

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 56 (1965)  
**Heft:** 13

**Artikel:** Halbleiter-Leistungsdioden : Entwicklungsstand und Entwicklungstendenzen  
**Autor:** Dreck, W.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-916378>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 01.02.2025

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

de la Chiers in Anzin (Frankreich), bestehend aus 28 pumpenlosen, sechsanodigen Quecksilberdampfgleichrichtern mit Luftkühlung zu je 1,25 kA geliefert.

Für die Speisung einer Breitband-Walzstrasse der Sté. Espérance Longdoz in Lüttich (Belgien) hat Sécheron eine Gleichrichteranlage von 40 000 kW bei 1000 V geliefert. Sie besteht aus 48 sechsanodigen, pumpenlosen Quecksilberdampfgleichrichtern mit Edelgasfüllung. Nach der Einführung des Walzgutes bei tiefer Geschwindigkeit werden die Motoren gleichzeitig auf die hohe Arbeitsgeschwindigkeit beschleunigt und nach dem Durchgang einzeln wieder auf die niedrige Geschwindigkeit abgebremst, wobei die Anlage als Wechselrichter arbeitet. Solche leistungsstarke Regelantriebe können vorläufig nicht mit Halbleitergleichrichtern realisiert werden.

*Neuere Anwendungsgebiete*, in welchen grössere, geregelte Gleichstromleistungen benötigt werden, bieten dem Quecksilberdampfgleichrichter interessante Einsatzmöglichkeiten. Als Beispiele meldet Brown, Boveri die Stromversorgungen der Beschleuniger der Hochenergiephysik, die Synchrotrons für Protonen in Genf (CERN), in Harwell (Nimrod) und für Elektronen in Hamburg (DESY). Für die Speisung der 7000 t schweren Führungsmagnete von Harwell werden 96 wassergekühlte Einanodengefässe benötigt. Die Erregung der Magnete erfolgt im Gleichrichterbetrieb, die Entregung durch Wechselrichterbetrieb. In den Spulen wird eine Energie von 40 MJ gespeichert.

Die Verwendung von Quecksilberdampf-Ventilen in Wechselrichtern und Umrichtern mit Leistungen von mehreren MW für die Speisung von Mittelfrequenzöfen bis ca. 1000 Hz ist ein weiteres Anwendungsgebiet, in welchem Brown Boveri tätig ist.

Weitere bedeutende Einsatzmöglichkeiten können dem Quecksilberdampfgleichrichter in den Anlagen zur direkten

Erzeugung elektrischer Energie, z. B. in der Kernfusion und beim MHD-Verfahren, entstehen, dort wo die anfallende Gleichstromenergie in Wechselstromenergie umgewandelt werden muss. Die wirtschaftliche Energieerzeugung mit diesen Verfahren liegt noch in ferner Zukunft. Deshalb begnüge ich mich mit dieser Andeutung.

In die Phase der technischen und praktischen Realisation ist jedoch die *Gleichstrom-Hochspannungsübertragung* getreten. Sie wird vielleicht in naher Zukunft grosse Bedeutung in der Energiewirtschaft erlangen, da die Energietransportprobleme mit der raschen Zunahme des Energieverbrauchs immer mehr in den Vordergrund rücken. Neben der besseren Wirtschaftlichkeit bieten die Gleichstrom-Energieübertragungen den Vorteil einer asynchronen Verbindung.

Die schwedische Firma ASEA, die auf diesem Gebiet die führende Stellung einnimmt, hat in ihrer Zeitschrift 1963, Heft 2, über die von ihr zu diesem Zeitpunkt ausgeführten und in Ausführung stehenden Anlagen zusammenfassend berichtet. Es waren damals:

- a) Übertragung nach der Insel Gotland, 20 MW, 100 kV
- b) Ärmelkanalübertragung, 160 MW, 200 kV
- c) Übertragung in Neuseeland, 600 MW, 500 kV
- d) Übertragung nach Sardinien, 200 MW, 200 kV
- e) Japanische 50/60-Hz-Frequenzumrichteranlage, 300 MW,  $2 \times 125$  kV.

Kürzlich scheint in USA der Auftrag für eine 1000 MW Gleichstrom-Übertragung erteilt worden zu sein.

Solche Anlagen können gegenwärtig und auf weitere Zukunft hinaus nur mit Quecksilberdampfgleichrichtern realisiert werden, und es darf angenommen werden, dass er hier einen neuen, ganz bedeutenden Anwendungsbereich gefunden hat, der ihm weitere Existenz und Entwicklung sichert.

#### Adresse des Autors:

Dr. sc. techn. W. Lindecker, Direktor, Elektro-Watt AG, Postfach, 8022 Zürich.

## Halbleiter-Leistungsdioden

### Entwicklungsstand und Entwicklungstendenzen

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 28. April 1965 in Zürich,  
von W. Deck, Baden

621.382.2.026

*Seit ungefähr 6 Jahren haben die Silizium-Leistungsdioden immer mehr an Bedeutung gewonnen. Es gibt eine ganze Anzahl verschiedener Fabrikate für 200 bis über 600 A pro Diode und zulässige Spitzensperrspannungen von 600...1200 V. Es sind für viele tausend MW Leistung Siliziumdioden hauptsächlich in Elektrolyseanlagen, Lokomotiven und Unterwerken in Betrieb. Die Erfahrungen sind sehr gut. Das Kernstück der Siliziumdiode besteht aus einer dünnen Scheibe aus hochreinem, einkristallinem Silizium, in der nach verschiedenen Methoden ein sog. PN-Übergang erzeugt wurde. Je nach Richtung der angelegten Spannung nimmt die elektrische Leitfähigkeit sehr hohe oder sehr kleine Werte an. An Hand der Kennlinien werden die Eigenschaften der Siliziumdioden besprochen.*

*Die Entwicklungstendenzen gehen in Richtung auf Dioden für grössere Ströme und höhere Spannungen. Ausserdem werden die stoßspannungsfesten Dioden, die sog. Controlled-Avalanche-Dioden grössere Bedeutung erlangen. Obschon es eine beträchtliche Anzahl verschiedener Halbleitermaterialien gibt, wird infolge technologischer Schwierigkeiten die Siliziumdiode auf längere Zeit die vorherrschende Leistungsdiode bleiben.*

In den letzten 5—6 Jahren hat sich eine Wandlung in der Erzeugung von Gleichstrom vollzogen. Die vorher üblichen Quecksilberdampf-Gleichrichter und Kontaktumformer wur-

*Depuis environ 6 ans, les diodes de puissance au silicium ont pris de plus en plus d'importance. Il en existe maintenant un grand nombre de modèles pour 200 à plus de 600 A par diode et pour des tensions maximales admissibles de blocage de 600 à 1200 V. Des diodes au silicium pour plusieurs milliers de MW sont en service, surtout dans des installations d'électrolyse, des locomotives et des sous-stations, où elles donnent pleine satisfaction. La partie essentielle de ces diodes est constituée par un mince disque de silicium monocristallin extra-pur, où l'on produit, selon diverses méthodes, une structure PN. Selon le sens de la tension appliquée, la conductivité électrique est très grande ou, au contraire, très faible. A l'aide des caractéristiques, l'auteur décrit les propriétés des diodes au silicium.*

*L'évolution dans ce domaine tend à la fabrication de diodes pour des courants encore plus grands et des tensions toujours plus élevées. Des diodes capables de supporter des chocs de tension (diodes à avalanche contrôlée) gagneront également en importance. Bien qu'il existe un grand nombre d'autres matériaux semi-conducteurs, la plupart donnent lieu à des difficultés d'ordre technologique, de sorte que les diodes de puissance au silicium maintiendront encore longtemps leur supériorité.*

den auf vielen Gebieten durch die Halbleiter-Gleichrichter verdrängt. Diese Arbeit wird sich mit den Halbleiter-Leistungsdioden befassen, während die auch zu den Halbleitern ge-

hörenden Kupferoxydul- und Selengleichrichter nicht besprochen werden. Diese werden zwar auch in grösserem Umfang angewendet; ihre Sperrfähigkeit ist aber mit 25...30 V (Effektivwert) gering gegenüber den aus einkristallinem Halbleitermaterial hergestellten Dioden. Bei diesen wiederum beschränkt man sich auf Leistungsdioden mit einer Stromstärke von mindestens 200 A pro Element.

Mit dieser Begrenzung fallen auch die Germanium-Leistungsdioden, die vor einigen Jahren hergestellt worden waren, ausser Betracht. Sie wurden fast vollständig von den Silizium-Leistungsdioden abgelöst, die grössere Stromdichten und höhere Spannungen ertragen, so dass sie viel wirtschaftlicher sind. Immerhin sind einige grössere Anlagen seit mehr als 6 Jahren störungsfrei in Betrieb.

### 1. Entwicklungsstand und Betriebserfahrungen

In Europa und in Übersee sind verschiedene Si-Leistungsdioden auf dem Markt. Fig. 1 zeigt einige Beispiele verschiedener Fabrikate. Es gibt Dioden mit oder ohne angebaute Litze, mit Gewinde- oder Flachanschluss, mit Glas-, Druckglas- oder Keramik-Isolation. Die Anschlusslitze weist ganz unterschiedliche Querschnitte auf, obschon für alle Dioden ungefähr der gleiche Nennstrom (200...250 A) angegeben wird. Schon aus dieser Tatsache kann man ersehen, dass die Nenndaten von Halbleiterelementen nicht unbedenken miteinander verglichen werden können.

Auf Fig. 2 sind die Nenndaten verschiedener Si-Leistungsdioden graphisch dargestellt. Über der Nennstromstärke, und zwar dem Mittelwert über eine volle Periode bei sinusförmigem Stromverlauf, ist die periodisch zulässige Spitzensperrspannung aufgetragen. Die grosse Mehrzahl der Dioden sind für 200...250 A dimensioniert. Je nach Fabrikat variiert die zulässige periodische Spitzensperrspannung von 600...1200 V. Zwei Fabrikate sind für 450...500 A und eines für 650 A aufgeführt. Dieses weist aber eine relativ kleine Spitzensperrspannung von 400 V auf.

Die Auswahl an Leistungsdioden ist gross. Gross ist aber auch die Erfahrung, über die einzelne der Hersteller verfügen. Si-Gleichrichteranlagen sind z. T. seit mehr als 6 Jahren ununterbrochen störungsfrei in Betrieb. Aus den Unterlagen, die verschiedene Firmen in verdankenswerter Weise zur Verfügung gestellt haben, geht hervor, dass die grösste installierte Gleichrichterleistung sich auf die Gebiete der Elektrolyse, der Lokomotiven und der Unterwerke

34'009-028

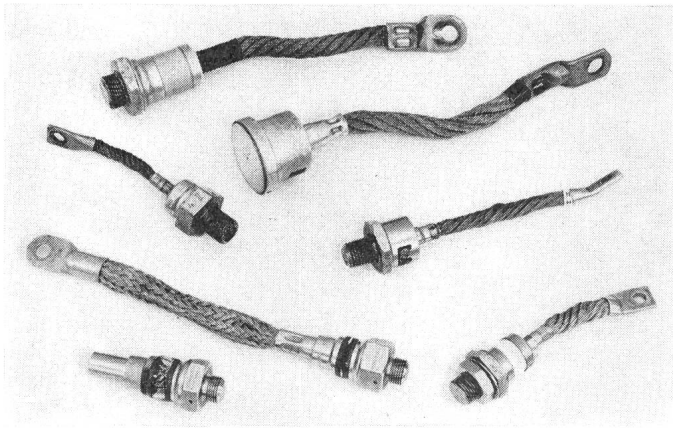


Fig. 1  
Silizium-Leistungsdioden verschiedener Fabrikate  
Nennstrom pro Diode ca. 200 A

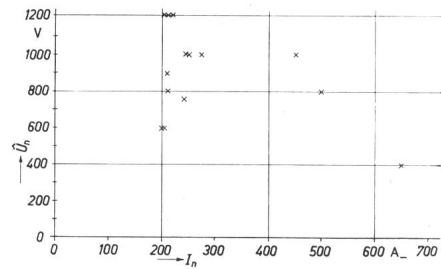


Fig. 2  
Nenndaten verschiedener Silizium-Leistungsdioden  
Periodisch zulässige Spitzensperrspannung  $\bar{U}_n$  als Funktion der  
Nennstromstärke  $I_n$   
(Mittelwert über eine volle Periode bei sinusförmigem Stromverlauf)

für die Energieversorgung des Nahverkehrs und der Industrie verteilt. Genaue Zahlen sind nicht erhältlich. Als Beispiel kann aber erwähnt werden, dass zwei grosse europäische Firmen bis jetzt je für über 1650 MW Si-Elektrolyse-Gleichrichteranlagen installiert oder in Montage haben. Eine andere Firma meldet, dass ungefähr 100 000 Si-Dioden auf dem Gebiet der Traktion eingesetzt sind. Es ist sicher, dass diese Zahlen nur einen kleinen Teil der wirklich in Betrieb gesetzten Si-Gleichrichter betragen, da die erwähnten Firmen auch andere Anlagen damit bestückt haben und verschiedene bedeutende Fabrikanten keine Zahlen bekanntgeben.

Als sehr gutes Zeichen für die Eignung der Si-Dioden ist zu werten, dass fast keine Angaben über Ausfälle infolge Diodenfehler erhältlich sind. Die meisten Anlagen sind ohne nennenswerte Störungen in Betrieb. Eine konkrete Zahlenangabe machte kürzlich *Broughall* vom British Railways Board <sup>1)</sup>. Danach sind von 7000 Si-Dioden, die seit 3 Jahren in Betrieb sind, nur 10 infolge Fehler ausgefallen. Das sind weniger als 1/2 ‰ pro Jahr. In der Fachliteratur [1] <sup>2)</sup> wird die Ausfallrate mit 0,4...1,8 ‰ pro 1000 Betriebsstunden angegeben. Der Ausfall an einzelnen Dioden während des Betriebes infolge Fehler in den Dioden ist auf alle Fälle fast vernachlässigbar. Dagegen können durch äussere Einflüsse, wie Überspannungen bei unsachgemässen Schutz oder bei der Inbetriebsetzung mehr Dioden zerstört werden. Über die Lebensdauer können noch keine Angaben gemacht werden, dazu sind die bisher erreichten Betriebszeiten von 5...6 Jahren offensichtlich noch zu kurz.

Man kann sich fragen, ob die Wandlung, die die Gleichrichtertechnik mit dem Übergang zu den Si-Gleichrichtern durchgemacht hat, nur eine Modeströmung ist, oder ob sie durch technische Vorteile bedingt ist. Um diese Frage beantworten zu können, muss man das Gleichrichterprinzip sowie den Aufbau und die Herstellungsverfahren der Leistungsdioden besprechen, um so die Eigenschaften der Halbleiterdioden verstehen zu können.

### 2. Das Gleichrichterprinzip

Das Kernstück der Halbleiter-Diode ist eine dünne Scheibe aus hochreinem, einkristallinem Silizium. Dieses Halbleitermaterial weist eine elektrische Leitfähigkeit zwischen der der elektrischen Leiter und der der Isolatoren auf. Sie kann durch Zugabe von sehr geringen Mengen von an-

<sup>1)</sup> Nach Mitteilung der Westinghouse, Bremsen und Signale AG, Bern.

<sup>2)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

deren Elementen, wie z. B. Phosphor, Antimon, Aluminium oder Bor in ihrer Leitfähigkeit in einem grossen Bereich verändert werden. Je nach Art des verwendeten sog. Dotierungsmaterials erfolgt die elektrische Leitung im Halbleiter durch Elektronen oder durch sog. Defektelektronen oder Löcher. Diese wandern entgegen den Elektronen. Sie verhalten sich also wie positive Ladungsträger.

Fig. 3 zeigt schematisch den Aufbau der als Gleichrichter wirkenden Siliziumscheibe. Sie ist einige Zehntel Millimeter dick und etwa 20 mm im Durchmesser und besteht aus 3 Schichten verschiedenen Leitungstyps und verschiedener Leitfähigkeit. Im gezeichneten Beispiel besteht die mittlere, relativ breite Zone aus P-leitendem Grundmaterial von z. B. 1000  $\Omega\text{cm}$  Widerstand. Die Leitung des elektrischen Stromes erfolgt durch Löcher, der Widerstand ist aber sehr hoch, da es sich um sehr schwach dotiertes Material handelt. Oben ist durch eines der Verfahren, die im folgenden noch besprochen werden, der Leitungstyp durch Zugabe eines

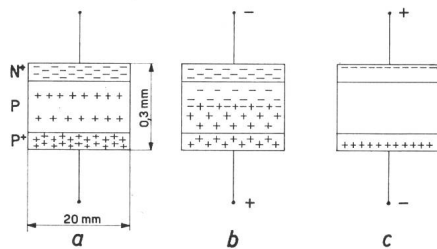


Fig. 3  
Schematische Darstellung der Silizium-Gleichrichterscheibe  
a spannungslos; b in Durchlassrichtung gepolt;  
c in Sperrrichtung gepolt

5wertigen Elementes, z. B. Phosphor, umgekehrt worden. In dieser N-Schicht sind Elektronen für die Stromleitung verantwortlich. Durch genügend hohe Dotierung, was durch  $N^+$  bezeichnet wird, ist der spezifische Widerstand gegenüber dem Grundmaterial stark gesenkt worden, z. B. auf  $5/1000 \Omega\text{cm}$ . Die Grenze zwischen dem N- und dem P-Material ist der sog. PN-Übergang, der die Gleichrichtung ermöglicht. Damit ein Leistungsgleichrichter optimale Eigenschaften erreicht, ist die Unterseite durch zusätzliche Dotierung, z. B. mit Aluminium, stark leitend, also  $P^+$  gemacht worden. In diesem Bereich sind Löcher, also positive Ladungsträger, für den Stromtransport vorhanden. Legt man nun eine elektrische Spannung an ein solches Element an, wobei der negative Pol an das N-Material zu liegen kommt, so werden die Elektronen aus der  $N^+$ -Schicht durch sog. Injektion in die mittlere P-Schicht hineingestossen. Umgekehrt werden die Defektelektronen von der positiven Elektrode abgestossen und ebenfalls in die P-Schicht hineingetrieben. Damit sind in dieser viele Ladungsträger vorhanden, der Widerstand des Materials ist klein, der Strom kann mit kleinem Spannungsabfall fließen. Der Gleichrichter ist in Durchlassrichtung gepolt. Bei umgekehrter Polarität werden die Elektronen durch die positive Elektrode und die Defektelektronen durch die negative Elektrode abgesaugt, die Mittelschicht ist an Ladungsträgern verarmt und damit hochohmig. Der Gleichrichter sperrt. Diese Anordnung ermöglicht also, die Leitfähigkeit der mittleren Schicht zeitlich zu variieren, zu modulieren. Damit eine solche Anordnung Spannungen von über 1000 V sperren kann, muss die Dotierung sowie die Dimensionierung der mittleren Zone richtig

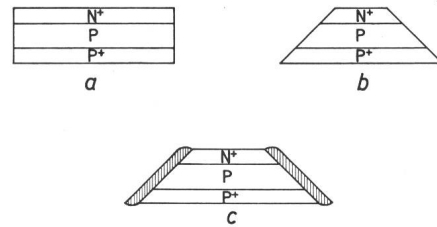


Fig. 4

Gestaltung der Halbleiteroberfläche

a vertikale Seitenfläche; b abgeschrägte Oberfläche (Mesa-Struktur);  
c abgeschrägte Oberfläche mit Schutzschicht

gewählt werden. Silizium erträgt Feldstärken von einigen 100 000 V/cm, während der Überschlag in Luft z. B. bei etwa 10 000 V/cm erfolgt. Für eine Sperrspannung von 2000 V benötigt man also eine Breite des Dielektrikums, d. h. der mittleren Zone, von mindestens 100  $\mu\text{m}$ . Je breiter die mittlere Zone bei gleicher Dotierung ist, um so höhere Spannungen erträgt der Gleichrichter. Da aber die Spannung nicht nur im Innern vorhanden ist, sondern auch auf der Oberfläche, so erreicht man bald eine Grenze, an der bei steigender Spannung der Spannungsdurchschlag nicht mehr im Innern, sondern auf der Oberfläche erfolgt. Man ist daher gezwungen, sein besonderes Augenmerk der Gestaltung der Oberfläche des Halbleiterplättchens zu widmen.

Auf Fig. 4 sind prinzipielle Möglichkeiten dargestellt. Das Innere des Siliziumplättchens soll bei allen 3 Ausführungen gleich gestaltet sein und hohe Durchschlagsfestigkeit besitzen. Dann wird in der Ausführung a die erreichbare Spannung durch die Oberfläche bestimmt. Die Feldstärke ist so gross wie im Innern. Der ungeschützte PN-Übergang an der Oberfläche begrenzt die erreichbare Spannung. Durch Abschrägen der Oberfläche wird die Feldstärke an der Oberfläche verkleinert, so dass die Spannung gegenüber der Ausführung a erhöht werden kann, bis der Durchbruch erfolgt. Diese Ausführung allein bringt aber nicht sehr viel, da die Oberfläche durch Umwelteinflüsse verschlechtert werden kann. Wenn man nun zusätzlich die Oberfläche schützt, indem man Oxydschichten oder Stoffe, die höhere Spannungsfestigkeit aufweisen, aufbringt, so kann man erreichen, dass die Spannung merklich weiter erhöht werden kann. In neuerer Zeit gelingt es, Dioden herzustellen, bei denen der Durchbruch sicher im Innern und nicht auf der Oberfläche erfolgt. Durch geeignete Dimensionierung des Innern kann man nun die erreichbare Spannung heraufsetzen. Aber auch hier werden Grenzen gesetzt, und zwar nicht von der Spannungsseite, sondern von der Durchlaßseite her.

Zwei mögliche Fälle der Dimensionierung des Halbleiterplättchens sind in Fig. 5 gezeichnet. In beiden Fällen

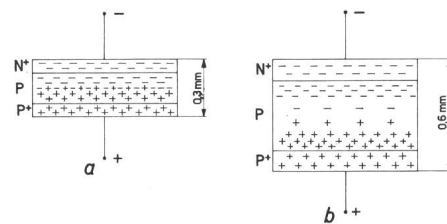


Fig. 5

Silizium-Gleichrichterscheiben verschiedener Dicken in Durchlassrichtung gepolt

a normale Dicke, kleiner Spannungsabfall; b doppelte Dicke, erhöhter Spannungsabfall

ist der Gleichrichter in Durchlassrichtung gepolt. Die Ladungsträger überschwemmen die hochohmige Mittelzone. Nun ist es aber so, dass diese Ladungsträger nur eine beschränkte Lebensdauer haben. Sie können nur eine bestimmte Strecke wandern, bis sie durch Rekombination verschwinden. Wird nun die Mittelzone breiter als die doppelte Diffusionslänge, dann ist sie in ihrer Mitte arm an Ladungsträgern. Der Widerstand ist hoch und damit auch der Spannungsabfall. Für einen 200-A-Gleichrichter beträgt der Spannungsabfall in Durchlassrichtung bei Nennstrom 1...1,2 V. Vergrössert man die Mittelzone, um höhere Sperrspannungen zu erreichen, dann steigt der Spannungsabfall rasch auf 2 V und darüber. Das bedeutet grössere Verluste. Diese wären in vielen Fällen betrieblich ohne zu grosse Bedeutung. Schwerwiegender ist das Problem der Abführung der entstehenden Verlustwärme von über 200 W. Diese Wärme entsteht in einem Volumen, das im allgemeinen kleiner als  $10^3$  mm ist. Sie muss wegen der kleinen Wärmekapazität des aktiven Teiles rasch über die Stromzuführungen abgeführt werden, sonst wird der Gleichrichter durch Wärmedurchschlag zerstört. Da diese Kühlung nur beschränkt wirksam ist, kann die Spannung bei gleichbleibender Stromstärke nicht beliebig erhöht werden.

### 3. Ausführungsformen von Silizium-Leistungsdioden

Eine mögliche Ausführung einer Si-Leistungsdiode ist in Fig. 6 abgebildet. Der aktive Teil, bestehend aus der Si-Gleichrichterscheibe, in der die Gleichrichtung vor sich geht, und einer Trägerplatte, befindet sich im Innern eines hermetisch verschlossenen Gehäuses. Damit die empfindliche Gleichrichteroberfläche keine Veränderungen erleidet, die das Betriebsverhalten unter Umständen ungünstig beeinflussen könnten, ist im Innern eine gereinigte Schutzgasatmosphäre vorhanden. Die Isolation besteht aus Keramik, Glas oder Druckglas. Die Stromzuführung erfolgt von oben über eine biegsame Kupferlitze, die verhindert, dass zu grosse mechanische Spannungen auf das Siliziumscheibchen übertragen werden. Man muss sich vergegenwärtigen, dass es sich bei Silizium um ein äusserst hartes und sprödes Material handelt. Zudem müssen grossflächige Elektroden an das nur wenige Zehntel Millimeter dicke Siliziumscheibchen befestigt werden, um den hohen Strom führen zu können. Unten wird der Strom vom Kupferboden übernommen. Da Kupfer einen mehr als 3mal grösseren Ausdehnungskoeffizienten als Silizium besitzt, stellt die Herstellung der Lötverbindungen ein zusätzliches Problem dar. Während

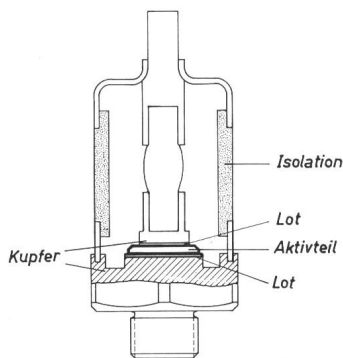


Fig. 6  
Prinzipskizze einer gelöteten Silizium-Leistungsdiode

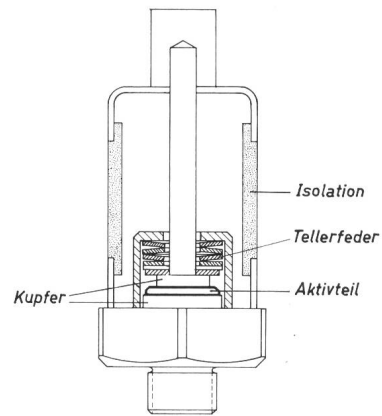


Fig. 7  
Prinzipskizze einer Druckkontakt-Siliziumdiode

man bis vor kurzem allgemein mit bestimmten Weichloten gelötet hat, gehen jetzt einzelne Hersteller zu Spezialloten über. Dadurch wird erreicht, dass die Siliziumdioden weniger empfindlich auf oft sich wiederholende Lastwechsel sind.

Eine andere Möglichkeit, das Kontaktproblem zu lösen, stellt die in Fig. 7 dargestellte Ausführung mit Druckkontakt dar. Hier wurde auf die Anwendung von Loten verzichtet, und der Übergang erfolgt durch ebene, sehr sauber bearbeitete und galvanisch mit Edelmetallen überzogene Flächen, die durch Federdruck gegeneinander gepresst werden. Bei den im Betrieb auftretenden Temperaturänderungen gleiten die Teile mit unterschiedlicher Ausdehnung aufeinander. So einleuchtend dieses System ist, so hat es auch seine Nachteile. Die Wärmeabfuhr ist gegenüber den gelöteten Ausführungen etwas erschwert, da der Wärmeübergangswiderstand ungefähr doppelt so gross ist. Wie sich die beiden verschiedenen Ausführungen auf längere Zeit bewähren werden, wird erst die Zukunft zeigen.

### 4. Herstellungsverfahren des PN-Überganges

Wie wird nun eigentlich das aktive Element hergestellt? Ausgangsmaterial ist ein Einkristall aus hochreinem Silizium, der nur möglichst wenige selbst kleinste Kristallgitterfehler aufweisen darf. Mit Diamantscheiben werden dünne Scheiben abgeschnitten und diese geläppt, so dass sie möglichst feine Oberflächen aufweisen. Die durch die mechanische Bearbeitung entstandene Oberflächenschicht wird durch chemisches Ätzen abgetragen, bis das ungestörte Kristallgefüge an der Oberfläche liegt.

Aus Fig. 8 ist im Prinzip ersichtlich, wie ein PN-Übergang durch Legieren erzeugt werden kann. Auf das Siliziumscheibchen des P- oder N-Typs wird eine Goldfolie bestimmter Dicke, die einen gewissen Prozentsatz des gewünschten Dotierungsmaterials, z. B. Antimon, enthält, gelegt. Das ganze wird in eine Form gebracht und in einem

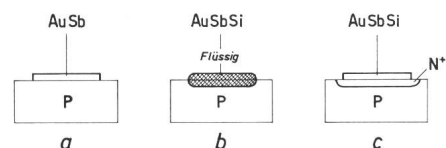


Fig. 8  
Prinzip der Herstellung eines PN-Überganges nach dem Legierungsverfahren  
a Ausgangslage; b auf Legierungstemperatur Au-Sb geschmolzen;  
c nach dem Erstarren PN-Übergang entstanden

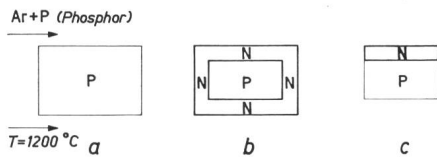


Fig. 9

**Prinzip der Herstellung eines PN-Überganges nach dem Diffusionsverfahren**  
*a* Ausgangslage; *b* nach dem Diffusionsprozess; *c* nicht benötigter Teil der N-Schicht entfernt

Ofen unter Schutzgas auf ca 780 °C erwärmt. Dabei schmilzt die Gold-Antimon-Legierung und löst eine gewisse Menge Silizium auf. Beim Erstarren scheidet sich das Silizium wieder aus, wobei ein geringer Teil des Antimons im Gitter eingebaut wird. Das Siliziumplättchen ist wieder als ganzes einkristallin, doch hat sich im wieder erstarrten Teil der Leitungstyp geändert. In diesem Fall ist es N-leitend geworden. Das Gold ist zusammen mit dem restlichen Antimon und etwas Silizium an der Oberfläche erstarrt. Der PN-Übergang hat nun die gezeichnete Form. Der Übergang ist sehr abrupt. Der Teil mit grosser Elektronenleitfähigkeit geht unmittelbar in den P-Teil über. Die Herstellung des PN-Überganges ist einfach, doch kann er durch eine Vielzahl von Kleinigkeiten beeinflusst werden. Dort wo der PN-Übergang an die Oberfläche tritt, liegt die schwächste Stelle dieses Gleichrichters. Beim Legierungsprozess haben sich verschiedene Schichten auf der Oberfläche abgelagert, so dass die Spannungsfestigkeit beeinträchtigt wird. Erst durch Ätzen und anschliessend aufgebraachte Schutzüberzüge erreicht man die hohe Spannungsfestigkeit.

Mit dieser Legierungsmethode wurden die ersten Leistungsgleichrichter hergestellt. Im Laufe der letzten Jahre hat ein anderes Verfahren zur Herstellung des PN-Überganges, das Diffusionsverfahren, immer mehr an Bedeutung erlangt, da es gewisse Nachteile des Legierungsverfahrens vermeidet. Es gelang, die anfänglich ungenügende Spannungsfestigkeit zu erhöhen, so dass dieses Verfahren nun gleich hohe Sperrspannungen zu erzeugen erlaubt wie das Legierungsverfahren.

Fig. 9 zeigt das Prinzip. Das Siliziumplättchen befindet sich in einem Ofen bei ca. 1200 °C. Darüber strömt ein Gas, das z. B. Phosphor enthält. Dieser lagert sich auf der Oberfläche an und dringt durch Diffusion allmählich ins Innere hinein. Es bildet sich rund herum eine N-Schicht aus. In diesem Fall ist der Übergang vom N- zum P-Silizium nicht so brüsk wie beim Legierungsverfahren. Die Konzentration an der Oberfläche ist am grössten, und sie nimmt entsprechend

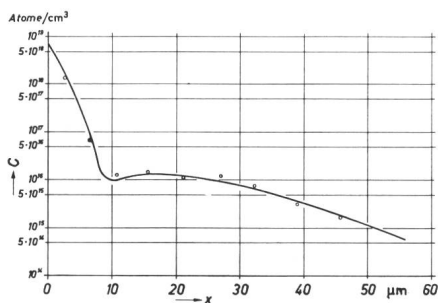


Fig. 10

**Konzentrationsprofil einer speziellen Diffusion von Gallium in Silizium**  
 Konzentration der eindiffundierten Ga-Atome *C* als Funktion der Entfernung von der Oberfläche *x*  
 — berechnete Werte    ••• experimentell gefundene Werte

den Diffusionsgesetzen allmählich nach innen ab. Wenn die Konzentration der sog. Donatoren gleich gross ist wie die der Akzeptoren, dann ist der PN-Übergang erreicht. Durch mechanische Bearbeitung werden die nicht benötigten Teile der N-Schicht entfernt, und man erhält einen ganz ebenen, gleichmässigen PN-Übergang. Nur nebenbei sei erwähnt, dass dieses Verfahren verschieden angewendet werden kann. Man kann z. B. das einzubringende Material auf eine Oberfläche aufbringen, so dass es nur von dort aus hinein diffundiert. Man kann auch das Konzentrationsprofil durch Ausdiffusion eines Teiles der bereits eindiffundierten Atome verändern.

Fig. 10 zeigt als Beispiel das durch eine spezielle Diffusion von Gallium in Silizium erhaltene Diffusionsprofil [2]. Als Funktion der Entfernung von der Oberfläche in μm ist die Konzentration des Galliums in Atomen/cm³ aufgetragen. Zuerst wurde Gallium eindiffundiert, anschliessend wieder teilweise ausdiffundiert, so dass das Profil ein Maximum im Innern aufwies. Anschliessend wurde noch einmal Gallium eindiffundiert. Man beherrscht dieses Vorgehen gut. Die Kurve zeigt den gerechneten Verlauf; die Messpunkte sind durch Kreise bezeichnet.

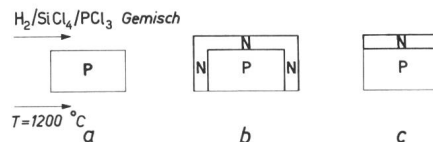


Fig. 11

**Prinzip der Herstellung eines PN-Überganges nach dem Epitaxieverfahren**  
*a* Ausgangslage; *b* nach dem Epitaxieprozess; *c* nicht benötigter Teil der N-Schicht entfernt

Als letzte Methode zur Herstellung des PN-Überganges ist auf Fig. 11 das Prinzip des Epitaxieverfahrens dargestellt. Darunter versteht man die Methode, auf einer einkristallinen Fläche einkristalline Schichten z. B. aus der Gasphase aufzubauen. Dazu wird das auf z. B. 1200 °C erwärmte Siliziumplättchen nach einer sorgfältigen Oberflächenbehandlung einem Gasmischung von z. B. SiCl₄ und H₂ ausgesetzt. Dabei tritt an der Siliziumoberfläche folgende Reaktion ein:



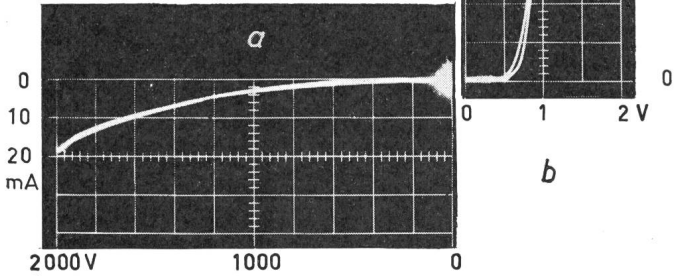
Das entstehende Silizium scheidet sich an der Oberfläche ab, entsprechend dem Kristallgitter des Plättchens. Durch Zugabe von Dotierungsmaterial, z. B. PCl₃, kann man die entstehenden Schichten dotieren, und erhält einen PN-Übergang. Da er auf der ganzen freiliegenden Oberfläche entsteht, muss er teilweise entfernt werden, um die gewünschte Struktur zu erhalten. Dieses neueste Verfahren gibt noch grössere Freiheit in der Wahl des Konzentrationsverlaufes, so dass man hoffen kann, Siliziumdioden mit noch weiter verbesserten Eigenschaften zu erzeugen.

## 5. Eigenschaften von Si-Leistungsdioden

Wie sind nun die Kennlinien der Halbleiterdioden beschaffen? Fig. 12 zeigt Oszillogramme der Kennlinien einer DS 200-Leistungsdiode von Brown, Boveri. Auf der rechten Seite des Bildes ist die Durchlasskennlinie, auf der linken die Sperrkennlinie, (allerdings in wesentlich verschiedenem Maßstab aufgetragen). Der Durchlaßstrom beginnt erst zu fließen, wenn eine Grenzspannung, die sog. Schleusen-

Fig. 12

Oszillogramm der Kennlinie einer Brown, Boveri-Si-Leistungsdioden DS 200  
 a Sperrkennlinie; b Durchlasskennlinie



spannung überschritten wird. Mit steigender Spannung steigt dann der Strom annähernd linear an. Der Sperrstrom ist viele Größenordnungen kleiner als der Durchlaßstrom. Er verläuft bei guten Dioden mit zunehmender Spannung anfänglich sehr flach und steigt dann allmählich an. Wenn bei Erreichen einer bestimmten Spannung infolge Stossionisation eine lawinenartige Vermehrung der Ladungsträger im Innern des Halbleiters erfolgt, dann steigt der Sperrstrom sehr steil an. Auf dem Oszillogramm gemäss Fig. 12 ist diese Spannung noch nicht erreicht.

Auf Fig. 13 ist der max. zulässige Überlaststrom von 10 ms Dauer als Funktion des Scheitelwertes der Nennstromstärke für Dioden verschiedener Fabrikate aufgetragen. Die Werte variieren stark von 3...8facher Überlast. Das ist ein Zeichen für die unterschiedliche Dimensionierung und Qualität der verschiedenen Fabrikate. Die Dioden für grosse Ströme von 450...500 A sind merklich weniger überlastbar als die 200-A-Dioden.

Was passiert, wenn eine Diode mit einem zu grossen Strom überlastet wird? Dann steigt die Temperatur der Siliziumscheibe und damit der Sperrstrom, wie Fig. 14 zeigt. Hier ist mit einer Prüfschaltung (Fig. 15) der Sperrstrom in der Mitte jeder Sperrzeit oszillographiert. Bei der normalen Strombelastung von 600 A (Scheitelwert) erreicht der Sperrstrom nur kleine Werte von ca. 10 mA. Während 0,3 s wurde die Diode mit 3000 A (Scheitelwert) belastet. Dadurch

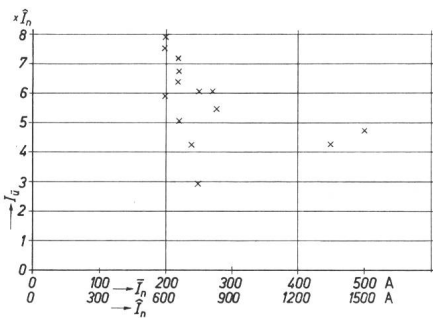


Fig. 13

Zulässiger Überlaststrom  $I_{ii}$  von 10 ms Dauer im Vielfachen der Scheitelwertes der Nennstromstärke  $I_n$  für Si-Leistungsdioden verschiedener Fabrikate

$\bar{I}_n$  Mittelwert des Nennstromes;  $\hat{I}_n$  Scheitelwert des Nennstromes

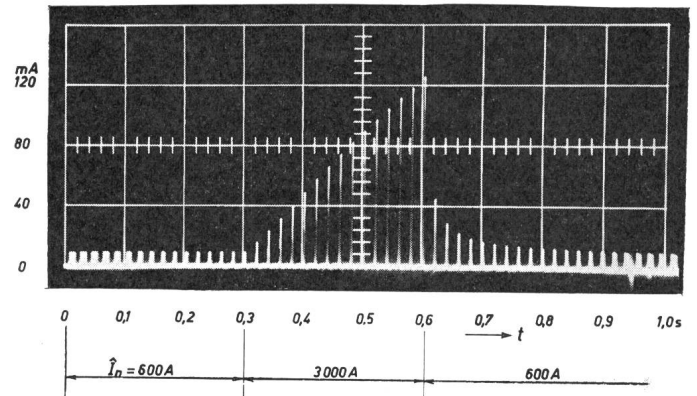


Fig. 14

Oszillogramm der Sperrströme einer Si-Leistungsdioden DS 200 bei Nennstrom und bei 5facher Überlast  
 Prüfschaltung nach Fig. 15  
 $\hat{I}_n$  Scheitelwert des Nennstromes;  $t$  Zeit

wird die Siliziumscheibe zusätzlich aufgeheizt, so dass der Sperrstrom in jeder folgenden Sperrperiode grössere Werte annimmt, in diesem Fall bis ca. 125 mA. Während des normalen Betriebes am Ende der Überlastperiode ist der Sperrstrom noch erhöht und sinkt dann allmählich entsprechend dem Abkühlen der Siliziumscheibe ab. Je grösser der Sperrstrom ist, um so mehr heizt auch er die Siliziumscheibe auf, und zwar während der Sperrzeit, in der sich die Siliziumscheibe abkühlen sollte. Das kann soweit gehen, bis ein Wärmedurchschlag erfolgt, worauf das Silizium schmilzt und der Gleichrichter zerstört wird. Bei weniger hohen, dafür länger dauernden Überlasten kann es aber vorkommen, dass die Lote schmelzen und auf diese Weise die Zerstörung eingeleitet wird. Die Grösse der zulässigen Überlast hängt natürlich von der Dauer des Überlaststromes ab. Man bestimmt daher Überlastkennlinien, die nicht überschritten werden dürfen.

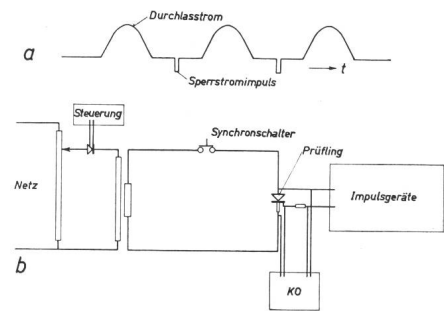


Fig. 15

Prüfschaltung

a Stromverlauf in der Siliziumdiode während der Aufnahme des Oszillogrammes gemäss Fig. 14;  $t$  Zeit  
 b Prinzipschema der Prüfschaltung nach O. Schärli

Prinzipiell empfindlicher sind die bisher üblichen Halbleiterdioden auf spannungsmässige Überlastung. Schon äusserst kurzzeitige Überspannungen können zum Durchschlag und damit zur Zerstörung des Gleichrichters führen. Die Angaben der Hersteller über die zulässigen Spannungen sind daher genau einzuhalten. Durch geeignete Massnahmen, wie z. B. Parallelschaltung von Widerständen und Kondensatoren ist dafür zu sorgen, dass schädliche Überspannungen gedämpft werden. Dabei ist zu beachten, dass die Halbleiterdioden selbst Überspannungen zu Beginn der Sperrzeit ver-

ursachen können. Nach dem Erlöschen des Vorwärtsstromes sind noch freie Ladungsträger in der Mittelzone des Gleichrichters vorhanden, so dass anfänglich ein grosser Strom fließen kann. Sobald die Ladungsträger an die Elektroden gewandert sind, was nach wenigen  $\mu\text{s}$  der Fall ist, bricht der relativ grosse Sperrstrom zusammen, und es treten an den Induktivitäten Überspannungen auf. Dieser sog. Trägerstauereffekt ist eine Eigenschaft der Halbleiter, die bei der Anwendung berücksichtigt werden muss.

Der Einfluss der Temperatur auf die Eigenschaften der Halbleiterdioden wurde bereits erwähnt. Da einerseits der Sperrstrom mit der Temperatur ansteigt und andererseits relativ tieferschmelzende Lote verwendet werden, sind dem Halbleitergleichrichter Temperaturgrenzen gesetzt. Erreicht die Umgebungstemperatur hohe Werte von z. B.  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , so können Dioden doch noch verwendet werden. Durch Wahl der Betriebsbedingungen muss aber dafür gesorgt werden, dass die vom Hersteller angegebene Temperaturgrenze nicht überschritten wird. Das wird durch Herabsetzung der maximalen Stromstärke und evtl. durch zusätzliche Kühlung erreicht. Wesentlich ist dabei die Temperatur im Innern des Siliziumscheibchens. Da man diese nicht einfach messen kann, haben viele Hersteller Messlöcher im Gehäuseboden angebracht, in denen man eine Temperatur messen kann, die bei stationärem Betrieb proportional zur Temperatur des PN-Überganges ist.

Auch auf das Verhalten bei wechselnder Belastung wurde bereits kurz eingegangen. Infolge der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten des Kupferbodens und der Siliziumscheibe treten bei Temperaturänderungen in der Lotschicht Spannungen auf, die zu Verformungen führen. Diese bleiben bei Verwendung von sog. Hartloten viel eher im elastischen Bereich als bei Weichloten. Infolge ihrer geringeren mechanischen Festigkeit werden diese bei Lastwechseln oft plastisch verformt. Wiederholt sich die Temperaturänderung sehr oft, so kann das zu Rissen in der Lotschicht führen. Dadurch wird der Wärmeübergang verschlechtert und die Diode wird zerstört. Es handelt sich um eine ähnliche Erscheinung wie die Ermüdungsbrüche bei auf Wechsellast beanspruchten Bauteilen. Die Verhältnisse, die in diesem Falle vorliegen, überblickt man am besten mit einem sog. Wöhler-Diagramm.

Fig. 16 zeigt das Analogon für die Temperaturwechselbeständigkeit von Si-Leistungsdioden. Horizontal ist die Anzahl Lastwechsel  $P_w$ , d. h. natürlich auch Temperaturwechsel, und vertikal die Temperaturdifferenz  $\Delta T_{PN}$ , die der PN-Übergang während eines Lastwechsels erleidet, aufgetragen. Es ist der prinzipielle Verlauf der Kurve für 2 ver-

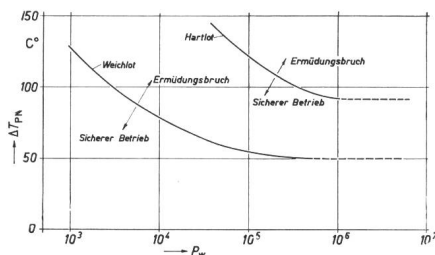


Fig. 16

Prinzipieller Verlauf der Grenzkurven der Temperaturwechselbeständigkeit von Si-Leistungsdioden für ein Weich- und ein Hartlot  
 $\Delta T_{PN}$  Temperaturdifferenz;  $P_w$  Lastwechsel

schiedene Lote aufgezeichnet. Jede Kurve grenzt das Gebiet des sicheren Betriebes von dem des Ermüdungsbruches ab. Wenn also eine weichgelötete Diode z. B. 10 000 Lastwechseln erlitten hat, wobei die Temperatur des PN-Überganges jedesmal um  $50\text{ }^\circ\text{C}$  gestiegen und gefallen ist, dann tritt kein Defekt auf. Beträgt dagegen  $\Delta T_{PN} = 100\text{ }^\circ\text{C}$ , dann wird die Diode zerstört. Hohe Lastwechselzahlen werden bei kleinen  $\Delta T_{PN}$  erreicht. Bei Verwendung von Loten mit höherer Festigkeit können höhere  $\Delta T_{PN}$  zugelassen werden. Die Lage der Grenzkurve kann aber auch durch konstruktive Massnahmen beeinflusst werden. Es gelingt so, Halbleiterdioden herzustellen, die innerhalb des zulässigen Temperaturbereiches lastwechselfest sind.

Fasst man den Stand der Entwicklung der Halbleiterdioden zusammen, so ist ersichtlich, dass es sich um statische Gleichrichter von kleiner Grösse, aber von relativ grossen Einheitsleistungen von 100 bis über 800 kW handelt. Sie weisen sehr kleine Verluste auf und sind weitgehend überlast- und lastwechselfest. Die bis heute verwendeten Dioden sind aber empfindlich auf Überspannungen, so dass sie entsprechend geschützt werden müssen. Die einzelnen Dioden können leicht zu grösseren Einheiten zusammengebaut werden, um sie den Anforderungen des Betriebes optimal anzupassen. Das Betriebsverhalten ist sehr gut. Unterhaltsarbeiten sind abgesehen von einer evtl. Reinigung der Kühler nicht nötig. Ein Ersatz von evtl. vereinzelt ausfallenden Dioden ist sehr leicht möglich. Der technische Stand hat ein erfreulich hohes Niveau erreicht. Die Technik bleibt aber nicht stehen, und so fragt man sich, welches sind die weiteren Entwicklungstendenzen?

## 6. Entwicklungstendenzen

Einige Ansätze der Entwicklung sind eindeutig erkennbar. Es sind Bestrebungen im Gange, die Stromstärke pro Diode zu erhöhen. Ausser den meistens verwendeten 200-A-Dioden sind vereinzelt 400...500-A-Dioden im Handel. Die Erhöhung der Stromstärke kann durch Verwendung von grösseren Siliziumscheiben bei praktisch gleicher Technik verwirklicht werden. Hier stellen sich aber bald ernsthafte Probleme.

Die Siliziumscheiben müssen von möglichst guter, gleichmässiger Qualität sein. Das bereitet Schwierigkeiten und erhöht den Fabrikationsausschuss. Ein einziger kleiner Fehler kann zum Ausschuss führen. Es ist nun viel weniger wahrscheinlich, dass so ein Fehler auf einer Siliziumscheibe von 20 mm Durchmesser als auf einer Scheibe von z. B. 30 mm auftritt. Zudem werden die Probleme, die die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Baumaterialien bieten, immer grösser, je grösser die Dimensionen der Diode werden.

Die Schwierigkeiten, die sich hier bieten, versucht eine Firma zu umgehen, indem sie in ein Gehäuse mehrere kleinere, parallelgeschaltete Dioden fest einbaut. Fig. 17 zeigt 3 verschiedene Typen für 160, 240 und 650 A. Voraussetzung für diese Konstruktion ist aber weitgehendste Gleichmässigkeit der Dioden. Ist das nicht der Fall, dann werden einzelne Dioden überlastet. Der Nachteil ist die relativ geringe zulässige Spannung von 400 V, ein Vorteil die strommässige Überlastbarkeit. Sie ist besser als bei Dioden, die eine einzige grosse Siliziumscheibe enthalten.



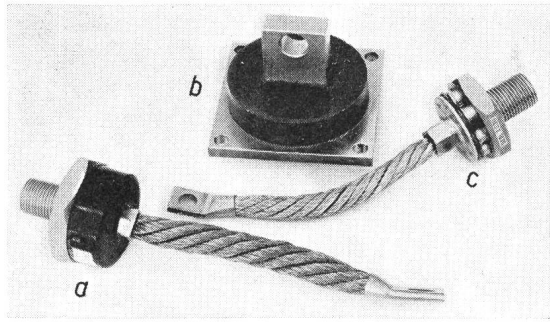


Fig. 17  
Si-Leistungsgleichrichter

bestehend aus mehreren in einem Gehäuse parallel geschalteten kleineren Gleichrichtern  
a 240 A; b 650 A; c 160 A

Auch in Bezug auf die zulässige Sperrspannung geht die Entwicklungstendenz nach höheren Werten. Während bis vor kurzem 600 V periodisch zulässige Spitzensperrspannungen als Maximum galten, erreicht man jetzt Spannungen bis 1200 V. Durch geeignete Dimensionierung des Innern des Siliziumscheibchens und der Oberflächengestaltung kann man noch weiter gehen. Man muss dabei aber, wie bereits erwähnt, erhöhte Spannungsabfälle in Kauf nehmen. 2000 V periodisch zulässige Spitzenspannung dürfte in gewissen Fällen im Bereich des Möglichen liegen. Darüber hinaus steigt dann der Spannungsabfall zu stark an, so dass solche Gleichrichter kaum mehr für grosse Stromstärken in Frage kommen.

Eine sehr interessante Entwicklung hat sich mit der Schaffung der stoßspannungsfesten Dioden, auch Controlled-Avalanche-Dioden genannt, angebahnt [3]. Diese Dioden werden so genannt, weil der Spannungsdurchbruch im Innern der Siliziumscheibe als Lawinendurchbruch erfolgt und nicht auf der Oberfläche. Bisher übliche Dioden können in Sperrrichtung nur mit sehr kleinen Sperrströmen belastet werden. Tritt an irgendeiner Stelle im Innern des Gleichrichters eine Überlastung auf, so konzentriert sich der ganze Sperrstrom dort, und die Diode wird zerstört. Die überlastfesten Dioden dagegen ertragen in Sperrrichtung gleich grosse Leistungen wie in Durchlassrichtung, ohne Schaden zu nehmen.

Fig. 18 zeigt die Sperrkennlinie einer 200-A-Controlled-Avalanche-Diode abgebildet. Der Sperrstrom liegt in die-

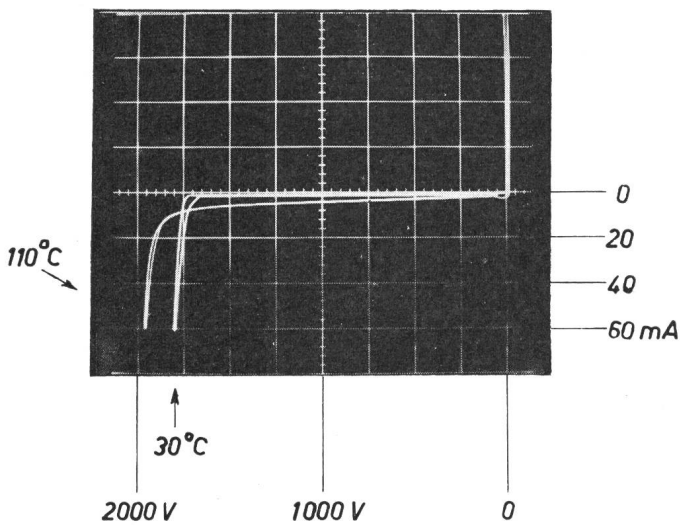


Fig. 18

Sperrkennlinie einer stoßspannungsfesten 200-A-Si-Diode im kalten und betriebswarmen Zustand

sem Fall im kalten Zustand bis gegen 1750 V weit unter 1 mA. Die Diode kann aber ohne Schaden über den Knick, d. h. den Einsatz des Lawinendurchbruchs hinaus betrieben werden. Eines der Kennzeichen dieser Dioden ist die Tatsache, dass der Knick in der Kennlinie im betriebswarmen Zustand, in diesem Fall 110 °C, erst bei höheren Spannungen auftritt. Das hat zur Folge, dass bei Überlast der Strom sich nicht auf eine oder wenige Strombahnen konzentriert, sondern gleichmässig über die ganze Fläche fliesst. Fliesst nämlich an einem Ort ein höherer Strom, dann erwärmt sich dort das Silizium. Damit wird der Lawinendurchbruch unterbrochen, und der Strom geht auf die daneben liegenden Teile der Siliziumscheibe, die weniger warm sind, über. Voraussetzung für die Herstellung solcher Dioden ist natürlich eine einwandfreie Gestaltung und Behandlung der Oberfläche.

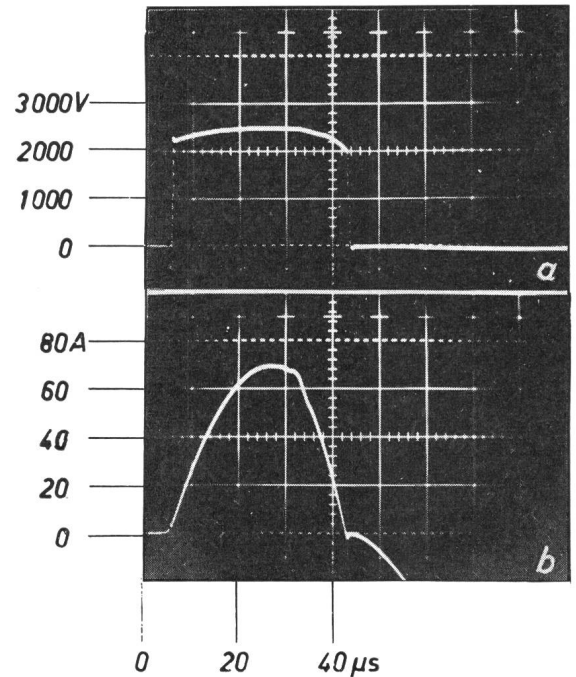


Fig. 19

Belastung einer stoßspannungsfesten Si-Leistungsdioden DS 200 in Sperrrichtung

a Oszillogramm des Spannungsverlaufes an der Diode, aufgenommen mit einer Prüfschaltung nach Fig. 20  
b Oszillogramm des Stromverlaufes

Auf Fig. 19 sind Sperrspannung und Sperrstrom einer stoßspannungsfesten Diode bei Überlastprüfung in Sperrrichtung aufgezeichnet. Während ungefähr 40 µs wurde in einer Prüfschaltung (Fig. 20) eine Spannung von über 3 kV an eine Controlled-Avalanche-Diode angelegt. Dabei stieg der Sperrstrom auf ca. 70 A, während die Spannung an der Diode 2500 V betrug. Die momentane Verlustleistung beträgt daher über 170 kW. Diese Dioden ertragen oft wiederholte Überlasten von über 100 kW ohne Störung. Das Durchlassverhalten dieser Dioden ist gleich wie bei bisher üblichen Dioden.

Abgesehen von den erwähnten Entwicklungsrichtungen zeichnen sich gewisse konstruktive Änderungen ab. Die Gehäuse werden in Richtung auf bessere Kühlung, hohe Beschleunigung und billigere Fabrikation weiter entwickelt.

Alle diese Weiterentwicklungen beziehen sich auf Si-Dioden. Man kann sich natürlich fragen, ob die Entwicklung mit dem Si-Gleichrichter am Ende angelangt ist. Die Ma-

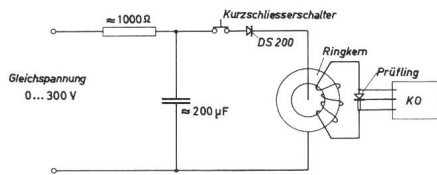


Fig. 20

Prinzipisches Schema der Prüfschaltung für stoßspannungsfeste Si-Leistungsdioden nach O. Schärli

terialforschung macht Fortschritte. Ausser den Elementhalbhalbleitern, wie Germanium und Silizium, kennt man eine ganze Anzahl Verbindungshalbleiter, wie GaAs, InP, SiC und viele andere. Es wurden auch schon Dioden aus GaAs und SiC hergestellt. Auf Grund der atomaren Daten dieser Verbindungen ermöglichen sie Gleichrichter herzustellen, die bei höheren Temperaturen betrieben werden können. Kleine SiC-Dioden für kleinere Spannungen wurden z. B. bei 600 °C versuchsweise verwendet. Einer Herstellung von Leistungsdioden für höhere Spannungen stehen ausserordentliche technologische Schwierigkeiten entgegen.

GaAs-Einkristalle werden jetzt industriell, aber zu einem sehr hohen Preis hergestellt. Für Leistungsdioden werden sie nicht verwendet. Mit SiC steht es noch viel schlechter. Es gelang bisher dieses Material überhaupt nicht genügend rein und in genügend einwandfreien, grossen Kristallen herzustellen. Man kann daher feststellen, dass auf längere Zeit der Silizium-Gleichrichter der vorherrschende Leistungsgleichrichter bleiben wird. Die Erfahrung zeigt aber, dass sich immer wieder neue Durchbrüche ereignen, so dass eine erprobte Technik abgelöst werden kann. Gegenwärtig ist aber keine solche Wende in Sicht.

### Literatur

- [1] G. Kubitzki: Prüfung von Silizium-Halbleiterbauelementen. AEG-Mitt. 54(1964)5/6, S. 464...469.
- [2] E. Weisshaar und H. Kunz: Untersuchungen an Halbleitern. Diffusion von Gallium in Silizium. Brown Boveri Mitt. 49(1962)11/12, S. 514...518.
- [3] F. W. Gutzwiller: Controlled Avalanche: A new Approach to Protecting Silicon Rectifier Diodes against Voltage Transients. Direct Current 7(1962)12, S. 335...338.

### Adresse des Autors:

Dr. W. Deck, Abteilungsvorstand, Physikalische Laboratorien der AG Brown, Boveri & Cie., 5400 Baden.

## Elektrische Wärmekabel

Von P. Hofer, Altdorf

621.365.4

Wärmekabel sind langgestreckte, niedertemperaturierte Heizkörper, welche sich vor allem durch ihre Biegsamkeit und die in weiten Bereichen variierbare Leistung auszeichnen. In der Folge werden einige Einzelheiten ihres Aufbaus und verschiedene Anwendungsmöglichkeiten beschrieben.

Les câbles chauffants sont des corps de chauffe développés en longueur dont les températures de surface sont basses. Ils se distinguent surtout par leur flexibilité et leur grande capacité d'adaptation en ce qui concerne leur puissance. Ci-après, on trouvera des indications sur leur structure, ainsi que divers exemples d'application.

### 1. Einleitung

Elektrische Wärmekabel sind langgestreckte, niedertemperaturierte Heizkörper. Ihr Aufbau entspricht weitgehend demjenigen von wärmebeständigen Einleiterkabeln für Energieübertragung, abgesehen von der Art des Leitermaterials. Die Kombination Kabel-Heizkörper führt zu verschiedenen Problemen, sowohl herstellungs- als auch anwendungstechnischer Natur, welche in der Folge näher beleuchtet werden. Die Einsatzmöglichkeiten der Heizkabel erstrecken sich von der Beheizung von Dachrinnen, Wasser- und Ölleitungen über verschiedene Anwendungen in der Kältetechnik bis zu Flächenheizungen (Treibbeete, Strassen, Brücken usw.). Zahlreiche Heizprobleme können überhaupt nur dank der Existenz von Heizkabeln befriedigend gelöst werden.

### 2. Aufbau der Heizkabel

Im Zentrum des Kabels liegt der Heizleiter in gerader oder gewendelter Form (Fig. 1). Je nach dem gewünschten Widerstand besteht er aus verschiedenen Legierungen wie Konstantan, Cumal usw. Die ausschliessliche Verwendung von achsenparallel angeordneten Leitern wäre herstellungstechnisch einfacher, würde jedoch praktisch zu unüberwindlichen Schwierigkeiten führen, da mit den in Drahtform erhältlichen Widerstandsmaterialien bald einmal das für einen einwandfreien Anschluss erforderliche Mindestmass des Durchmessers unterschritten werden müsste. Das nachfolgende, durchaus der Wirklichkeit entsprechende Beispiel dürfte die auftretenden Schwierigkeiten genügend illustrieren:

Es sei angenommen, dass ein 1,8 m langer Rahmen der Einfüllöffnung einer Kühltruhe durch ein Wärmekabel vor dem Einfrieren geschützt werden soll.

Erfahrungsgemäss genügt hiezu eine Leistung von ca. 8 W/m Rahmen, so dass eine Gesamtleistung von ca. 15 W zugeführt werden muss. Soll diese Leistung direkt aus dem 220-V-Netz bezogen werden, ist ein Kabel mit einem Totalwiderstand von ca. 3200 Ω oder ca. 1800 Ω/m erforderlich. Würde dies mit einem gestreckten Leiter aus z. B. Kanthal D ( $\rho = 1,35 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ) zu lösen versucht, wäre ein Drahtdurchmesser von ca. 0,03 mm vorzusehen. Ein solcher Draht verfügt jedoch weder über die minimal notwendige mechanische Festigkeit, noch könnte damit ein einwandfreier Anschluss erzielt werden. Entsprechende Untersuchungen haben denn auch gezeigt, dass ein Drahtdurchmesser von 0,1 mm in dieser Hinsicht das vertretbare Minimum darstellt. Dies führt zwangsläufig zu einem Draht, der mindestens in der 9fachen Länge des Kabels angeordnet ist, d. h. er muss

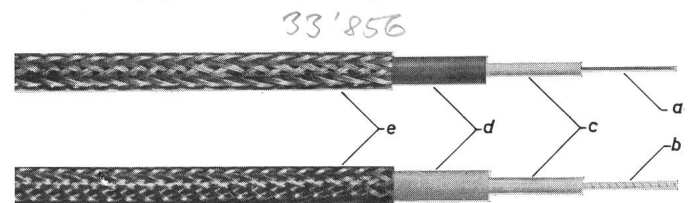


Fig. 1

### Aufbau der Heizkabel

a Widerstandsdraht (in gestreckter Anordnung); b Widerstandsdraht (in gewendelter Anordnung); c Glasfaser-Isolation; d Kunststoffmantel; e Metalldraht-Geflecht (Armierung)