Gleichrichterunterstationen mit Siziliumleistungsdioden für Bahnanlagen

Autor(en): **Wallertshauser, H.-R.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **57 (1966)**

Heft 11

PDF erstellt am: **03.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-916602

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

[4] *Schweizerische Beleuchtungskommission:* Leitsätze der öffentlichen Beleuchtung. Teil I: Strassen und Plätze. Publ. 4003 des SEV, Zürich 1960.
[5] *D. A. Schreuder:* Ein Leuchtdichtemesser im Taschenformat. Lichttechnik 15(1963)9, S. 456...466.
[6] *C. Bauer:* Neuere Leuchtdichtemesser. Lichttechnik 14(1962)10, S. 505...509.
[7] *H. Greif:* Photographische Darstellung von Leuchtdichteverteilungen. Lichttechnik 13(1961)2, S. 53...55.
[8] *R. M. Callender:* Photographische Darstellung von Leuchtdichteverteilungen. Lichttechnik 13(1961)8, S. 403...404.
[9] *C. Bauer:* Ein technisches System der Leuchtdichte in der Strassenbeleuchtung. Ein Vorschlag zur Berechnung, Messung, Kennzeichnung und Normung. Lichttechnik 17(1965)7, S. 83 A...86 A.
[10] *A. Pahl:* Bedeutung und Anwendung von Leuchtdichtefaktorkurven in der Strassenbeleuchtung. Siemens Z. 38(1964)11, S. 852...859.
[11] *H. O. Westermann:* Reflexionskennwerte von Strassenbelägen. Lichttechnik 15(1963)10, S. 506...510.
[12] *R. Sewig:* Handbuch der Lichttechnik. Berlin, Springer-Verlag 1938.

Adresse des Autors:
Dr. *F. Mäder,* Adjunkt des Eidg. Amtes für Mass und Gewicht, Lindenweg 24, 3084 Wabern.

Gleichrichterunterstationen mit Siliziumleistungsdioden für Bahnanlagen

Von *H.-R. Wallertshauser,* Genf

621.311.442 : 621.382.2 : 621.33

Ausgehend von den spezifischen Bedingungen einer Bahn-Unterstation, werden der Aufbau, die Schaltung und die Dimensionierung einer modernen Silizium-Gleichrichterstation behandelt. Speziell wird auf den Schutz des Gleichrichters gegen Überspannungen und Überströme insbesondere gegen Kurzschlüsse eingegangen. Die konstruktiven Lösungen für die Siliziumdioden und deren Kühlkörper und Schaltelemente, sowie der Zusammenbau der Dioden zu Gleichrichterelementen bilden weitere Punkte der Abhandlung. Eine genaue Betrachtung finden schliesslich die Anforderungen an die Dioden der Traktionsgleichrichter, das thermische Verhalten von Siliziumdioden, dessen analoge Nachbildung und die Verwendung des «thermischen Abbildes» zur Überwachung von Silizium-Anlagen.

Partant des conditions spécifiques d'une sous-station de traction, l'auteur traite de la conception, du schéma et du dimensionnement d'une sous-station moderne avec redresseurs au silicium. Il examine spécialement la question de la protection du redresseur contre les surtensions et les surintensités, en particulier contre les courts-circuits. L'article traite ensuite des solutions apportées à la construction des diodes au silicium, de leurs radiateurs et de leurs éléments RC, ainsi que de l'assemblage des diodes en éléments redresseurs. Suivent, enfin, des considérations approfondies sur les exigences auxquelles doivent répondre les diodes des redresseurs de traction, sur le comportement thermique des diodes au silicium, sur sa représentation analogique et sur l'emploi de l'«image thermique» pour la surveillance des installations au silicium.

1. Einleitung

Gleichrichter für Strassenbahnen, Trolleybusse, Neben- und auch Vollbahnen gibt es schon lange. Der Gleichstromhauptschlussmotor ist wegen seiner Einfachheit, seinen günstigen Betriebskennlinien und seiner leichten Steuerbarkeit der bevorzugte Antriebsmotor geblieben.

Die Speisung der Fahrmotoren der Triebfahrzeuge erfolgt nach Fig. 1a über die Gleichstrom-Fahrleitung, den Gleichrichter und den Gleichrichtertransformator aus dem meist dreiphasigen Wechselstromnetz mit einer Netzspannung von 5...50 kV. Die Fahrdrahtgleichspannung liegt bei Strassenbahnen meistens zwischen 500 und 1500 V, bei Vollbahnen zwischen 1500 und 3000 V. Die Fahrdrahtgleichströme

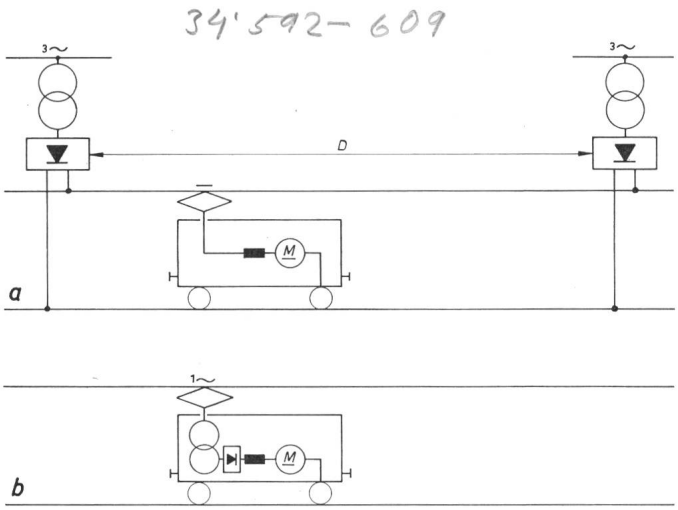


Fig. 1
Prinzipschema für die Gleichstromtraktion
a mit Unterstationen; *b* mit Fahrzeuggleichrichter
D Abstand

erreichen Werte von einigen tausend Ampère. Bei grossen Streckenabschnitten werden parallelspeisende Gleichrichterunterstationen in Abständen *D* von 5...25 km eingesetzt. Eine andere Möglichkeit für die Gleichstromtraktion besteht darin, Gleichrichter und Gleichrichtertransformator in das Triebfahrzeug einzubauen. Nach Fig. 1b wird in diesem Fall die Fahrleitung mit hochgespanntem Einphasenwechselstrom von 15...25 kV gespeist.

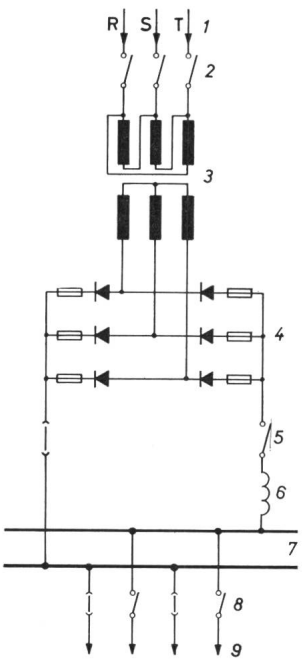
Beide Systeme der stationären *und* mobilen Gleichrichter sind seit Jahren mit Quecksilberdampfgleichrichtern und neuerdings mit Siliziumdioden in Betrieb und gestatten unter anderem die elektrische Nutzbremsung oder Rekuperation.

Die Fortschritte im Bau von Gleichrichterunterstationen liegen vorwiegend in der Entwicklung des Gleichrichters selbst. Die Entwicklung führte von den Gleichstromgeneratoren und rotierenden Umformern über die Quecksilberdampfgleichrichter zu den heutigen Siliziumgleichrichtern. Jede Entwicklungsstufe brachte gegenüber der vorhergehenden Verbesserungen in Bezug auf Wirkungsgrad, Einfachheit, Platzbedarf, Wartung und Preis.

2. Aufbau einer Gleichrichterunterstation

Der Aufbau (Fig. 2) einer modernen Unterstation mit Siliziumdioden besteht im wesentlichen aus Hochspannungs-Wechselstromeinführung *1* mit Freileitung oder Kabel, Hochspannungsschaltanlage mit magnetischer und thermischer Überstromauslösung *2*, Gleichrichtertransformator *3*, Siliziumgleichrichter mit Dioden und Sicherungen *4*, Gleichstromschalter oder -trenner *5*, evtl. Glättungsdrosselspule *6*, Gleichstromsammelschienen *7* und Fahrleitungsabgängen *9* mit zugehörigen Feederschaltern *8*. Die Schalter und Sicherungen wirken dabei selektiv. Die Selektivität besteht, bei

Fig. 2
Prinzipschema einer Unterstation
1 Hochspannungswechselstromeinführung; *2* Hochspannungsschaltanlage, magnetische und thermische Auslösung; *3* Gleichrichtertransformator; *4* Siliziumgleichrichter; *5* Gleichstromschnellschalter oder -trenner; *6* Glättungsdrosselspule; *7* Gleichstromsammelschienen; *8* Feederschalter; *9* Fahrleitungsabgänge



Verwendung eines Gleichstromschnellschalters, zwischen den einzelnen Feederschaltern und dem Gleichstromschnellschalter, sowie dem Gleichstromschnellschalter und den Diodensicherungen einerseits und dem Primärschalter anderseits. Beim Einbau eines Gleichstromtrenners wird die Selektivität zwischen den einzelnen Feederschaltern und dem Primärschalter, sowie zwischen dem Primärschalter und den Diodensicherungen hergestellt. Diese Selektivitäten werden im Falle von unzulässig hohen Überlasten mit Hilfe der Verschiedenheit der Auslösewerte, im Falle von Kurzschlüssen auf den Gleichstromfahrleitungen oder -sammelschienen mit Hilfe der Differenz der Ansprechzeiten der verschiedenen Schalter erreicht. Die Diodensicherungen sind damit ausschliesslich für den internen Kurschlußschutz des Gleichrichters vorgesehen; d. h. sie schalten durchgebrochene Diodenstränge selektiv ab, werden aber durch äussere Überlastungen und Kurzschlüsse nicht in Mitleidenschaft gezogen.

Für die Schaltung des Gleichrichters wird bei Neuanlagen mit Siliziumdioden fast ausschliesslich die Dreiphasenbrücke gewählt. Sie ergibt das günstigste Verhältnis von mittlerer Transformator-Scheinleistung zu Gleichstromleistung von 1,05 und eine Welligkeit von 4,2 %. Die bei Quecksilberdampfgleichrichtern häufig angewandte Doppelsternschaltung mit Saugdrosselspule ergibt das wesentlich ungünstigere Verhältnis von 1,26 bei ebenfalls 4,2 % Welligkeit, wird aber bei alleinigem Ersatz des Quecksilberdampfgleichrichters durch Siliziumgleichrichter meistens beibehalten.

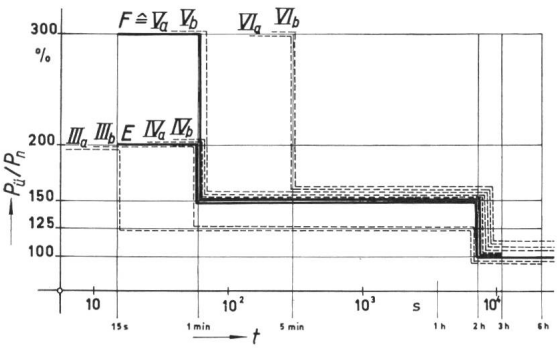


Fig. 3
Überlastklassen für Traktionsgleichrichter
——— gemäss Publikation Nr. 146 der CEI; ------ gemäss Publikation Nr. 84 der CEI
$P_ü$ Überlast; P_n Nennlast; t Dauer der Überlast

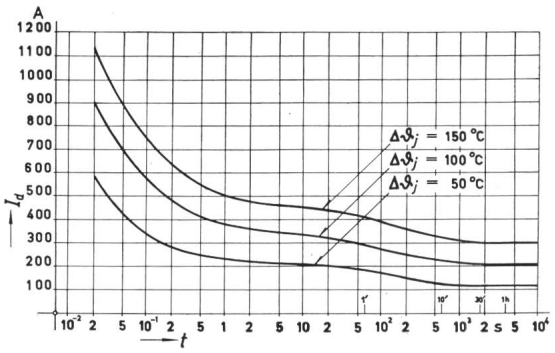


Fig. 4
Überlastkurven für eine Siliziumdiode
I_d Gleichstrommittelwert des pulsierenden Gleichstromes für Einphasenschaltung bei 50 Hz; t Einschaltdauer; $\Delta\vartheta_j$ Erhöhung der Sperrschichttemperatur am Ende der Durchlasshalbperioden

3. Dimensionierung und Schutz des Gleichrichters

Für die Dimensionierung des Gleichrichters sind die strom- und spannungsmässigen Belastungen im Betrieb massgebend, dabei bestimmt die Strombelastung die Anzahl der parallel zu schaltenden, die Spannungsbelastung die Anzahl der in Serie zu schaltenden Dioden.

Der Stromverlauf in Unterstationen ist naturgemäss sehr unregelmässig. Auf einer relativ kleinen Grundlast überlagern sich Sekunden bis Minuten dauernde Anfahrüberlasten, zusätzlich können jederzeit Streckenkurzschlüsse oder selbst satte Sammelschienenkurzschlüsse, z. B. bei einer Rückzündung eines parallelarbeitenden Quecksilberdampfgleichrichters, auftreten.

Als Bestellungs- und Dimensionierungsgrundlage finden allerdings genau definierte Überlastklassen Anwendung, und zwar die Klassen E für leichte, beziehungsweise F für schwere Traktion gemäss Publikation Nr. 146 der CEI [1]) für Siliziumgleichrichter oder die Klassen III bis VI (in Fig. 3 gestrichelt eingezeichnet), der Publikation Nr. 84 der CEI für Quecksilberdampfgleichrichter.

Für die Kurzschlussbelastung, die im ungünstigsten Fall am Ende der betreffenden Überlast auftreten kann, wird der schlimmste Fall des satten Sammelschienenkurzschlusses berücksichtigt.

Die bestimmende Grösse für die Dimensionierung eines Siliziumgleichrichters ist die Sperrschichttemperatur der Siliziumdioden. Diese Temperatur darf im Betrieb auch

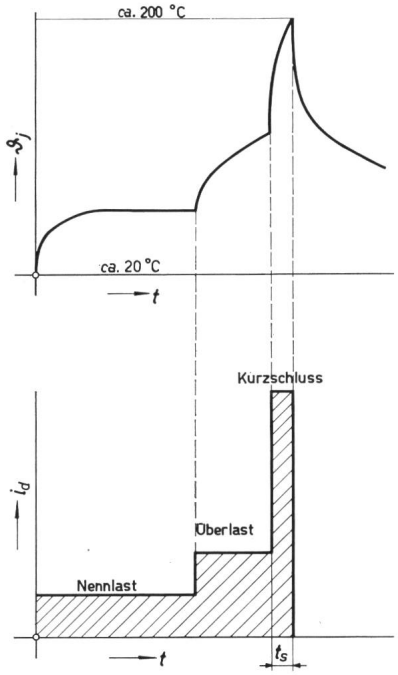


Fig. 5
Schematischer Verlauf der Sperrschichttemperatur einer Siliziumdiode gemäss den CEI-Publikationen
ϑ_j Sperrschichttemperatur; i_d Gleichstrom; t Zeit; t_s Kurzschlussdauer

[1]) CEI = Commission Electrotechnique Internationale.

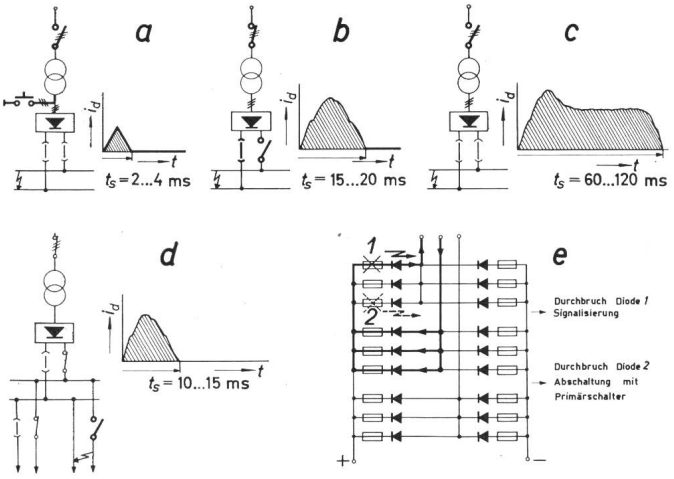


Fig. 6
Verschiedene Schutzeinrichtungen gegen Kurzschlüsse
Schutz gegen Sammelschienenkurzschlüsse: *a* mit Kurzschliesser; *b* mit verzögertem Gleichstromschnellschalter; *c* mit Primärschalter
Schutz gegen Streckenkurzschlüsse: *d* mit unverzögertem Feederschalter
Schutz gegen interne Kurzschlüsse: *e* mit Sicherungen in Serie mit jeder Diodenreihe
t_s Kurzschlussdauer; i_d Gleichstrom; t Zeit

kurzzeitig den Wert von ca. 200 °C nicht überschreiten, ansonst die Dioden ihre Sperrfähigkeit verlieren. Die Sperrschichttemperatur einer Siliziumdiode lässt sich auf rein elektrische Weise genau messen. Damit können nach Fig. 4 die Überlastkurven, d. h. der zulässige Gleichstrommittelwert I_d in Funktion der Einschaltdauer t für verschiedene Temperaturerhöhungen $\Delta\vartheta_j$ der Sperrschicht, z. B. von 50, 100, 150 °C, für eine bestimmte Diode mit definierten Kühlbedingungen angegeben werden. Mit diesen Überlastkurven lässt sich die resultierende Temperaturerhöhung der Sperrschicht für Nennlast, Überlast und Kurzschluss nach Fig. 5 bestimmen, wobei die Sperrschichttemperatur bei Berücksichtigung einer maximalen Umgebungstemperatur von z. B. 45 °C den Wert von ca. 200 °C nicht überschreiten darf. Diese Bedingung kann durch Parallelschalten von mehreren Dioden erfüllt werden. Die notwendige Anzahl paralleler Dioden hängt dabei stark von der Kurzschlussdauer t_s, von der Überlastfähigkeit und Kurzschlussfestigkeit der Siliziumdioden und in geringerem Masse von der angewendeten

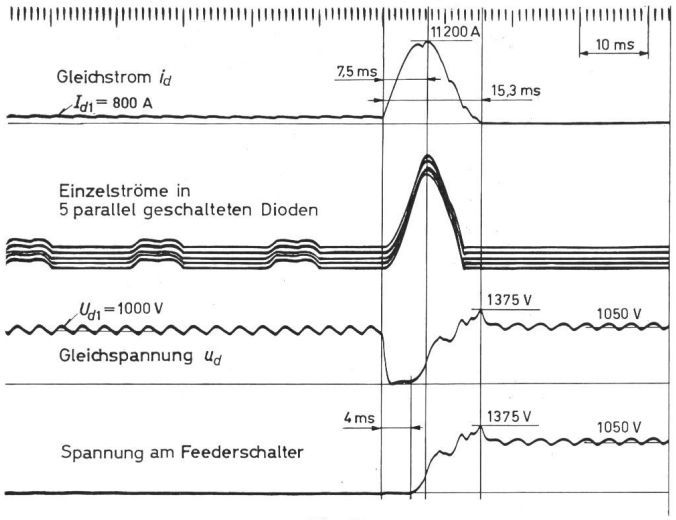


Fig. 7
Verlauf der Ströme und Spannungen für einen satten Streckenkurzschluss in einer Unterstation von 800 kW, 1000 V

Kühlart ab. Die Kurzschlussdauer t_s beträgt nach Fig. 6 bei Anwendung eines Kurzschliessers auf der Sekundärseite des Transformators mit Abschaltung des satten Transformatorkurzschlusses mit Hilfe des Primärschalters ca. 2...4 ms, bei Verwendung eines Gleichstromschnellschalters von 15...20 ms und bei der Abschaltung mit dem Primärschalter von ca. 60...120 ms. Der Kurzschliesser gibt, wenigstens für den Gleichrichter, die günstigsten Verhältnisse. Allerdings wird dieser komplizierte und unpopuläre Apparat kaum mehr verwendet. Die heutigen überlastfähigen und kurzschlussfesten Siliziumdioden ermöglichen den Kurzschlußschutz der Anlage ohne grossen Mehraufwand mit Primärschalter oder eventuell Gleichstromschnellschalter. Die Gleichrichteranlage wird damit besonders einfach.

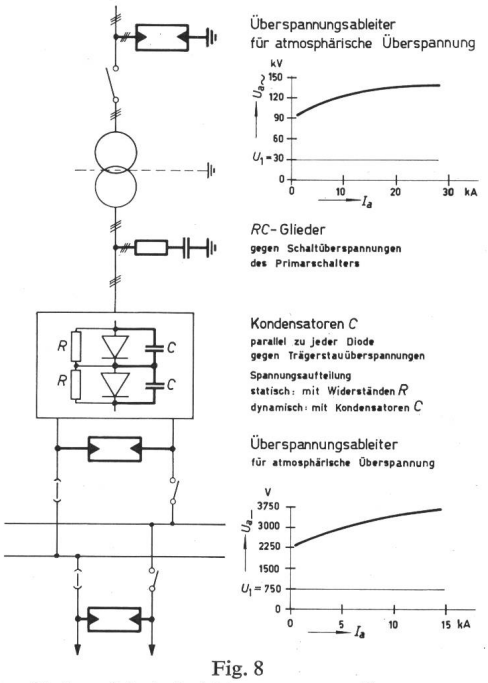


Fig. 8
Verschiedene Schutzeinrichtungen gegen Überspannungen
U_a Ableiterspannung; I_a Ableiterstrom; U_1 Nennspannung des Ableiters

Streckenkurzschlüsse werden von den Feederschaltern in ca. 10 bis 15 ms selektiv abgeschaltet, wobei für entfernte Kurzschlüsse neben der magnetischen Auslösung des Schalters eine Auslösung nach der Stromänderungsgeschwindigkeit di/dt nötig sein kann. In Fig. 7 sind die Ströme und Spannungen bei einem satten Fahrleitungskurzschluss in einer Unterstation von 800 kW und 1000 V aufgenommen worden. Der Kurzschlußstrom erreicht den Maximalwert von 11 200 A in 7,5 ms und wird mit dem Feederschalter in ca. 15 ms vollständig abgeschaltet. Die Einzelströme in den 5 parallelgeschalteten Dioden des den Kurzschluss führenden Brückenzweiges sind beinahe identisch und haben wegen der im Kurzschluss auftretenden grossen Überlappung eine Brenndauer von ca. 180°, d. h. beinahe Sinushalbwellenform. Die Spannungen an den Klemmen des Gleichrichters und des Feederschalters verlaufen ruhig, die Überspannungen sind klein.

Interne Kurzschlüsse des Gleichrichters beim Durchbruch einer Diode werden von den Spezialsicherungen in Serie mit jedem Diodenzweig selektiv abgeschaltet. Bei entsprechender Dimensionierung des Gleichrichters nach dem $n + 1$-Prinzip kann der normale Betrieb beibehalten werden und muss erst

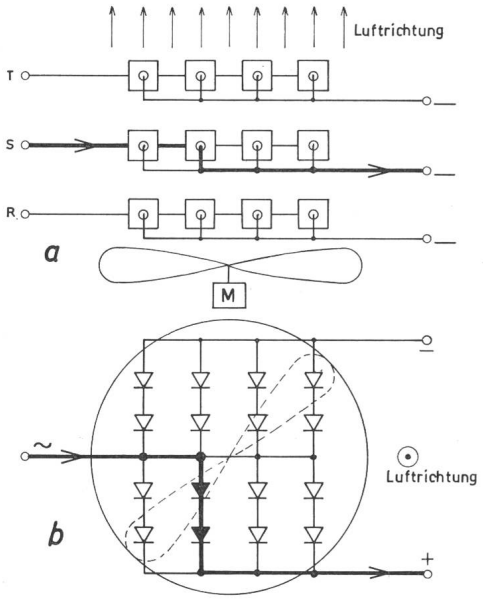


Fig. 9
Konstruktionsprinzipien für den Bau von Siliziumgleichrichtern
a parallellaufende Dioden in einer Ebene senkrecht zur Luftrichtung; *b* Stromführung in Form eines Z

beim Durchbruch einer zweiten der ersten direkt parallelgeschalteten Diode reduziert bzw. unterbrochen werden. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieses Schadenfalles ist praktisch Null.

Der Überspannungsschutz der Anlage, insbesondere des Gleichrichters, muss je nach Ursache der Überspannungen ebenfalls auf verschiedene Schutzeinrichtungen übertragen werden. Atmosphärische Überspannungen auf den Wechselstromspeiseleitungen und auf den Gleichstromfahrleitungen können mit Überspannungsableitern begrenzt werden. In Fig. 8 sind die äusseren Kennlinien eines 30-kV-Wechselspannungs- und eines 750-V-Gleichspannungsableiters aufgezeichnet. Die Überspannungsbegrenzung erfolgt je nach Ableitstrom zwischen dem 3- und 4-fachen Wert der Nennspannung. Schaltüberspannungen des Primärschalters, insbesondere bei leerlaufendem Gleichrichtertransformator, werden durch *RC*-Glieder auf der Sekundärseite des Transformators bedämpft. Dimensionierungsgrundlage für diese *RC*-Glieder ist der Magnetisierungsstrom des Gleichrichtertransformators.

Die in der Diode selbst entstehenden Kommutierungs- oder Trägerstauüberspannungen werden durch Parallelschalten eines Kondensators zu jeder Diode auf vernachlässigbare Werte reduziert.

Die Kenntnis der Ursachen und Grösse aller im Betrieb zu erwartenden Überspannungen gestattet nun die Bestimmung der Anzahl in Serie zu schaltender Dioden. Die gleichmässige Spannungsaufteilung wird statisch mit Widerständen und dynamisch mit den schon erwähnten Kapazitäten parallel zu jeder Diode erzwungen.

Eine unerwünschte Begleiterscheinung der kapazitiven Beschaltung von Transformator und Dioden ist die Beeinflussung der äusseren Kennlinie des Gleichrichters bei sehr kleinen Strömen von 0 bis ca. 2 A. Die Leerlaufspannungsüberhöhung kann aber bei geeigneter Dimensionierung sehr klein gehalten werden und beträgt bei ausgeführten Anlagen weniger als 1 %.

4. Konstruktion des Gleichrichters

Die konstruktiven Lösungen sind je nach der Lieferfirma, den technischen Daten und den Anforderungen der Kunden verschieden. Für den Gleichrichter selbst werden sowohl genormte Einheiten mit festen äusseren Dimensionen, wie auch individuell angepasste Systeme, hergestellt. Beiden Systemen sind nach Fig. 9 meistens folgende Konstruktionsprinzipien gemeinsam: parallellaufende Dioden in einer Ebene senkrecht zur Luftrichtung und Stromführung in Form eines Z, d. h. für eine gute Stromverteilung in den parallellaufenden Dioden müssen einerseits die Kühl- bzw. Temperaturverhältnisse gleich und anderseits die Ohmschen und induktiven Spannungsabfälle in den Zuleitungen dieselben sein, d. h. die parallellaufenden Dioden müssen sich in einer zur Luftrichtung senkrechten Ebene befinden und die Stromzuführung muss in Form eines Z erfolgen. Die Stromverteilung in den parallellaufenden Dioden liegt bei Anwendung dieser Prinzipien innerhalb ± 10 %.

Der Gleichrichter nach Fig. 10 in 3-phasen Brückenschaltung für 2800 A und 660 V mit den Überlasten 150 % während 1,5 h und 200 % während 5 s ist aus 2 Einheiten der Baureihe Rectistack von Brown Boveri aufgebaut. Die Dioden der klassischen Bauform sind mit ihren Kühlkörpern, *RC*-Schaltelementen, Sicherungen einzeln im Chassis fixiert. Die elektrischen Verbindungen sind mit Schienenstücken, Kabeln und Drähten ausgeführt. Die Kühlluft wird aus dem Kabelschacht durch den Gleichrichter angesogen und oben in den Raum abgestossen.

Ein vollkommen neues Konstruktionsprinzip, nämlich der Aufbau der Dioden auf den Wechselstromsammelschienen, selbst bei mehreren Dioden in Serie, wurde beim Gleichrichter nach Fig. 11 für 1000 V und 800 A mit den Überlasten 1200 A während 2 h und 1600 A während 5 min von Sécheron angewendet. Der Schrank enthält 60 Dioden, und zwar pro Brückenzweig 2 in Serie und 5 parallel geschaltete. Die Sicherungen für den internen Kurzschlußschutz sind in die Gleichstromsammelschienen aufgeschraubt und mit

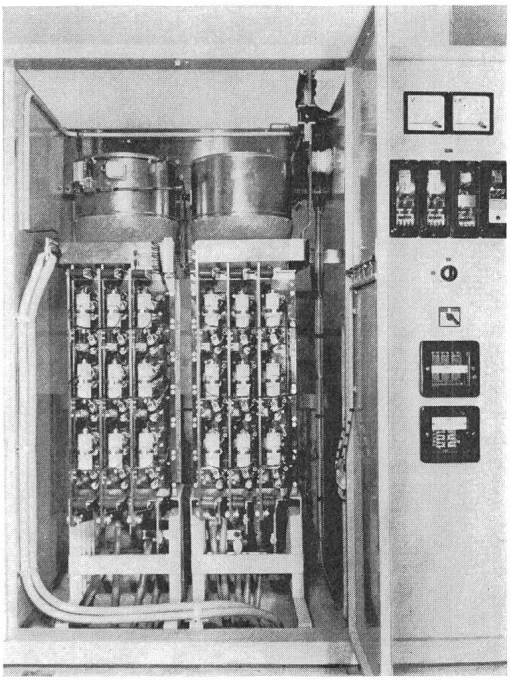


Fig. 10
Gleichrichter für eine Unterstation von 1850 kW, 660 V
Überlast 150 % während 1,5 h; Überlast 200 % während 5 s

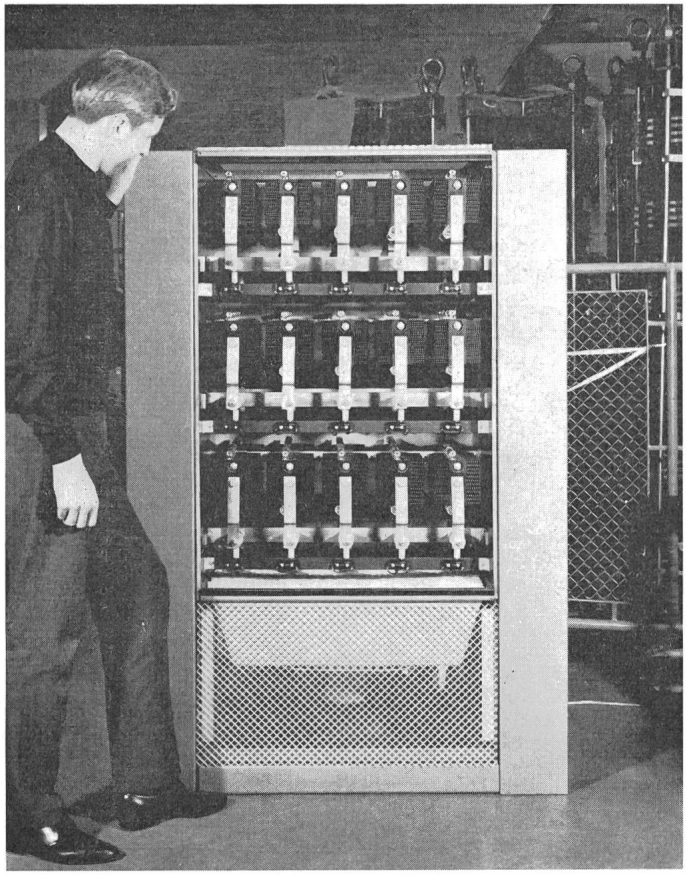


Fig. 11
Gleichrichter für eine Unterstation von 800 kW, 1000 V
Überlast 150 % während 2 h; Überlast 200 % während 5 min

Flachprofilen mit den Dioden verbunden. Die Mikrokontakte für die Signalisierung der Sicherungen werden von Vierkantisolationsrohren getragen. Die Signalisationsleitungen verlaufen im Innern dieser Rohre. Der unten liegende Ventilator saugt die Kühlluft von vorne und hinten oder von unten an und stösst sie durch den Gleichrichter hindurch nach oben ab. Die vorhin erwähnten Grundprinzipien der Konstruktion (wie parallellaufende Dioden in einer Ebene senkrecht zur Kühlluftrichtung und Stromführung in Form eines Z) sind hier aufs Schönste verwirklicht. Der geometrisch strenge und klare Aufbau und die Abwesenheit jeglicher flexibler Verbindungen ergibt überdies ein hohes äusseres Isolationsniveau aller Teile von 15 kV.

Bei der Montage werden symmetrische Bausteine mit der Diode, den beiden Kühlkörpern und den *RC*-Schaltelementen auf zwei in die Wechselstromsammelschienen geschraubte Isolierstangen nach dem Prinzip des Selengleichrichters aufeinandergereiht und zusammengehalten. Die übereinander liegenden Wechselstromsammelschienen der drei Phasen R, S, T werden von zwei Isolierplatten links und rechts getragen und je nach Anzahl parallel zu schaltender Dioden verschieden lang gewählt. Die Serieschaltung der Dioden wird bis zu 8 Dioden durch einfaches Verlängern der Isolierstangen erreicht. Die leichte Variation der Dimensionen des Schrankes, und zwar der Breite für die parallel zu schaltenden Dioden und der Tiefe für die in Serie zu schaltenden Dioden, ermöglicht die individuelle Realisierung jedes Gleichrichters.

5. Dioden für Traktionsgleichrichter

Die Forderungen nach grosser Überlastfähigkeit und Kurzschlussfestigkeit der Siliziumdioden haben die physikalischen, elektrischen und konstruktiven Details der Dioden stark beeinflusst und zum Teil zu neuen Lösungen geführt.

5.1 Vorwärtskennlinie

Die in der Diode entstehende Verlustwärme bestimmt bei gegebenen Kühlverhältnissen die Temperaturerhöhung der Sperrschicht und kann im wesentlichen aus der Vorwärtskennlinie der Diode bestimmt werden, da die Sperrverluste vernachlässigbar klein sind. Die Vorwärtskennlinie einer Siliziumleistungsdiode von 125 mm² Querschnitt und einer

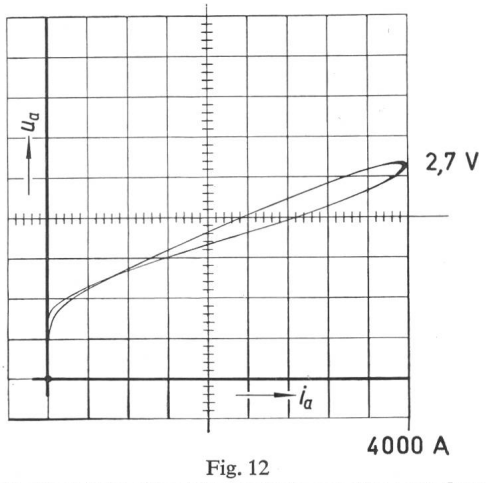


Fig. 12
Kurzschlusskennlinie einer Siliziumdiode von 125 mm² Querschnitt und 1500 V PIV
u_a Momentanwert der Diodenspannung; i_a Momentanwert des Diodenstromes

maximalen Rückwärtsspannung (PIV) von 1500 V wurde in Fig. 12 für eine Halbwelle sinusförmigen Strom oszillographisch aufgenommen. Der Spannungsabfall für 4000 A beträgt 2,7 V. Die auftretende Hysterese, Achterschleife, ist dabei rein thermischer Natur. Für kleine Ströme ist der Temperaturkoeffizient der Diodenspannung negativ, für grosse Ströme positiv, im Kreuzungspunkt bei ca. 1000 A Null. Vereinfacht man diesen Kennlinienverlauf durch zwei Geradenstücke, so kann man das einfache Ersatzschema nach Fig. 13, bestehend aus einer Batterie mit der Knickspannung U_D und einem Widerstand R_D angeben. U_D beträgt ungefähr 1 V, R_D ungefähr 0,4 mΩ. Die totale Verlustleistung P_v lässt sich bei bekanntem Stromverlauf mit Gl. (1) leicht bestimmen:

$$P_v = U_D I_d + R_D I^2_{eff} \tag{1}$$

worin

I_d Gleichstrommittelwert
I_{eff} Effektivwert des Gleichstromes

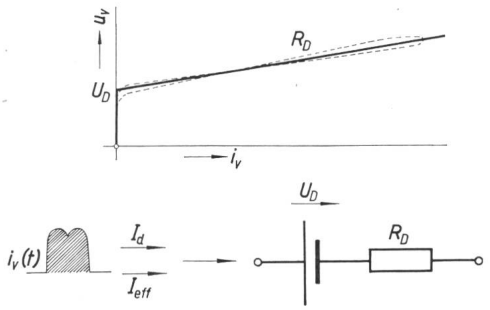


Fig. 13
Vereinfachte Vorwärtskennlinie einer Siliziumdiode mit zugehörigem Ersatzschaltbild
U_D Knickspannung; u_v Diodenspannung; I_d Gleichstrommittelwert; i_v Diodenstrom; I_{eff} Effektivwert; R_D dynamischer Widerstand

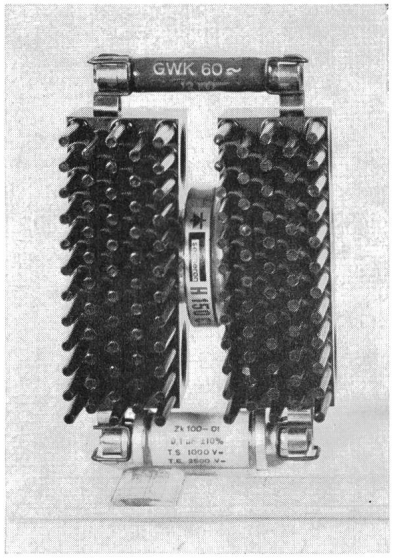


Fig. 14
Symmetrischer Diodenbaustein mit Diode, Kühlkörpern, Ausgleichswiderstand und Kondensator

Der erste Term von Gl. (1) bestimmt vorwiegend die Verluste im Nennbetrieb, der zweite wegen des quadratischen Gesetzes vorwiegend die Verluste im Kurzschlussfall. Der dynamische Widerstand R_D muss für kurzschlussfeste Dioden möglichst klein gehalten werden und kann bei gegebener maximaler Sperrspannung noch durch die Wahl eines grossen Querschnittes des Siliziumkristalls und einer grossen Trägerlebensdauer der eingespritzten Träger günstig beeinflusst werden. Die Knickspannung U_D wird im wesentlichen durch das verwendete Halbleitermaterial Silizium bestimmt und beträgt für alle Siliziumdioden ungefähr 1 V, d. h. ungefähr den zwanzigsten Teil der Brennspannung eines Quecksilberdampfgleichrichters.

5.2 *Konstruktion*

Zur Erzielung einer guten Überlastfähigkeit muss die im Siliziumkristall entstehende Wärme in einer unmittelbar dem Kristall benachbarten, vergleichsweise riesigen Masse gespeichert, auf kürzestem Wege transportiert und an einer grossen Oberfläche an das Kühlmedium abgegeben werden. Für Unterstationen wird heute fast ausschliesslich Luftkühlung verwendet.

Die drei Bedingungen Speicherung, Transport und Abgabe der Wärme sind im Kühlkörper nach Fig. 14 elegant verwirklicht. Die Diode befindet sich in der Mitte. Links und rechts, unmittelbar benachbart, sind die grossen Massen zur Erzielung einer guten Überlastfähigkeit und auf kürzeste Distanz stabförmige Kühlflächen angebracht. Diese Kühlflächen erzwingen schon bei natürlicher Kühlung turbulente Strömung der Luft und somit optimale Kühlverhältnisse und gestatten zudem, die Richtung der Kühlluft in einer Ebene beliebig zu wählen. Diese kompakten, vollkommen symmetrischen und für ihre Leistung erstaunlich kleinen Diodenelemente bilden die Bausteine für die Realisierung jeder Grösse von Gleichrichtern mit beliebigem Schema. Die wesentlichen Vorteile dieser Diodenkonstruktion gegenüber der klassischen Diodenbauform mit Stromzuführungslitze sind: vollkommene Symmetrie, beidseitige Kühlung, leichte Wahl der Polarität und grosse äussere Kriechwegdistanzen.

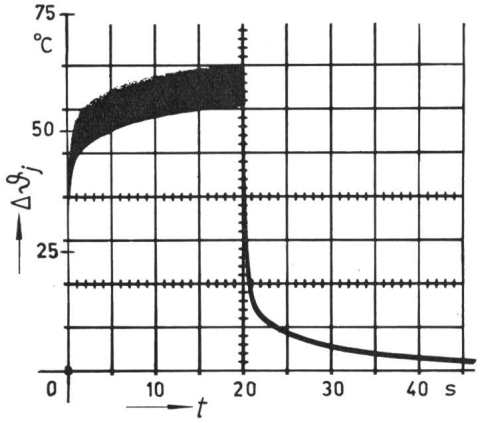


Fig. 15
Temperaturverlauf an der Sperrschicht einer Siliziumdiode beim Einschalten eines Überlaststromes während einiger Sekunden
$\Delta\vartheta_j$ Temperaturerhöhung der Sperrschicht; t Zeit

5.3 *Temperaturverhalten*

Der Temperaturverlauf an der Sperrschicht beim Einschalten eines Überlaststromes während einiger Sekunden zeigt Fig. 15. Nach einem schnellen Anstieg in Millisekunden wird der Temperaturverlauf flach, d. h. das Siliziumkristall stützt sich thermisch auf die beidseitig angebrachten grossen thermischen Massen ab. Das breite schwarze Band entsteht dadurch, dass sich die Sperrschicht während den Sperrperioden um ca. 10 °C abkühlt. Aus dem Verlauf der Abkühlkurven, der sich mathematisch näherungsweise als Summe von 5 Exponentialfunktionen darstellen lässt, kann nach

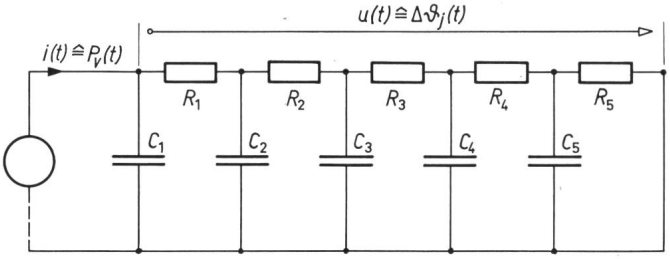


Fig. 16
Elektrisches Analogschema für das thermische Verhalten einer Siliziumdiode
$C_1 ... C_5$ Kapazitäten; $R_1 ... R_5$ Widerstände; i Strom; u Spannung; P_v Verlustleistung; $\Delta\vartheta_j$ Temperaturerhöhung der Sperrschicht

Fig. 16 ein dem thermischen Verhalten der Dioden analoges elektrisches Ersatzschema angegeben werden. Dieses Analogschema besteht aus einer fünfgliedrigen *RC*-Filterkette. Dabei entsprechen die elektrischen Ersatzgrössen direkt den thermischen, z. B. die Spannung u der Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta_j$ der Sperrschicht, der Strom i der Verlustleistung P_v in der Diode, die elektrischen Widerstände R den thermischen Widerständen, die elektrischen Kapazitäten den thermischen Kapazitäten und die elektrischen Zeitkonstanten RC den thermischen Zeitkonstanten. Die kleinste Zeitkonstante beträgt ca. 2 ms, die grösste ca. 1 h.

Mit diesem Analogschema ist es einerseits möglich, den Temperaturverlauf der Diode für jeden beliebigen noch so komplizierten Belastungsverlauf mit Hilfe der modernen Digital- oder Analogcomputer zu bestimmen. Es ist sogar gelungen, den Temperaturverlauf während den einzelnen Stromwellen zu messen und zu berechnen.

Fig. 17 zeigt den Temperaturverlauf an der Sperrschicht einer Siliziumdiode für die Halbwelle eines sinusförmigen Stromes. Die Sperrschichttemperatur erreicht ihren Maximal-

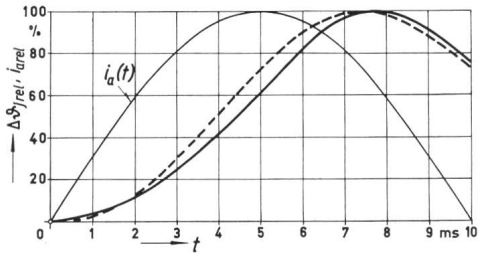


Fig. 17
Relative Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta_{jrel}$ der Sperrschicht einer Siliziumdiode während einer Halbwelle sinusförmigem Strom $i_a(t)$
Frequenz $f = 50$ Hz
——— gemessen; ----mit Analogschema berechnet

wert ca. 2,5 ms später als der Strom und fällt am Ende der Durchlassperiode auf ca. 75 % des Maximalwertes ab.

Mit dem Analogschema können anderseits Schutzeinrichtungen gebaut werden, die die Sperrschichttemperatur in jedem Zeitpunkt im Betrieb bestimmen und beim Überschreiten einer maximal zulässigen Temperatur verzögerungsfrei auf die Überstromschutzeinrichtung, d. h. normalerweise den Primärschalter reagieren.

Der Elektrolysegleichrichter in Fig. 18 für 10 000 A und 600 V, d. h. für eine Leistung von 6000 kW, ist mit einer thermischen Schutzeinrichtung geschützt und kann z. B. bei 25 °C Umgebungstemperatur um ca. 30 % und bei 45 °C um ca. 10 % dauernd überlastet werden. Der Gleichrichter ist auf der Gleichstromsammelschiene aufgebaut und konvektionsgekühlt, d. h. absolut wartungsfrei.

6. Zusammenfassung

Der moderne Siliziumgleichrichter hat gegenüber dem Quecksilberdampfgleichrichter in Bezug auf Wirkungsgrad, Einfachheit, Platzbedarf, Wartungsfreiheit und Preis nochmals wesentliche Verbesserungen gebracht und hat den Quecksilberdampfgleichrichter im Spannungsbereich für die Bahnen und bei reinem Gleichrichterbetrieb vollständig verdrängt. Der Ersatz der Quecksilberdampfgleichrichter in Gleichrichter-Wechselrichter-Stationen durch gesteuerte

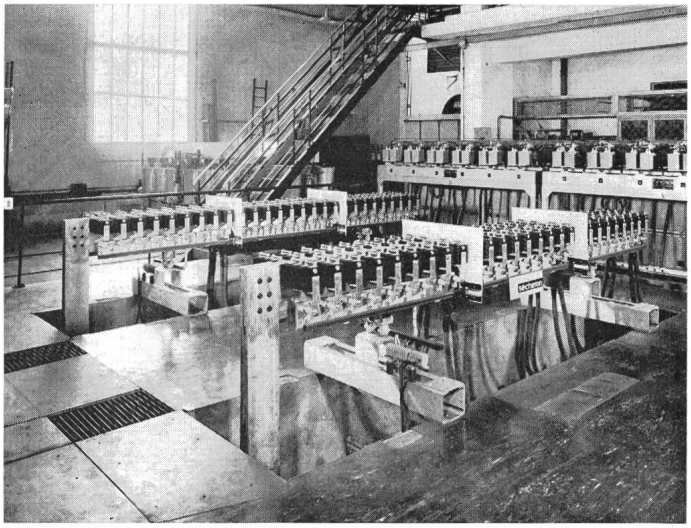


Fig. 18
Elektrolysegleichrichter für 10 000 A, 600 V

Siliziumdioden ist technisch möglich. Wirtschaftlich interessante Lösungen sind in naher Zukunft zu erwarten.

Die Betriebssicherheit von Siliziumgleichrichteranlagen ist bei richtiger Bemessung der Schutzeinrichtungen gut. Die Dimensionierung des Gleichrichters wird dadurch erleichtert, dass die wesentlichste Grösse, nämlich die Sperrschichttemperatur der Dioden, genau gemessen und für jeden noch so komplexen Belastungsfall berechnet werden kann.

Dank der Einfachheit aller für den Siliziumgleichrichter noch nötigen Anlageteile sind den konstruktiven Lösungen beinahe keine Grenzen mehr gesetzt. Insbesondere der auf den Sammelschienen aufgebaute Gleichrichter kann in Schränke eingebaut, auf den Boden gestellt, mit dem Transformator zusammengebaut, unter der Decke aufgehängt oder im Freien aufgestellt werden. Diese Vielfalt der Möglichkeiten ergibt eine bisher ungekannte Freiheit für den Bau von Gleichrichterunterstationen.

Adresse des Autors:
H.-R. Wallertshauser, dipl. Ingenieur ETH, S. A. des Ateliers de Sécheron, Case postale, 1211 Genève 21.

GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ

1646—1716

Leibniz' Bedeutung liegt vor allem auf philosophischem Gebiet, gilt er doch als einer der grössten abendländischen Denker. Mathematik und Physik gehörten ebenso in seinen alles umfassenden Interessenkreis wie Metaphysik, Theologie, die Rechte, Diplomatie und Philologie. Was ihn dabei noch besonders sympathisch erscheinen lässt, ist sein Optimismus. Ganz im Gegensatz zu vielen andern Philosophen, die vor allem Negatives sahen, vertrat Leibniz die Meinung, dass «alles zum Besten bestellt sei in dieser Welt».

Als *Otto von Guericke* seine Magdeburger Halbkugeln vorführte, sagte er: «Was 24 Pferden nicht gelingt, gelingt der leichten Hand der Diplomaten.» Auch Leibniz war Diplomat, und als er von den Versuchen Guerickes hörte, interessierte er sich sehr dafür, besonders auch für seine Elektrisiermaschine. Drei Monate vor dessen Tod erhielt er sie. Während Guericke nur das Knistern und Leuchten der Schwefelkugel beobachtet hatte, gelang es Leibniz, damit Funken zu erzeugen. Dieser Entdeckung wegen gehört er unter die ersten Elektrizitätspioniere.

Leibniz wurde am 1. Juli 1646 in Leipzig geboren. Er studierte in Jena. Seit seinem Tod in Hannover sind jetzt 250 Jahre verstrichen. *H. Wüger*