

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 57 (1966)  
**Heft:** 5

**Artikel:** Schutz des Rotors von Grossgeneratoren durch elektrische Relais  
**Autor:** Kolar, A.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-916576>

### **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:** 10.01.2026

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

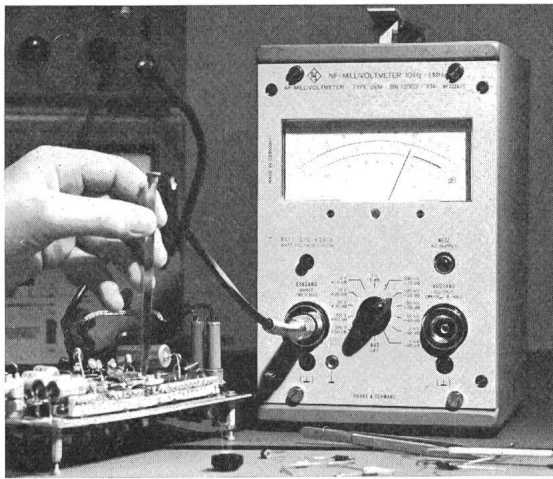


Fig. 3  
Volltransistorisiertes breitbandiges NF-Millivoltmeter UVN  
(10 Hz bis 1 MHz) für erdfreie Messungen

so muss die Bandbreite herabgesetzt werden. Dies führt zum selektiven Verstärker.

### 2.2 Selektive Verstärkung

Durch Herabsetzen der Bandbreite wird der Einfluss des Eigenrauschens des Verstärkers auf das Meßsignal wesentlich reduziert. Die Abnahme der Rauschspannung erfolgt proportional der Quadratwurzel aus dem Bandbreitenverhältnis. Die geringe Bandbreite bedingt jedoch, dass die Durchlassfrequenz des Verstärkers der Frequenz des Messsignals angepasst werden kann. Selektive Spannungsmesser sind daher meist als Überlagerungsempfänger aufgebaut, weil damit ein breiter Frequenzbereich überstrichen werden kann und weil andererseits durch Umsetzung auf eine tiefere Zwischenfrequenz eine genügende Selektion bei konstanter Bandbreite über den gesamten Bereich erreicht wird. Der Wert der Zwischenfrequenz oder auch mehrerer, hängt von der geforderten Selektion ab. Je geringer die Bandbreite sein soll, desto tiefer wird die Zwischenfrequenz liegen.

Prinzipiell gelten hinsichtlich des Rauschverhaltens dieselben Überlegungen wie bei der breitbandigen Verstärkung. Hinzu kommt noch, dass bei hohen Frequenzen sowohl beim Transistor, als auch bei der Röhre die Rauschanpassung anzustreben ist, um auf optimale Rauscheigenschaften zu gelangen. Ausserdem wird für Frequenzen oberhalb 30 MHz durchwegs

nur noch ein niedriger Eingangswiderstand in Frage kommen, um eine Anpassung an die Meßspannungsquelle zu ermöglichen. Dabei tritt jedoch der Fall auf, dass die Rauschanpassung und die Widerstandsanpassung nicht identisch liegen. Zugunsten einer besseren Widerstandsanpassung, um den Reflexionsfaktor niedrig zu halten, muss dann aber auf die optimale Rauschanpassung verzichtet werden.

Falls am Eingang des selektiven Verstärkers abgestimmte Kreise liegen, muss dabei noch das Rauschen des Schwingkreises beachtet werden. Da nur Ohmsche Widerstände als Rauschquellen in Frage kommen, tritt demzufolge nur an dem Verlustwiderstand des Kreises eine Rauschspannung auf. Als Rauschwiderstand des Schwingkreises ist somit der Resonanzwiderstand einzusetzen.

Am Beispiel der Röhreneingangsstufe mit einem äquivalenten Rauschwiderstand von  $250\ \Omega$  ergibt sich bei einer Rauschbandbreite von 1 kHz eine Rauschspannung von ca.  $0,06\ \mu\text{V}$ . Dazu kommt der Rauschanteil des elektronischen Eingangswiderstandes und eventuell des Schwingkreises am Eingang des Verstärkers, sowie bei geringer Verstärkung in der Eingangsstufe der Einfluss des Rauschens der nachfolgenden Stufe. Somit ergeben sich resultierende Rauschspannungswerte von  $0,1...0,2\ \mu\text{V}$  bezogen auf den Eingang des Verstärkers. Das bedeutet, dass mittels des selektiven Verstärkers bei einer Bandbreite von 1 kHz Spannungen bis herab zu  $1\ \mu\text{V}$  noch ohne allzu grosse Verfälschung durch überlagerte Störspannungen gemessen werden können.

Um noch niedrigere Wechselspannungen messtechnisch zu erfassen, muss die Bandbreite weiter reduziert werden. Das setzt natürlich bei einem Überlagerungsempfänger einen sehr stabilen Oszillator voraus und bedingt andererseits auch einen genau durchdachten und sauberen Aufbau des Messempfängers, um jegliche Fremdspannungseinstreuung zu verhindern. Die Grenze der messtechnisch noch erfassbaren Wechselspannungen dürfte bei  $0,1\ \mu\text{V}$  sein.

### Literatur

- [1] Das Rauschen von Röhre und Schaltung. Funktechnische Arbeitsblätter RÖ 81, Lieferung 6, Franzis-Verlag München, ohne Datum.
- [2] J. Schubert: Anwendung der Theorie rauschender Vierpole auf Transistoren bei Niederfrequenz. Die Telefunken-Röhre -(1960)33a, S. 5...42.

### Adresse des Autors:

Dipl.-Ing. Rudolf Mäusl, Rohde & Schwarz, Mühldorfstrasse 15,  
D-8 München 8.

## Schutz des Rotors von Grossgeneratoren durch elektrische Relais

Von A. Kolar, Zürich

621.313.12.043.3

*Der Artikel gibt einen Überblick über den heutigen Stand der Schutztechnik des Rotors von Grossgeneratoren. Nebst den klassischen werden zwei neue Schutzeinrichtungen besprochen: ein thermischer Asymmetrielastschutz und ein sehr rascher Asynchronlaufschutz. Abschliessend werden der Rückwattschutz für die Antriebsmaschine und die Überwachung der Lagerisolation behandelt.*

*L'auteur donne un aperçu de l'état actuel de la technique de la protection du rotor de grands alternateurs. Outre les équipements classiques de protection, il en décrit deux nouveaux: protection thermique en cas de charge asymétrique et protection très rapide contre une marche en asynchrone. Il termine en traitant de la protection de la machine d'entraînement contre un retour de puissance, ainsi que de la surveillance de l'isolement des paliers.*

### 1. Einleitung

In einem früheren Artikel [1]<sup>1)</sup> wurde der Schutz des feststehenden Teiles von Generatoren beschrieben. Vorliegender

Artikel ist dem Schutz der drehbaren Generatorteile gewidmet; demnach behandelt er den Schutz des Rotors, der mit ihm gekuppelten Antriebsmaschine, sowie — als Bindeglied zwischen den festen und beweglichen Generatorteilen — die Überwachung der Generatorlager.

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Die Gefährdungen des Rotors sind elektrischer und mechanischer Natur. Elektrisch wird er direkt durch Erdschlüsse und Unterbrüche im Erregerkreis betroffen. Durch die auf die drehenden Konstruktionsteile, im speziellen der Wicklung, wirkenden Fliehkräfte wird die Gefahr für das Auftreten von Fehlern vergrößert. Ein weiteres Gefahrenmoment stellen die Bürsten als Übergänge zwischen festem und drehenden Maschinenteilen dar.

Gewisse Fehlermöglichkeiten sind noch durch die induktive Kopplung mit den Statorwicklungen bedingt. Diese werden dann auch durch statorseitig an der Maschine angeordnete Schutz Einrichtungen erfasst. Solche sind der Asymmetrielast- und Asynchronlaufschutz.

Mechanische Gefährdungen treten insbesondere bei Überdrehzahlen auf. Nebst mechanisch wirkenden Schutz Einrichtungen gibt es dagegen auch solche, die nur nach elektrischen Kriterien arbeiten.

Eine besondere Stellung nimmt der Rückwattschutz ein: Er schützt die Antriebsmaschine und verhindert indirekt damit unzulässige Überdrehzahlen.

In allen nachfolgend gezeichneten Schaltungen können mit Vorteil steckbare Relais verwendet werden. Bei diesen sind alle Einstell-, Mess- und Ausgangsorgane des Relais in einem ausziehbaren Block zusammengefasst. Dadurch ergibt sich der Vorteil der leichten und raschen Zugänglichkeit bei Revisionen und eventuellen Auswechslungen der Relais, ohne dass Drahtverbindungen an den Anschlussklemmen gelöst werden müssen.

## 2. Schutz des Rotors

### 2.1 Thermischer Asymmetrielastschutz

Normalerweise sind die Generatorströme aller drei Phasen gleich gross und um  $120^\circ$  phasenverschoben. Sie bilden ein symmetrisches System. Tritt ein 1- oder 2poliger Kurzschluss oder Leitungsunterbruch auf, so wird das Stromsystem unsymmetrisch. Zerlegt man es nach der Theorie der symmetrischen Komponenten [2] in seine Bestandteile, dann findet man ein starkes Gegensystem. Dieses hat die gleiche Geschwindigkeit wie das Rotorfeld, jedoch entgegengesetzte Richtung. Derart erscheint es vom Rotor aus gesehen wie ein mit doppelter Netzfrequenz relativ zu ihm rotierendes System. Es induziert in die massiven Rotorteile Wirbelströme, die diese bei längerem Einwirken unzulässig erwärmen können.

Wird der Strom des Gegensystemes mit  $I_2$  bezeichnet, so gilt [3] bei grösseren Unsymmetrien für die thermische Gegenstromkapazität  $k$  des Rotors die Beziehung:

$$k = I_2^2 t$$

Dabei ist  $I_2$  im «per unit-System» angegeben;  $t$  bedeutet die Zeit in Sekunden,  $k$  eine vom Maschinentyp abhängige Konstante, die bei Maschinen herkömmlicher Bauart zwischen 7 und 60 liegt. Obige Beziehung besagt, dass z. B. ein Turbogenerator bei  $k = 30$  während 30 s mit einem Gegenstrom gleich dem vollen Nennstrom der Maschine belastet werden kann. Für kleinere Unsymmetrien stimmt die angegebene Beziehung nicht, da Generatoren dauernd mit etwa 20...40% Gegenkomponente belastet werden können.

Für den Asymmetrielastschutz wird allgemein die Gegenkomponente des Stromes durch geeignete Filterelemente ausgesiebt und einem Relais zugeführt, wobei nach herkömmlichen Methoden das Relais nur mit einer fixen, von der Grösse der Gegenstromkomponente unabhängigen Zeitverzögerung

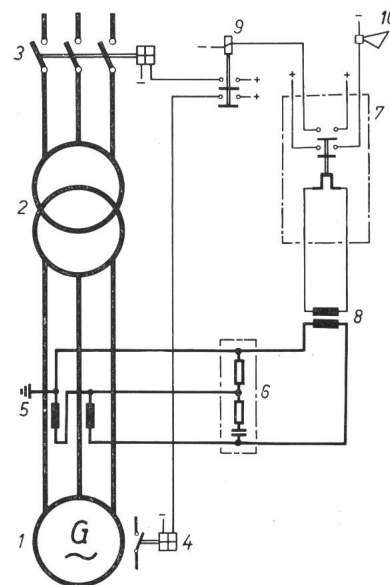


Fig. 1

#### Thermischer Asymmetrielastschutz

- 1 Generator; 2 Transformator; 3 Leistungsschalter; 4 Entregungsschalter; 5 Stromwandler; 6 Gegenkomponentenfilter; 7 thermisches Asymmetrielastschutzrelais; 8 Anpasswandler; 9 Auslöseschutz; 10 akustisches Signal

arbeitet. Eine wesentliche Verbesserung lässt sich durch die Verwendung eines Thermorelais erzielen. Fig. 1 zeigt die prinzipielle Lösung eines solchen thermischen Asymmetrielastschutzes.

Dem thermischen Asymmetrielastschutzrelais 7 wird ein dem Gegenstrom proportionaler Strom zugeführt. Dieser wird durch das Gegenstromfilter 6 gewonnen. Das Filter hat zwei Zweige, einen rein Ohmschen und einen RC-Zweig, der eine Impedanz mit einem Winkel von  $60^\circ$  elektrisch darstellt. Tritt ein reines Mitsystem der Ströme auf, so ist die Spannung am Filterausgang null, weil die Teilspannungen über die Filter-

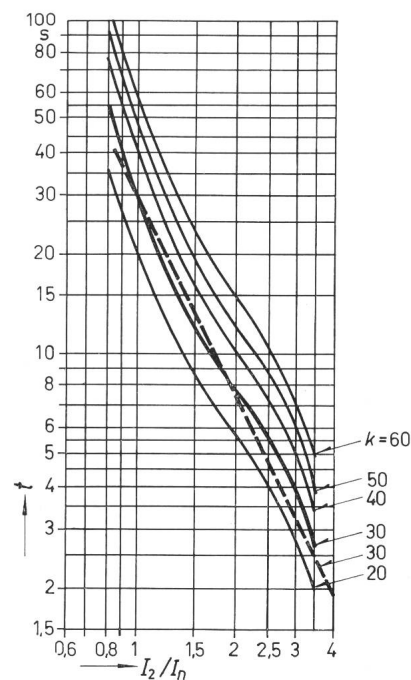


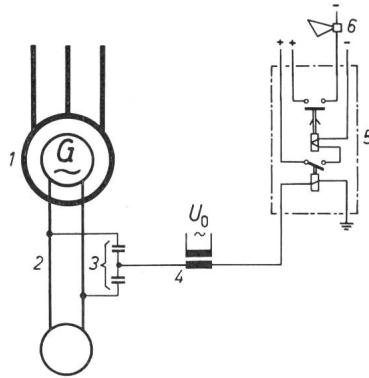
Fig. 2

- Auslösekenntlinien des thermischen Asymmetrielastschutzes  
 — — — Generatorkennlinie; — — — Relaiskennlinien  
 $I_2$  Gegenkomponente;  $I_n$  Nennstrom des Generators;  $t$  Zeit;  
 $k$  Maschinenkonstante

Fig. 3

**Rotorerdschlussüberwachung**

1 Generator; 2 Erregerkreis; 3 Kondensatoren; 4 Zwischenwandler; 5 Rotorerdschlussrelais mit verzögertem Steuerschutz; 6 akustisches Signal;  $U_0$  Wechselspannungsquelle



zweige gleich gross und in Gegenphase sind. Tritt ein Gegensystem auf, so wird die Teilspannung über das RC-Glied um  $120^\circ$  elektrisch gegenüber obigem Fall gedreht. Als Ausgangsspannung des Filters erscheint das  $1/\sqrt{3}$ -fache der Teilspannung. Dadurch wird nur bei Auftreten eines Gegenstromes eine diesem proportionale Filterausgangsspannung gewonnen und dem Relais zugeführt.

Die erreichbaren Relaiskennlinien im Vergleich mit den idealisierten Kennlinien des Generators zeigt für ein  $k = 20 \dots 60$  Fig. 2.

Durch die stromabhängige Auslösecharakteristik des Relais ist durchwegs eine volle Ausnutzung der thermischen Gegenstromkapazität des Generators ohne Gefährdung desselben möglich. Vor allem bei intermittierenden Gegenstrombelastungen wie bei Gewittern mit wiederholten Blitzeinschlägen ist dies der Fall. Die nach der bisherigen Methode verwendeten Maximalstromrelais mit Zeitverzögerung konnten durch das Fehlen eines «thermischen Gedächtnisses» den Rotor nicht schützen.

**2.2 Rotorerdschlussüberwachung**

Ein Rotorerdschluss einer Maschine hat keine direkten Folgen. Da jedoch ein zweiter Rotorerdschluss zum Doppelerdschluss mit seinen kurzschlussartigen Auswirkungen führt, ist eine Überwachung auf Rotorerdschluss notwendig.

In der Schaltung nach Fig. 3 wird eine Hilfswechselspannung  $U_0$  über einen Zwischenwandler 4 und die Kondensatoren 3 dem Erregerkreis zugeführt. Zwischen der Sekundärwicklung des Zwischenwandlers und der Masse (Erde) ist ferner das Rotorerdschlussrelais 5 geschaltet. Tritt irgendwo im Erregerkreis ein Schluss gegen Masse (Erde) auf, so kann im Sekundärkreis des Zwischenwandlers 4 und damit durch die Spule des Relais ein Strom fließen, der es zum Ansprechen bringt. Die Kondensatoren haben den Zweck, die Gleichspannung vom Relaiskreis fernzuhalten. Sie sind in Brückenschaltung angeordnet und die Wechselspannung wird in ihrer Mitte zugeführt. Der Erregerkreis liegt von diesem Mittelpunkt aus gesehen erdsymmetrisch. Dadurch wird verhindert, dass transiente Störungen, zufolge z. B. schneller Erregungsvorgänge oder vom Stator her induzierter Wechselspannungen, an das Rotorerdschlussrelais gelangen. Das Relais wird normalerweise mehrere Sekunden verzögert, da es nur auf die Signalisierung zu wirken braucht. Der Schutzbereich der Rotorerdschlussüberwachung ist 100%, d. h. er umfasst den ganzen Rotorkreis: die Wicklung selber und alle mit ihr galvanisch verbundenen Kreise wie Bürsten und eine eventuelle Erregermaschine.

Zum Schutz gegen Doppelerdschlüsse im Rotor können auch Vibratometer [4] herangezogen werden. Sie benutzen als Kriterium die dabei auftretende asymmetrische Kraftverteilung der Zugkraft der Rotorpole. Diese rotiert mit der Rotordrehzahl und führt zu schweren Vibrationen.

**2.3 Überwachung gegen Ausfall der Erregung**

Der Erregerkreis einer Synchronmaschine kann durch unbeabsichtigtes Öffnen des Magnetfeldschalters, Bürstendefekte und andere Ursachen unterbrochen werden. Die Maschine verliert damit ihre Regelfähigkeit bezüglich Blindleistung und Klemmenspannung. Sie wird versuchen, ihren notwendigen Magnetisierungsstrom aus dem Netz zu beziehen. Bei einem starken Netz kann einer Schenkelpolmaschine dies vorübergehend gelingen. Bei allen Schwankungen des Blindleistungsbedarfs des Netzes wird sie aber träge reagieren und bald ausser Tritt fallen. Bei einem schwachen Netz oder falls es sich um einen Turbogenerator handelt, fällt sie praktisch sofort ausser Tritt. Nebst den Auswirkungen auf das Netz tritt hierbei eine Induktion von Wirbelströmen mit Schlupffrequenz im Rotor auf, die diesen thermisch, und bei Unterbruch im Polradkreis die Erregerwicklung spannungsmässig gefährdet. Die nachfolgend beschriebenen Schutzeinrichtungen für Überwachung der Erregerkreise erfassen diesen Störfall entweder von der Rotor- oder der Statorseite her.

**2.3.1 Rotorseitige Erfassung des Unterbruches im Erregerkreis; Maschine mit Haupt- und Hilfsreger**

Die Überwachung erfolgt getrennt für den Haupt- und den Hilfsregerkreis vor und hinter dem Spannungsregler.

Der Haupterregerkreis (Fig. 4) wird durch ein Maximalwiderstandsrelais 9 überwacht. Die Verwendung eines Minimalstromrelais ist hier und hinter dem Regler im Hilfsregerkreis nicht möglich, da der Erregerstrom bei Schenkelpolmaschinen betrieblich negativ und damit auch null werden kann. Dem Maximalwiderstandsrelais werden Strom und Spannung zugeführt. Die Spannung wirkt in Auslöserichtung des Relais und der Strom in entgegengesetzter Richtung.

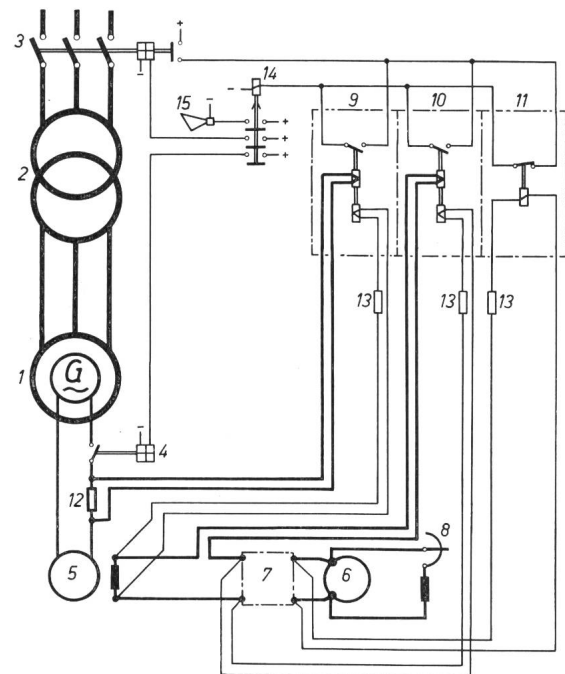


Fig. 4

**Schutz gegen Unterbruch im Erregerkreis: Generator mit Haupt- und Hilfsregerkreis**

1 Generator; 2 Transformator; 3 Leistungsschalter; 4 Magnetfeldschalter; 5 Haupterregemaschine; 6 Hilfserregemaschine; 7 Spannungsregler; 8 Erregerkreis der Hilfsregermaschine; 9 Relais für Überwachung des Haupterregerkreises; 10 Relais für Überwachung des Hilfsregerkreises; 11 Minimalspannungsrelais; 12 Shunt; 13 Vorwiderstand; 14 zeitverzögertes Auslöseschütz; 15 akustisches Signal

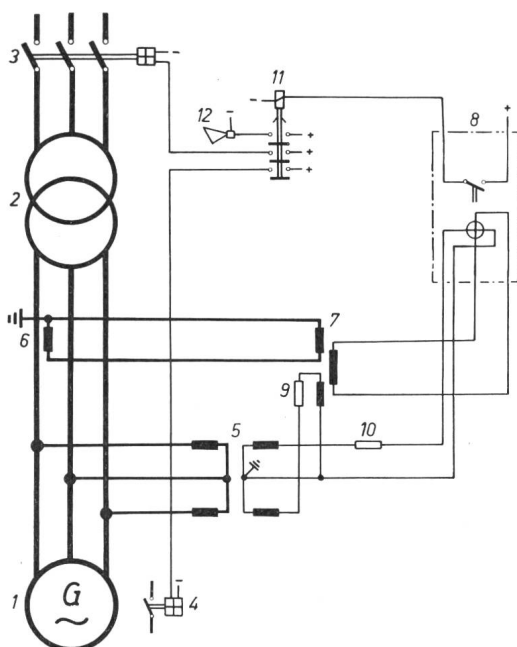


Fig. 5  
**Erregungsausfallschutz**  
 Statorseitige Erfassung  
 1 Generator; 2 Transformator; 3 Leistungsschalter; 4 Magnetfeldschalter; 5 Spannungswandler; 6 Stromwandler; 7 Zwischenwandler; 8 Erregungsausfallschutzrelais; 9, 10 Widerstand; 11 Auslöseschütz; 12 akustisches Signal

Wegen der beträchtlichen Grösse des Haupterregerstromes von einigen Hundert bis Tausend Ampère wird der Strom dem Shunt 12 entnommen. Statt der Klemmenspannung des Haupterregers wird normalerweise die Spannung der Erregerwicklung, die der Spannung des Haupterregers proportional ist, dem Relais zugeführt. Dies bietet den Vorteil, dass auch Unterbrüche in der Wicklung des Haupterregers erfasst werden. Der Kontakt des Schutzrelais betätigt ein zeitverzögertes Auslöseschütz 14. Dessen Ablaufzeit beträgt mehrere Sekunden. Dies ist wegen der transienten Vorgänge im Haupterregerkreis und der Zeitkonstanten der Maschine notwendig, die während längerer Zeit dem Relais einen Unterbruch des Stromes vortäuschen können.

Im Hilfererregerkreis wird ebenfalls ein Maximalwiderstandsrelais 10 verwendet. Unterschiedlich zum Relais 9 kann ihm der Erregerstrom meist direkt zugeführt werden, was an dem ausziehbaren Relais einen Kurzschliesskontakt an den Stromklemmen bedingt. Die Spannung wird vom Ausgang des Spannungsreglers 7 abgenommen.

Da das Maximalwiderstandsrelais 10 den Ausfall der Hilfererregerspannung oder einen Unterbruch im oder vor dem Spannungsregler 7 nicht erfassen kann, misst ein Minimalspannungsrelais 11 die — ungefähr konstante — Klemmenspannung des Hilfererregers.

Die Feldzeitkonstante des Haupterregers ist normalerweise kleiner als die des Generators. Daher können die Verzögerungszeiten der Relais 10 und 11 kürzer als diejenige von 9 gewählt werden.

Um beim Hochfahren des Generators und während des Synchronisierens ein fehlerhaftes Auslösen der Schutz Einrichtung (insbesondere des Minimalspannungsrelais 11) zu vermeiden, wird die Steuerspannung über einen Hilfskontakt des Leistungsschalters 3 zugeführt. Die Inaktivierung der Schutz Einrichtung während des Synchronisierens ist bedeutungslos,

da eine Unterbrechung im Erregerkreis zufolge Ausbleibens der Generatorklemmenspannung durch die Synchronisierungseinrichtung selbst erfasst wird.

Bei Generatoren mit Transduktor-Spannungsregler sind die hohen Welligkeiten der Erregerspannungen zu beachten. Dies bedingt eine entsprechende Glättung im Spannungskreis.

Bei Maschinen mit Gleichrichter- oder Thyristorerregung [5] erhält die Erregerwicklung des Generators einen aus einer Mehrphasengleichrichtung stammenden Strom zugeführt. Für die Schutzeinrichtung gegen Unterbruch im Erregerkreis ergibt sich als Besonderheit analog wie bei der Transduktorerregung eine notwendige Glättung im Spannungskreis des Überwachungsrelais. Im Falle der Thyristorerregung ist diese speziell kräftig auszubilden, da hier mit Phasenanschnittsteuerung gearbeitet werden kann.

### 2.3.2 Statorseitige Erfassung des Ausfalls der Erregung

Da ein Generator bei Ausfall der Erregung den notwendigen Magnetisierungsstrom aus dem Netz bezieht, kann durch Messung des aufgenommenen Blindstromes der fehlerhafte Betriebszustand festgestellt werden. Weil der Magnetisierungsstrom des Generators der Spannung direkt proportional ist, wird der Strom nicht direkt gemessen, sondern mit einem der Spannung proportionalen Bezugsstrom verglichen.

Das Prinzip lässt sich für alle Erregungssysteme durchwegs anwenden, wenn der Generator nur mit positiver Erregung betrieben wird, was beim Turbogenerator durch die Gleichheit der Quer- und Längsreaktanzen aus Stabilitätsgründen grundsätzlich der Fall ist. Für Schenkelpolgeneratoren, die auch mit negativer Erregung stabil arbeiten können, ist bei einem solchen Betriebsfall dieses Prinzip nicht anwendbar.

Die grundsätzliche Schaltung zeigt Fig. 5. Dem Zwischenwandler 7 wird einerseits der Strom einer Phase und andererseits, über einen Widerstand 9 ein Strom proportional zur verketteten Spannung zugeführt. An der Sekundärseite des Wandlers erscheint die Differenz dieser Grössen. Diese Differenz erhält das Relais als Messgrösse. Als Messrelais wird wegen seiner bekannten Vorteile [1] allgemein ein Ferraris-Relais verwendet. Durch geeignete Wahl der Polarisierungsspannung des Relais und Abgleich der Phasenlage des Polarisierungsstromes mit dem Widerstand 10 wird die Messlage derart festgelegt, dass bei unzulässig grosser Magnetisierungsstromaufnahme die Auslösung erfolgt. Der Auslösewert wird mit Hilfe des Widerstandes 9 eingestellt.

Wegen transienter Vorgänge, bedingt zum Beispiel durch Schaltvorgänge im Netz, muss die Relaisauslösung etwa entsprechend der transienten Zeitkonstante des Generators verzögert werden.

### 2.4 Asynchronlaufschutz

Die im vorhergehenden Abschnitt angegebenen Schutzmethoden erfassen indirekt auch einen Asynchronlauf des Generators, sofern dessen Ursache ein Unterbruch im Erregerkreis ist. Wegen ihres einfachen Messprinzips haben sich diese Schutzmethoden weitgehend durchgesetzt und können als klassische Methoden betrachtet werden. Ihr Hauptnachteil ist jedoch die lange Auslösezeit, die etwa 0,5 s (statorseitige Fehlererfassung) bzw. 8...10 s (rotorseitige Fehlererfassung) betragen kann. Die nachfolgend beschriebene neuartige Schutz Einrichtung vermeidet diesen Nachteil, auch im Vergleich zu anderen, bekannten Schutz Einrichtungen gegen Asynchronlauf [6]. Sie beruht auf dem Kriterium, dass die



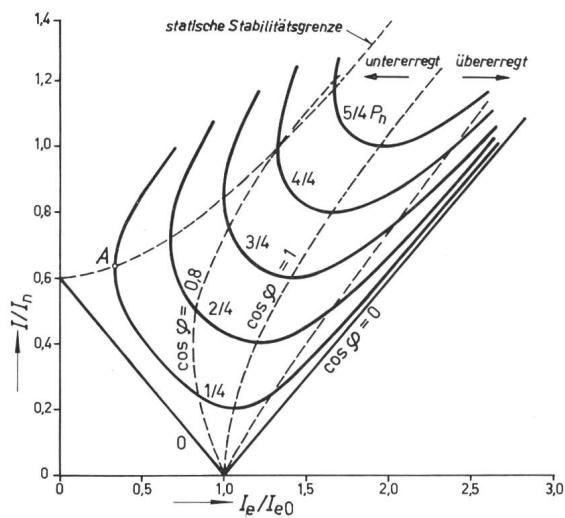


Fig. 6  
V-Kurven der Synchronmaschine

$P_n$  Nennwirkleistung;  $I$  Maschinenstrom;  $I_n$  Nennstrom der Maschine;  $I_e$  Erregerstrom;  $I_{e0}$  Leerläufererregstrom; A statischer Stabilitätsgrenzpunkt bei  $1/4 P_n$

maximale Wirkleistung, die der Generator im statischen Betrieb abgeben kann, durch den Erregerstrom eindeutig bestimmt ist.

Zur Erläuterung des Prinzips wird von den V-Kurven der Synchronmaschine (Fig. 6) ausgegangen. Diese zeigen den Zusammenhang zwischen dem Statorstrom  $I$  und dem Erregerstrom  $I_e$  mit der Wirkleistung  $P$  als Parameter; die Klemmenspannung der Maschine ist hierbei konstant. Um bei gegebener Wirkleistung und Spannung einen stabilen Betrieb zu erreichen, ist ein gewisser minimaler Erregerstrom  $I_{e \min}$  erforderlich. Für z. B. ein Viertel der Nennwirkleistung beträgt  $I_{e \min} \approx 0,4 I_{e0}$  (Schnittpunkt A in Fig. 6). Die minimalen Werte des Erregerstromes  $I_{e \min}$  bestimmen die statische Stabilitätsgrenze. Oberhalb von ihr ist nur durch zusätzliche Einrichtungen, wie z. B. durch polradwinkelabhängige Zusatz- Erregung, ein stabiler Betrieb möglich [7].

Wird der Relativwert  $I_{e \min}/I_{e0}$  in Funktion zum Relativwert  $P/P_n$  aufgetragen, so ergibt dies für Vollpol- und Schenkelpolmaschinen die in den Figuren 7a und 7b dargestellten Kurven. Wegen der verschiedenen magnetischen Leitfähigkeiten von Längs- und Querachse können Schenkelpolmaschinen auch im unerregten Zustand eine bestimmte Leistung ( $P_0$  in Fig. 7b), Reaktionsleistung genannt, übertragen.

Die messtechnische Ausnutzung dieses Zusammenhanges zeigt die Schaltung nach Fig. 8. Der eigentliche Vergleich zwischen Wirkleistung und Erregerstrom erfolgt im Zwischenstromwandler 7 und Relais 8. Vom Stromwandler 3 wird der ersten Primärwicklung des Wandlers 7 der Maschinenstrom  $I$  zugeführt. Die zweite Primärwicklung wird von den Arbeitswicklungen 6c eines stromsteuernden Transduktors 6 gespeist. Die Sekundärseite von 7 speist ein Ferrarisrelais 8. Zuzufolge Polarisierung mit der dem Strom gegenüberliegenden verketteten Spannung über ein RC-Glied 9 ist der Phasenwinkel des Spannungspfad  $0^\circ$ ; dadurch sind bei  $\cos \varphi = 1$  des Generators die Ströme in den beiden Meßsystemen des Relais um  $90^\circ$  verdreht, das Ferrarisrelais hat dadurch maximales Drehmoment, und misst somit die Wirkleistung.

Durch seine ersten Steuerwicklungen 6a arbeitet der Transduktor als Gleichstromwandler: der Erregerstrom  $I_e$  wird in einen proportionalen Wechselstrom  $i_W$  umgewandelt.

Da die Lastwicklung des Transduktors eine Drosselspule darstellt, eilt der Wechselstrom um  $90^\circ$  der Spannung an der Lastwicklung nach. Da als Speisespannung in Fig. 8 die verkettete Spannung zwischen den Aussenphasen genommen wird, ist der Strom in der Lastwicklung in Phase zu einem Wattstrom der Mittelphase. Derart kann im Zwischenstromwandler 7 das Gleichgewicht zwischen Wirkleistung und Erregerstrom praktisch auf die Bildung einer arithmetischen Stromdifferenz zurückgeführt werden.

Für Schenkelpolmaschinen ist der Transduktor mit einer zweiten Steuerwicklung 6b versehen. Diese wird von der Spannung über einen Gleichrichter 10 und einen Widerstand 11 gespeist. Durch diese Vormagnetisierung ist bei Erregerstrom null der Laststrom des Transduktors  $i_W$  ungleich null. Dadurch wird das Reaktionsmoment der Schenkelpolmaschine nachgebildet.

Bei Turbogeneratoren entfällt die Vormagnetisierung.

Die beschriebene Schutzvorrichtung gestattet praktisch eine momentane Erfassung des Asynchronlaufens, da Erregerstrom und Wirkleistung nur über die relativ kurze subtransiente Zeitkonstante miteinander gekoppelt sind. Insbesondere kann somit jeder mit einem Aussertrittfallen der Maschine verbundene Unterbruch sehr rasch erfasst werden. Damit ist diese «V-Kurvenmethode» der klassischen «Maximalwiderstandsmessmethode» überlegen.

## 2.5 Überdrehzahlenschutz

Überdrehzahlen können zur vollständigen Zerstörung der Generatoren und der Antriebsmaschine führen. Der damit notwendige Überdrehzahlenschutz erfolgt stets mit mechanischen Schutzvorrichtungen. Wegen der Schwere der Fehlerfolgen bei einem Defekt wird aus Reserveschutzgründen oft eine zusätzliche, unabhängige Einrichtung gewünscht.

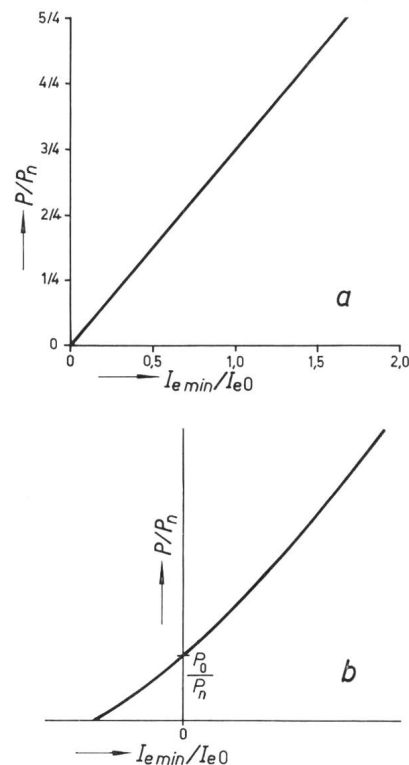


Fig. 7

Minimaler relativer Erregerstrom eines Turbogenerators (a) bzw. einer Schenkelpolmaschine (b) in Funktion der relativen Wirkleistung  $P$  Wirkleistung;  $P_n$  Nennwirkleistung;  $P_0$  Wirkleistung bei Erregerstrom null;  $I_{e \min}$  minimal zulässiger Erregerstrom;  $I_{e0}$  Leerläufererregstrom

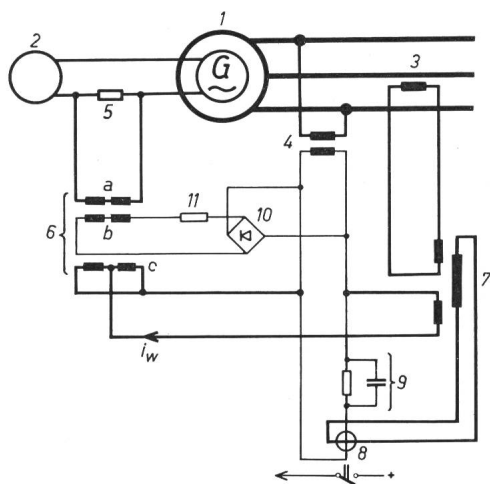


Fig. 8

#### Asynchronlaufschutz eines Generators

1 Generator; 2 Erregermaschine; 3 Stromwandler; 4 Spannungswandler; 5 Shunt; 6 stromgesteuerter Transduktor: a 1. Steuerwicklung, b 2. Steuerwicklung, c Lastwicklung; 7 Zwischenstromwandler; 8 Ferrarisrelais; 9 Abgleichimpedanz; 10 Gleichrichter; 11 Widerstand;  $i_w$  Laststrom des Transduktors

Der normale Überspannungsschutz des Generators ist hierfür ungeeignet, da wegen der Schnelligkeit von modernen Spannungsreglern ein Durchbrennen des Generators nicht unbedingt mit einer proportionalen Erhöhung der Klemmenspannung verbunden ist. Am zweckmässigsten erfolgt der Reserveschutz durch die Überwachung der Spannung eines separaten Tachodynamos mit einem normalen Überspannungsrelais. Bei einer unzulässigen Überdrehzahl veranlasst es eine entsprechende Schalthandlung. Der gleiche Tachodynamo kann auch für weitere Steuerrelais (Synchronisierfreigabe, Einsetzen der elektrischen Bremsung usw.) verwendet werden.

### 3. Schutz des Antriebes: Rückwattschutz

Wird beim Antrieb eines Generators die Zufuhr des Antriebsmittels (Wasser, Dampf, Gas usw.) abgestellt und die Maschine vom aktiven, gespeisten Netz nicht abgetrennt, so

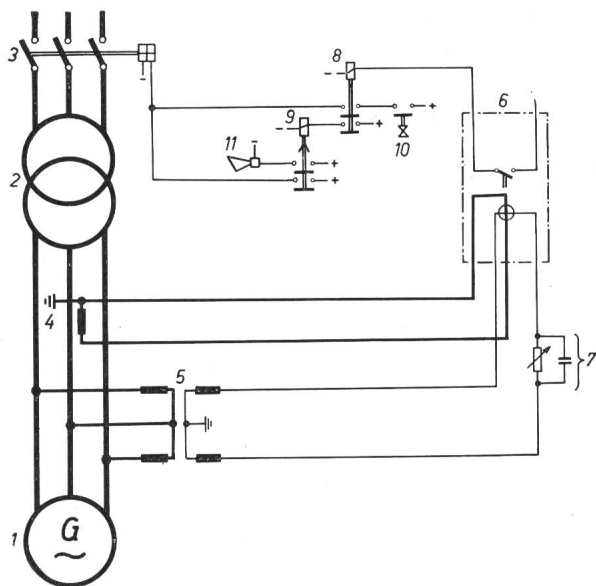


Fig. 9

#### Zweistufiger Rückwattschutz

1 Generator; 2 Transformator; 3 Leistungsschalter; 4 Stromwandler; 5 Spannungswandler; 6 Rückwattschütz; 7 Abgleichimpedanz; 8 Auslöseschütz, unverzögert; 9 Auslöseschütz, zeitverzögert; 10 Hilfskontakt des Dampfventils. Geschlossen bei gesperrter Dampfzufuhr; 11 akustisches Signal

läuft der Generator als Motor: er gibt mechanische Leistung ab und zwar vor allem zur Kompensation von mechanischen Verlusten, wie Lager-, Schaufelreibungsverluste usw. Tritt dieser Zustand längere Zeit auf, so kommt es bei bestimmten Typen von Wasserkraftgeneratoren zu gefährlichen Kavitationen an den Turbinenschaufeln, bei Dampfturbinenantrieb zu unzulässigen Gehäuseerwärmungen der Turbine zufolge des Restdampfes und bei den Dieselmotoren zur Explosion der Antriebsmaschine.

Weiter ist der Generator samt Antrieb dadurch gefährdet, dass bei einem Abtrennen vom gespeisten Netz ohne gleichzeitiges Abstellen der Zufuhr des Antriebsmittels durch die plötzliche mechanische Entlastung die Maschine zum Durchbrennen neigt. Deshalb wird vor allem bei Dampf- und Gas-

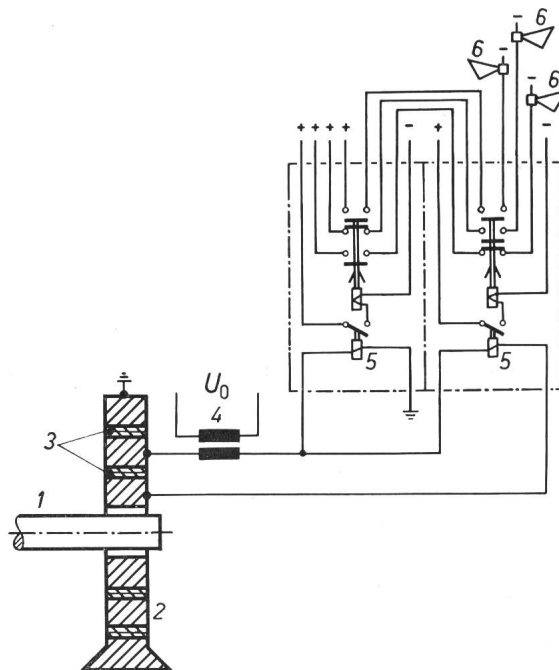


Fig. 10

#### Überwachung der Lagerisolation von Generatoren

1 Generatorwelle; 2 Generatorlager; 3 Isolierschichten; 4 Isoliertransformator; 5 Maximalspannungsrelais mit Zeitschütz; 6 akustisches Signal;  $U_0$  Hilfswechselspannung

turbinenantrieb bei allen Abschaltungen betriebsmässiger Natur stets zuerst die Dampf- bzw. Gaszufuhr gesperrt und nachher erst die Maschine vom Netz abgetrennt. Eine Ausnahme bilden hier nur schwere interne Fehler (z. B. Kurzschlüsse im Generator), wo dem Risiko der elektrischen Zerstörung das der mechanischen gegenübersteht; hier hat sich in der Praxis die gleichzeitige Befehlsgabe an Leistungsschalter und Turbinenschnellschluss bewährt.

Beide beschriebenen Fälle werden durch eine einzige Schutz-ausrüstung mit zwei getrennten, in ihren Abschaltzeiten verschiedenen Auslösekreisen gemäss Fig. 9 erfasst. Als Schutzrelais dient ein Ferrarisrelais, das vom Phasenstrom und der gegenüberliegenden verketteten Spannung gespeist wird. Durch eine Abgleichimpedanz 7 wird erreicht, dass es nur auf die zurückfliessende Leistung reagiert. Die Abgleichimpedanz hat einen Einstellwiderstand, mit dessen Hilfe die Messlage der Relais derart geändert werden kann, dass Stromwandlerfehler kompensierbar sind. Das Relais betätigt ein unverzögertes Steuerschütz 8 mit zwei Kontakten: der erste wirkt auf ein zeitverzögertes Steuerschütz, das gemäss dem 1. Abschnitt direkt die Abschaltung des Generators veranlasst, der

zweite über einen Hilfskontakt des Schnellschlussventils ebenfalls auf den Leistungsschalter; bei gesperrter Dampfzufuhr ist dieser Kontakt geschlossen und ermöglicht nach dem 2. Abschnitt das momentane Öffnen des Leistungsschalters.

Bei grossen Turbogeneratoren, die durchwegs mit Wasserstoffkühlung ausgeführt werden, betragen die Leistungsverluste der Maschinengruppe etwa 0,6...0,7% der Nennleistung, so dass in der Praxis Rückwattrelais mit einer Empfindlichkeit von 0,5% verwendet werden.

#### 4. Lagerisoliationsüberwachung

Durch magnetische Unsymmetrien können zwischen der Rotorwelle und den Lagerschalen von Generatoren Spannungen entstehen. Sie können auch ein Durchschlagen des Ölfilms ermöglichen. An den Überslagstellen kommt es in solchen Fällen [8] zu Lagerperforationen und Anfressungen. Derart beschädigte Lager müssen mit der Zeit ausgewechselt werden.

Ein Schutz gegen solche Lagerbeschädigungen wird durch konstruktive Massnahmen erzielt. Beim Generator wird das Lager auf einer Seite gegen Erde doppelt isoliert, womit Durchschläge mit Sicherheit verhindert werden und auch eine Überwachung der Isolierschichten auf Durchschlag möglich ist. In der Schaltung nach Fig. 10 wird ähnlich wie beim Rotorerdschlußschutz (s. Abschnitt 2.2) über jede der beiden Isolierschichten des Lagers mittels eines Isoliertransformators 4 eine kleine Hilfswechselspannung  $U_0$  gelegt. Zu ihr in Serie ist je ein Maximalstromrelais 5 geschaltet. Wird eine

der Isolierschichten durchgeschlagen, so melden die Relais, nach der am eingebauten Steuerschutz eingestellten Anzugsverzögerung, welche der Isolierschichten durchgeschlagen wurde.

Durch die Zweischichtisolationen wird selbst bei Durchschlagen einer Schicht noch die Isolation des Lagers gewährleistet; dadurch ist eine maximale Sicherheit gegeben. Die Maschine braucht im Defektfall nicht sofort aus dem Betrieb genommen zu werden, sondern man kann Stillstandszeiten für die Reparatur abwarten.

#### Literatur

- [1] A. Kolar: Schutz des Stators von Grossgeneratoren durch elektrische Relais. Bull. SEV 56(1965)24, S. 1074 ... 1084.
- [2] R. Roeper: Kurzschlußströme in Drehstromnetzen. Siemens-Schuckertwerke, Erlangen 1957.
- [3] J. E. Barkle und W. E. Glassburn: Protection of Generators against Unbalanced Currents. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 72(1953)—, S. 282...286.
- [4] H. A. Baumann, J. M. Driscoll, P. T. Onderdonk and R. L. Webb: Protection of Turbine Generators and Boilers by Automatic Tripping. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 72(1953)—, S. 1248...1260.
- [5] R. Schacher: Entwicklungstendenzen bei der Spannungsregelung von Synchrongeneratoren. Bull. Oerlikon —(1964)357/358, S. 8...12.
- [6] W. Horn und H. Witte: Assynchronlaufschutz. AEG-Mitt. 54(1964)3/4, S. 234...238.
- [7] P. Lauper: Moderne Spannungsregler für Synchrongeneratoren. Industr. Forschung 7(1962)2, S. 1...6.
- [8] O. Haus: Wellenspannung und Lagerströme, ihre Ursache, Wirkung und Abhilfemassnahmen. ETZ-A 85(1964)4, S. 106...112.

#### Adresse des Autors:

A. Kolar, Ingenieur der Maschinenfabrik Oerlikon, Postfach, 8050 Zürich.

## Vermeidung von unzulässig hohen Kaltspannungen zwischen Gitter und Kathode bei Längsröhren in stabilisierten Netzgeräten

Von E. Matt, Ulm/Donau

621.316.722.1

### 1. Prinzipieller Aufbau von stabilisierten Netzgeräten

Zur Stabilisierung von Gleichspannungen mittels Verstärkerröhren benützt man gewöhnlich zwei Verstärkerstufen, und zwar eine Längsstufe (Stabilisierungsröhre) und eine Querstufe (Regelverstärker). Fig. 1a und b zeigen die Prinzipschaltungen, wie sie üblicherweise verwendet werden.  $G1$  ist dabei der Gleichrichter mit dem Innenwiderstand  $R_G$ ,  $Rö 1$  die Längsröhre,  $Rö 2$  die Regelröhre,  $U_v$  die Vergleichsspannung,  $U_1$  die Gleichrichterspannung und  $U_2$  die stabilisierte Spannung. Üblicherweise benützt man die Spannung  $U_2$  (Fig. 1a) oder die Spannung  $U_1$  (Fig. 1b) zur Spannungsversorgung des Regelverstärkers. In beiden Fällen stellt  $R_L$  den Belastungswiderstand dar.

Die Regelung von  $U_2$  erfolgt dadurch, dass von dieser Spannung über die Teilerwiderstände  $R_1$  und  $R_2$  eine Teilspannung

$$k U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_2$$

auf das Steuergitter von  $Rö 2$  gelangt. An der Kathode von  $Rö 2$  liegt die Vergleichsspannung  $U_v$ . Die Gitterspannung  $U_{g1}$  ergibt sich als Differenz zwischen  $U_v$  und der Teilspannung  $k U_2$ . Der dabei fliessende Anodenstrom  $I_{ap}$  bewirkt am Anodenwiderstand  $R_a$  einen Spannungsabfall, wodurch an  $Rö 1$  eine bestimmte Gitterspannung  $U_g$  entsteht. An der Längsröhre stellt sich ein solcher Anodenstrom ein, dass sich die

erwünschte Ausgangsspannung  $U_2$  ergibt. Eine Verkleinerung des Lastwiderstandes  $R_L$  bewirkt zunächst ein Absinken von  $U_2$ . Dadurch wird  $U_{g1}$  negativer, infolgedessen  $I_{ap}$  kleiner, so dass auch der negative Wert von  $U_g$  kleiner wird.  $Rö 1$  wird dadurch soweit geöffnet, dass  $U_2$  annähernd den alten Wert erreicht. Eine Vergrösserung des Lastwiderstandes hat den umgekehrten Regelvorgang zur Folge.

Bei der nach Fig. 1a verwendeten Schaltung liegt  $R_a$  parallel zur Gitter-Kathoden-Strecke von  $Rö 1$ , und  $U_2$  dient zur Spannungsversorgung von  $Rö 2$ . Bei der Schaltung nach Fig. 1b aber liegt  $R_a$  parallel zur Gitter-Anoden-Strecke von  $Rö 1$  und  $U_1$  dient zur Spannungsversorgung von  $Rö 2$ . Es ergeben sich dadurch unterschiedliche Regeleigenschaften.

Die Schaltung nach Fig. 1b ist in Bezug auf Stabilität und Brummunterdrückung besser als die nach Fig. 1a, so dass diese Art sehr häufig verwendet wird.

Die erwähnten Potentialverhältnisse und Regelvorgänge gelten nur für den Fall, dass beide Röhren betriebsbereit sind. Bei der Schaltung nach Fig. 1b treten aber während der Anheizzeit Schwierigkeiten auf, auf die im folgenden eingegangen wird.

### 2. Einfluss der Gleichrichterspannung auf die Gitterspannung $U_g$ während der Anheizzeit der Verstärkerröhren

Normale Verstärker- und Gleichrichterröhren haben eine Anheizzeit von etwa 10...20 s. Dabei sollen alle Röhrenstufen