, S. 44...50.
[7] *E.C. Uecker* and *E.A. Tillson:* Advanced naintenance planning applied to large steam turbine-generators. Schenectady/N.Y., General Electric Company; GER-2671.
[8] *R.F. Burris, W.K. Heilmann* and *C.V. Maughan:* Long-range maintenance planning for large steam turbine-generators. ASME Publication 75-PM-12.
[9] *H. Kugler:* Schäden an Turbogeneratoren. Maschinenschaden 45(1972)5, S. 179...188.
[10] *H. Kugler:* Schäden an Turbogeneratoren. Maschinenschaden 49(1976)6, S. 221...235.
[11] *O. Krauss:* Die Revision von Turbogeneratoren. Maschinenschaden 43(1970)6, S. 213...225.
[12] *O. Krauss:* Die Revision von Synchronmaschinen mit Schenkelpolläufern. Maschinenschaden 44(1971)4, S. 117...125.
[13] *H.J. Bohnstedt* und *J. Leopold:* Erfahrungen mit Wellenschwingungsmessungen an Turbomaschinen. Maschinenschaden 45(1972)5, S. 189...200.
[14] *R. Braun:* Entstehung, Beurteilung und Vermeidung von Staub in Turbogeneratoren. Maschinenschaden 42(1969)3, S. 91...93.
[15] *H.T. Teichmann:* Improved maintenance approach for large generator armature windings subject to insulation migration. IEEE PAS 92(1973)4, p. 1234...1238.
[16] *H. Teichmann:* Die Bedeutung von Verlustfaktormessungen bei der Wartung der Hochspannungswicklung von Turbogeneratoren. Bull. SEV/VSE 68(1977) 14, S. 710...713 + 69(1978)2, S. 90...92.
[17] *M. Warren* and *C.I. Butterworth:* A preventive maintenance program for hydroelectric generator windings. IEEE Trans. PAS 87(1968)5, p. 1283...1288.
[18] *K. Nylund* und *T. Mosimann:* Alterungsuntersuchungen an Statorwicklungen elektrischer Maschinen. Bull. SEV 58(1967)17, S. 810...818.
[19] *J. Grünenwald:* Massnahmen zur Erreichung hoher Verfügbarkeit und Revisionsfreundlichkeit bei Turbogeneratoren. Brown Boveri Mitt. 66(1979)6, S. 379...385.

Adresse des Autors

Hans Teichmann, M. Sc. (Engineering), La Levratte 22, 1260 Nyon.