

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 53 (1962)  
**Heft:** 19  
  
**Artikel:** Ein Hochspannungsgleichrichter mit Siliziumdioden  
**Autor:** Minkner, R. / Reinhold, G.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-916972>

### **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:** 17.01.2026

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

# BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)  
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

## Ein Hochspannungsgleichrichter mit Siliziumdioden

Von R. Minkner und G. Reinhold, Basel

621.314.632.027.8 : 669.782

*Es wird ein Hochspannungsgleichrichter in Drehstrom-Brückenschaltung mit Siliziumdioden für eine Ausgangsleistung von 100 kW beschrieben. Das elektrische Verhalten des Gleichrichters wird durch Messresultate erläutert. Nach Kenntnis der Verfasser handelt es sich um die erste Anwendung von Siliziumdioden in Europa für die Gleichrichtung einer Hochspannung von 200 kV.*

*L'article décrit un redresseur à haute tension équipé de diodes au silicium branchées en pont triphasé et fournissant une puissance de 100 kW. Le comportement électrique du redresseur est illustré par des résultats de mesures. Selon la connaissance des auteurs, c'est la première fois en Europe qu'on utilise des diodes au silicium pour redresser une haute tension de 200 kV.*

In dem unteren Spannungsbereich bis 100 kV steht eine Reihe von industriellen Gleichrichterventilen zur Verfügung, wie Glühkathodenventile, Thyratrons, Quecksilberdampfgleichrichter und Selenventile. Diese Gleichrichter beherrschen teilweise sehr hohe Ströme. Sobald die an den Ventilen auftretende Scheitelsperrspannung mehrere hundert Kilovolt beträgt, so werden nur Glühkathoden- und Selenventile als Gleichrichterelemente verwendet. Die Selenzellen können für Scheitelsperrspannungen bis zu 700 kV in Serie geschaltet werden, ohne dass die Spannungsverteilung längs der Serienschaltung gesteuert werden muss. Die praktische Anwendung der Glühkathodenventile wird durch die Kathodenheizung erschwert, die je nach Schaltung zusätzliche Isoliertransformatoren für die volle Gleichspannung notwendig macht. Ein Nachteil der erwähnten Hochspannungs-Selenventile ist der relativ kleine Nennstrom von einigen Milliampère. Nach der industriellen Einführung der Siliziumdioden war es naheliegend, Hochspannungsventile mit Siliziumdioden durch eine Serienschaltung wie bei Selenzellen aufzubauen. Diese Konstruktion bietet eine Reihe von Vorteilen, da die Siliziumdioden bei geringen Abmessungen in der Lage sind, Ströme von einigen Ampère gleichzurichten.

Bei Selenzellen liegt die Scheitelsperrspannung ungefähr bei 30 V, bei Siliziumdioden in der Grössenordnung von 1000 V. Eine einfache Betrachtung zeigt die Vorteile, die sich zum Beispiel für die Konstruktion eines Hochspannungsventils mit einer Nennscheitelsperrspannung von 250 kV ergeben:

In der Serienschaltung von Selenzellen müssten  $250 \text{ kV} / 30 \text{ V} = 8340$ , bei Siliziumdioden  $250 \text{ kV} / 1 \text{ kV} = 250$  Elemente verwendet werden. Da der Spannungsabfall bei beiden Ventilarten ungefähr gleich und proportional der Anzahl der verwendeten Elemente ist, so sind die Verluste in dem Ventil mit Siliziumdioden um den Faktor  $250/8340 \approx 1/30$  kleiner als bei dem Selenventil, sofern man den gleichen Belastungsstrom betrachtet. Der zulässige Gleichstrommittelwert einer Hochspannungsselenzelle liegt bei einigen Milliampère, derjenige einer Siliziumdiode jedoch bei einem Ampère.

Trotz der augenfälligen Überlegenheit der Siliziumdioden gab es zwei Gründe, einen technischen und einen wirtschaftlichen, weshalb die Siliziumdioden bisher nicht auf dem Gebiete der Hochspannungsgleichrichter verwendet wurden:

1. Bei der Serienschaltung von Siliziumdioden tritt eine ungleichmässige Spannungsverteilung längs der Ventilkette auf, die zu einer fortschreitenden Zerstörung der Dioden führt.

2. In den weitaus häufigsten Anwendungen von Hochspannungsgleichrichtern wurden bisher nur kleine Ströme verlangt, so dass die Verwendung von Siliziumdioden unwirtschaftlich gewesen wäre.

Der rasche Fortschritt der Hochspannungstechnik in den letzten Jahren erzeugte eine Nachfrage nach Hochspannungsgleichrichtern mit starken Strömen und zwang deshalb die Industrie, die Lösung des technischen Problems in Angriff zu nehmen. In diesem Zusammenhang seien die intensiven Bemühungen verschiedener Länder auf dem Gebiete der Energieübertragung mit hochgespanntem Gleichstrom erwähnt. Die Entwicklung der notwendigen Netzelemente erfordert Prüfgleichrichter mit Spannungen in der Grössenordnung von 1000 kV bei Strömen von einigen Ampère.

Die im folgenden beschriebene Konstruktion eines 200-kV-Gleichrichters mit Siliziumdioden wurde jedoch durch das Interesse der Kernphysiker an einer Einrichtung zur Beschleunigung hoher Ionenströme für Untersuchungen auf dem Gebiete der Plasmaphysik ausgelöst. Zur Speisung von Ionenbeschleunigern wurden zwei Gleichrichteranlagen für namhafte europäische Institute für Plasmaphysik gebaut. Beide Gleichrichter sind gleich, bis auf die Auslegung der Filterkreise. Ihre wichtigsten elektrischen Daten sind:

Nennleichspannung, regulierbar	... .. 0...200 kV
Nennstrom	... .. 0,5 A bei 200 kV und 1,0 A bei 100 kV
Welligkeit	... .. $\pm 1,0 \%$ , bzw. $\pm 0,1 \%$ bei 100 kV und 1,0 A <sup>1)</sup>

Das Prinzipschema in Fig. 1 zeigt, dass der Gleichrichter nach der klassischen Drehstrom-Brückenschaltung

<sup>1)</sup> bezogen auf die Gleichspannung, zwischen den Scheitelwerten gemessen.

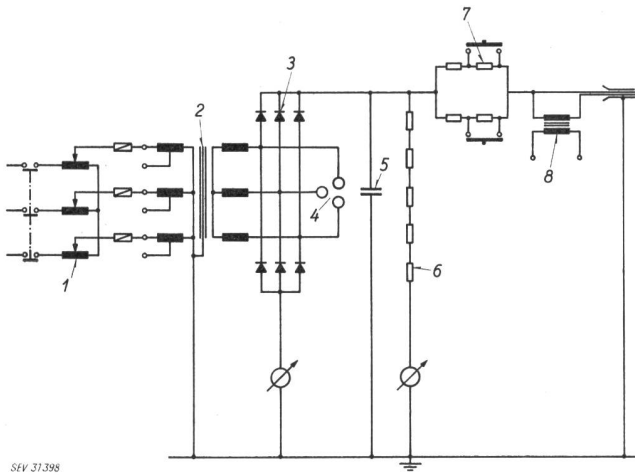


Fig. 1

Schaltung des Hochspannungsgleichrichters 200 kV, 0,5 A, bzw. 100 kV, 1,0 A

1 Reguliertransformator; 2 Hochspannungstransformator 3 Silizium-Ventile; 4 Schutzfunkenstrecken; 5 Glättungskondensator; 6 Messwiderstand; 7 Schutzwiderstände; 8 Isoliertransformator

tung aufgebaut ist. Diese Schaltung wurde wegen ihrer kleinen natürlichen Welligkeit gewählt, die, auf den Gleichspannungsmittelwert bezogen,  $\pm 7\%$  zwischen den Scheitelwerten beträgt und die unabhängig vom Belastungsstrom ist. Gemäss Fig. 1 kann die Anlage mit dem Hauptschalter vom Netz getrennt werden. Zwischen dem Reguliertransformator, mit dem die Spannung in Stufen von  $1,5\%$  eingestellt werden kann, und dem Hochspannungstransformator sind schnelle Sicherungen eingeschaltet, die speziell für den Schutz der Siliziumdioden bestimmt sind. Die Primärwicklungen des Hochspannungstransformators sind mit Mittelanzapfungen versehen, so dass die beiden Nenngleichspannungen 200 kV bei 0,5 A und 100 kV bei 1,0 A bei gleicher Primärspannung gewählt werden können. Am Eingang der Dreiphasen-Brückenschaltung sind Funkenstrecken als Schutz gegen Schaltüberspannungen angeordnet. Die Welligkeit der Ausgangsspannung wird mit zusätzlichen Glättungskondensatoren auf  $\pm 1\%$  reduziert. Mit einem (in dem Schaltbild nicht dargestellten) Saugkreis für 300 Hz wurde eine Welligkeit von  $\pm 0,1\%$  erreicht. Der Verbraucher wird mit dem Gleichrichter über Dämpfungswiderstände mit umschaltbarem Widerstandswert verbunden. In dem vorliegenden Spezialfall ist ein separater Isoliertransformator vorgesehen, der eine Leistung von 50 kVA auf das Gleichspannungsniveau von 200 kV zur Speisung der Ionenquelle überträgt.

Fig. 2 gibt einen Überblick über die Anlage während der Prüfung. Im Vordergrund erkennt man den Isoliertransformator und die Dämpfungswiderstände. Die sechs Hochspannungsventile, die beiden Glättungskondensatoren und der Messwiderstand sind auf einer gemeinsamen Grundplatte angeordnet. Im Hintergrund sieht man den Hochspannungstransformator. Die gesamte Anlage wird von einem zentralen Kommando-pult aus fernbedient und überwacht.

Die Hochspannungsventile bestehen aus einer Kette von Siliziumdioden, die zusammen mit einem Spannungsteiler, der für eine gleichmässige Verteilung der Sperrspannung sorgt, unter Öl in einem Isolierzylinder eingebaut sind. Infolge des ungleichmässigen Sperrwiderstandes der Dioden, der im Verhältnis  $1:100$  variieren kann, würde sich die Sperrspannung zuerst an den Dioden mit hohem Sperrwiderstand aufbauen und diese Zellen zerstören. Der Querstrom durch den Spannungsteiler ist um zwei Zehnerpotenzen grösser als der Sperrstrom der Dioden, der bei dem verwendeten Fabrikat  $10\text{ }\mu\text{A}$  beträgt. Trotzdem ist der Querstrom so klein im Vergleich zum Ventilstrom, dass die Welligkeit der Gleichspannung nur unmerklich vergrössert wird.

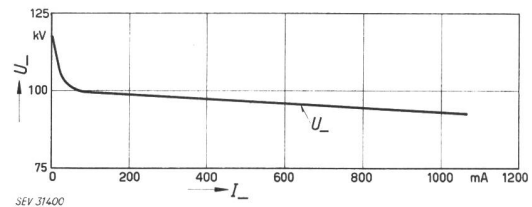


Fig. 3

Gleichspannung als Funktion des Gleichstromes bei konstanter Primärspannung  
 $U$  Gleichspannung;  $I$  Gleichstrom

Fig. 3 zeigt die Gleichspannung als Funktion des Belastungsstromes bei konstanter Eingangs-Wechselspannung in der Schaltung für 100 kV und 1,0 A. Zwischen Nullast und 50 mA bemerkt man einen deutlichen, nicht-linearen Abfall der Ausgangsspannung. Dieser Spannungsabfall rührt davon her, dass bei geringer Belastung infolge der Wirkung des Ladekon-

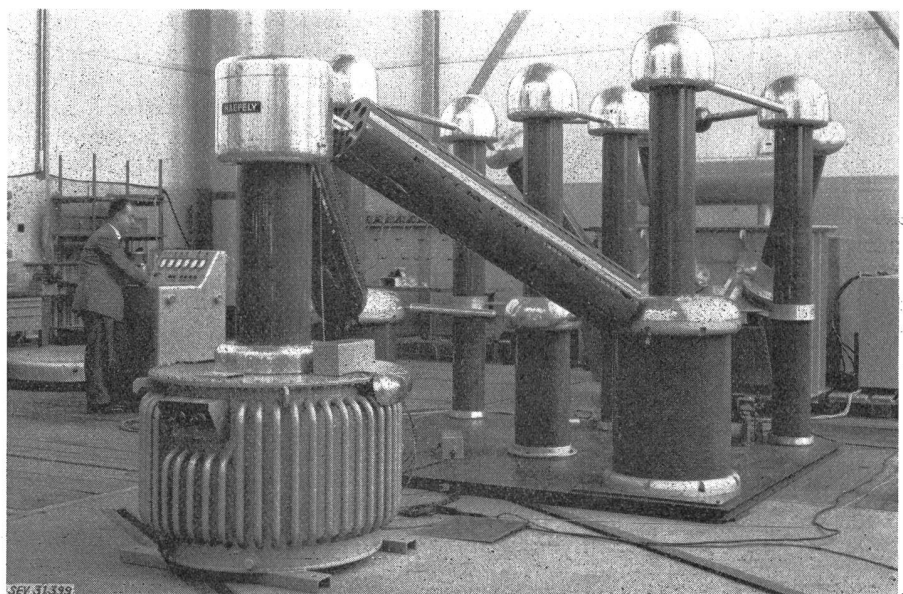


Fig. 2

Hochspannungsgleichrichter 200 kV mit Siliziumventilen

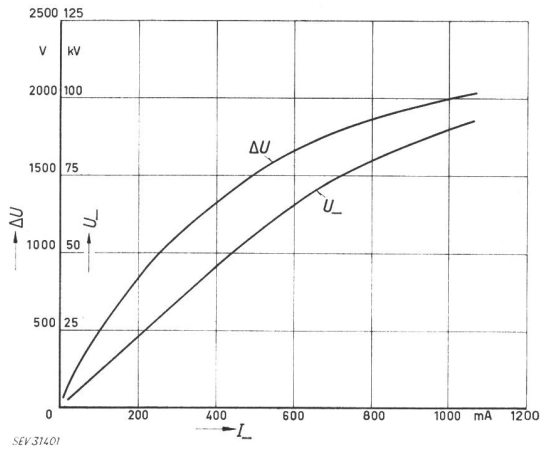


Fig. 4

Welligkeit und Gleichspannung als Funktion des Gleichstromes mit konstantem Belastungswiderstand bei variabler Primärspannung

$\Delta U$  Welligkeit;  $U$  Gleichspannung;  $I_L$  Gleichstrom

densators der Stromflusswinkel der Ventile klein ist und der Strom in den einzelnen Phasen die Form von Impulsen aufweist. Zusammen mit der Streuinduktivität der Transformatoren rufen die steilen Stromspitzen einen induktiven Spannungsabfall hervor, der sich bemerkbar macht, bis der Stromflusswinkel grösser wird. Zwischen 50 mA und 1000 mA nimmt die Ausgangsspannung einen linearen Verlauf; der Spannungsabfall, bezogen auf die Leerlaufspannung, beträgt nur noch einige Prozente.

Fig. 4 stellt die Ausgangsspannung und die Welligkeit als Funktion der Eingangs-Wechselspannung dar. Für diese Messung wurde der Gleichrichter mit einem Hochspannungs-Wasserwiderstand für 100 kW mit annähernd konstantem Widerstandswert belastet.

Fig. 5 zeigt zwei Oszillogramme des Stromverlaufes in den drei erdseitigen Ventilen. Die Stromkurven wurden mit einem Dreistrahl-Oszillographen aufgenommen. Bei dem unteren Oszillogramm wurden die Nulllinien der drei Strahlen zur Deckung gebracht. Aus den drei Stromkurven kann man durch Addition über der Zeitachse den Verlauf des Gleichstromes konstruieren. Ausserdem kann man aus den Oszillogrammen direkt den Überlappungswinkel ablesen. In Übereinstimmung mit der Theorie des Drehstrom-Brückengleichrichters steigt der Ventilstrom von Null stetig an. Zu Beginn der Leitphase fällt die Tangente der Stromkurve mit der Nulllinie zusammen.

Ein anderes Verhalten zeigt die Stromkurve am Ende der Leitphase, wo die Tangente die Nulllinie schneidet. Dieser Knick in der Stromkurve ruft einen Spannungssprung in Form eines plötzlichen Anstieges der Sperrspannung am Ventil hervor. Wie die prak-

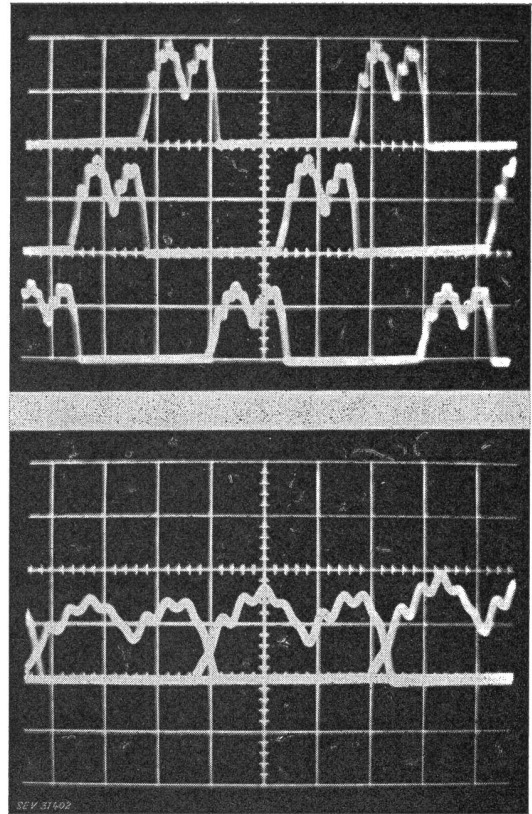


Fig. 5

Oszillogramm der Ströme in den drei erdseitigen Ventilen mit getrennter und gemeinsamer Nulllinie

Strom-Maßstab: 600 mA/Teilstrich;

Zeit-Maßstab: oben 5 ms/Teilstrich, unten 2 ms/Teilstrich

tische Erfahrung bewiesen hat, ist die Ventilkonstruktion dieser Beanspruchung gewachsen.

Die Untersuchungen an den beiden Gleichrichtern und die inzwischen einjährige Betriebserfahrung haben gezeigt, dass der Bau von Siliziumventilen für sehr hohe Sperrspannungen möglich ist. Durch die Anwendung der Siliziumdioden in der Hochspannungstechnik wird die bisherige Grenze des Strombereiches und der Gleichstromleistung beträchtlich erweitert, was dadurch deutlich zum Ausdruck kommt, dass der Nenngleichstrom in Ampère statt in Milliampère gemessen wird. Auf der Grundlage der vorliegenden Erfahrungen erscheinen heute Projekte für Gleichrichter mit Siliziumdioden für noch höhere Spannungen und Leistungen, denen die weitere technische Entwicklung zustrebt, als realisierbar.

Adresse der Autoren:

Dipl.-Ing. R. Minkner und Dr.-Ing. G. Reinhold, Emil Haefely & Cie. AG, Postfach Basel 2.