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

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 66 (1975)

Heft: 14

Artikel: Höchstspannungsgleichrichter für grosse Ströme

Autor: Reinhold, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915302

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: 12.07.2025

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

Höchstspannungsgleichrichter für grosse Ströme [1])

Von G. Reinhold

621.314.6.027.89

Es werden die bekannten Formeln für den kapazitiven und belastungsabhängigen Spannungsabfall sowie für die belastungsabhängige Welligkeit unter dem Gesichtswinkel diskutiert, welche Möglichkeiten sich für die Weiterentwicklung des Kaskadengleichrichters zu höheren Spannungen und Strömen bieten. Dazu wird auch eine Formel für die kapazitive Welligkeit erstmals abgeleitet. Diese grundsätzlichen Konstruktionsüberlegungen werden am Beispiel eines Prüfgleichrichters 2,5 MV/200 mA erläutert.

Les formules connues de la chute de tension et de l'ondulation résiduelle en fonction de la charge, ainsi, que la formule de la chute de tension capacitive pour les redresseurs en cascade sont commentées. Les possibilités du développement futur de redresseurs en cascade pour l'obtention de très hautes tensions et de courants élevés sont discutées à l'aide de ces formules. En outre, on en déduit une nouvelle relation pour l'ondulation résiduelle capacitive. Ces considérations d'ordre fondamental pour la conception de tels redresseurs sont illustrées pour l'exemple d'un redresseur d'essai de 2,5 MV/200 mA.

1. Einleitung

Durch die in verschiedenen Ländern vorangetriebene Entwicklung der Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) haben Prüfgleichrichter für sehr hohe Spannungen und grosse Ströme seit einigen Jahren ein besonderes Interesse erlangt. Bisher wurden normalerweise Prüfgleichrichter mit Spannungen bis zu 2 MV und Strömen bis zu 30 mA verlangt. Für die Komponentenentwicklung bei der HGÜ werden jedoch Spannungen zwischen 2 und 3 MV und Ströme gefordert, die grössenordnungsmässig eine Zehnerpotenz höher liegen als bisher. Die Weiterentwicklung der Hochspannungsgleichrichter zu höheren Spannungen und Strömen wurde nicht nur durch die HGÜ-Projekte ausgelöst, sondern auch durch das wachsende Interesse der Plasmaphysiker an stromstarken Injektoren für Versuche zur kontrollierten Kernfusion.

Es ist ein bemerkenswerter Zufall, dass den modernen Hochspannungsgleichrichtern in ähnlicher Weise wie den Stoßspannungsgeneratoren eine Schaltung zugrunde liegt, die schon seit Jahrzehnten bekannt ist. Der Marxschen Spannungsvervielfachungsschaltung bei den Stossgeneratoren entspricht die Kaskadenschaltung nach *Greinacher,* der in den Jahren 1920 und 1921 die nach ihm benannte Kaskadengleichrichterschaltung als erster beschrieben hat [1] [2]). Bekannt wurde die Kaskadenschaltung jedoch erst durch die Versuche von *Cockcroft* und *Walton,* die unabhängig von *Greinacher* im Jahr 1932 den Kaskadengenerator nochmals erfunden und für die Speisung eines Protonenbeschleunigers verwendet haben [2].

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Idealer Kaskadengleichrichter

Bei der einfachen Kaskadenschaltung nach Fig. 1 wird auf dem Wege der Gleichrichtung und Vervielfachung aus einer relativ niedrigen Wechselspannung eine hohe Gleichspannung erzeugt. Das Funktionsprinzip und die Theorie des Kaskadengleichrichters sind vielfach beschrieben und auch in der jüngeren Vergangenheit zum Gegenstand wissenschaftlicher Arbeiten gemacht worden [3; 4].

Die exakten Formeln zur Bestimmung der kritischen Kenngrössen des Kaskadengleichrichters sind kompliziert und der exakten numerischen Auswertung nur mit einem Elektronenrechner zugänglich. Für die vorliegende Betrachtung genügt es vielfach, auf die konventionellen Näherungsformeln zurückzugreifen. Diese Näherungsformeln weisen je nach Autor und Ableitungsmethode vernachlässigbare Unterschiede auf.

Die theoretische Leerlaufspannung eines einfachen (oder symmetrischen) Kaskadengleichrichters berechnet sich nach der Formel

$$U_g = 2\sqrt{2}\, N\, u_0 \qquad (1)$$

Darin bedeuten: N Stufenzahl,
u_0 Effektivwert der Sekundärspannung des Speisetransformators.

Die Beziehung (1) verleitet zu dem falschen Schluss, dass man eine beliebig hohe Gleichspannung einfach dadurch erreichen könne, dass man die Anzahl N der Stufen des Kaskadengenerators entsprechend erhöht. Tatsächlich treten aber bei dem Multiplikationsprozess in der Praxis Spannungsverluste auf, die der Vervielfachung physikalische Grenzen setzen.

2.2 Kapazitiver Spannungsabfall und kapazitive Welligkeit

Gleichzeitig mit *Woodyard* haben *Everhart* und *Lorrain* erstmals den Kaskadengleichrichter als einen Kettenleiter betrachtet, um den kapazitiven Spannungsabfall zu berechnen [5]. Dies geschah in Anbetracht der Streukapazität zwischen der Kathode und der Anode der früher benutzten Glühkathodenventile. Diese Betrachtung ist jedoch heute wieder aktuell, weil bei den modernen Hochspannungsgleichrichtern mit Siliziumventilen Steuerkondensatoren benutzt werden müssen, um eine gleichmässige Verteilung der Sperrspannung über der Diodenkette zu erreichen. Ausserdem ist zwischen der Schub- und Glättungssäule des Kaskadengleichrichters eine nicht vernachlässigbare Streukapazität vorhanden, die ebenfalls einen kapazitiven Spannungsabfall und eine kapazitive Welligkeit hervorruft. Für die Berechnung des kapazitiven Spannungsabfalls und der kapazitiven Welligkeit kann man die Gleichspannung über den Schub- und Glättungskondensatoren vollständig ausser acht lassen. Für diese Betrachtung wird der N-stufige Kaskadengleichrichter gemäss Fig. 1 durch einen Kettenleiter 2. Art dargestellt, der $n = 2N$ Sprossen aufweist (Fig. 2). Jedem Gleichrichterventil ist eine Sprosse des Kettenleiters zugeordnet. Mit C_s wird die Summe der Steuerkapazität eines Hochspannungsventils und der Streukapazität pro halbe Stufe bezeichnet. Da der kapazitive Spannungsabfall auch bereits dann auftritt, wenn der Kaskadengleichrichter nicht belastet wird, wird der Kettenleiter im Leerlauf untersucht. Dies bedeutet, dass der Strom, der aus der letzten Stufe entnommen wird, gleich Null ist.

[1]) Vortrag, gehalten im Rahmen eines Seminars für Hochspannungstechnik an der ETHZ, am 2. Juli 1974.
[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

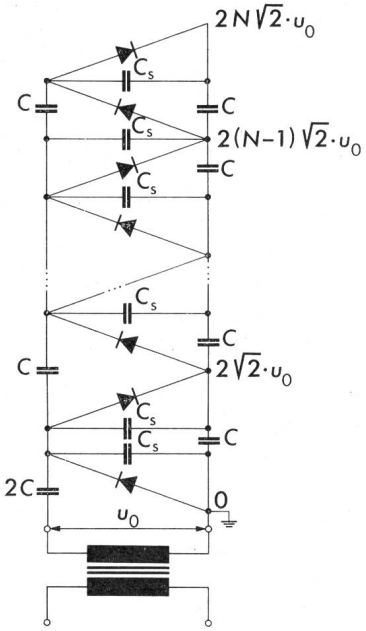

Fig. 1
Prinzipschaltbild eines N-stufigen einfachen Kaskadengleichrichters mit Streukapazitäten C_s

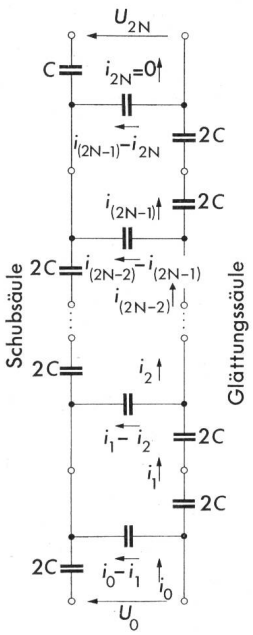

Fig. 2
Darstellung des Kaskadengleichrichters nach Fig. 1 als $2N$-sprossiger Kettenleiter

In dem vorliegenden Beispiel bedeutet C die Kapazität eines Schub- oder Glättungskondensators. Der unterste Schubkondensator weist die doppelte Kapazität auf.

Das Übertragungsmass g des Kettenleiters nach Fig. 2 berechnet sich nach der Beziehung

$$\cosh g = 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_s}{C} \tag{2}$$

Indem man $\cosh g$ in eine Reihe entwickelt, findet man

$$1 + \frac{g^2}{2!} + \frac{g^4}{4!} + \frac{g^6}{6!} + \ldots = 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_s}{C} \tag{3}$$

Da in den praktischen Fällen das Verhältnis C_s/C, d. h. das Verhältnis der Streukapazität einer Sprosse zur Kapazität eines Schub- oder Glättungskondensators sehr klein ist, kann man in der Reihenentwicklung die höheren Glieder vernachlässigen. Auf diese Weise erhält man

$$g \approx \sqrt{\frac{C_s}{C}} \tag{4}$$

Für die weitere Rechnung ist der Kennwiderstand Z von Bedeutung. Man findet nach der Kettenleitertheorie

$$Z \approx \frac{1}{j\omega \sqrt{C C_s}} \tag{5}$$

Die tatsächliche Gleichspannung U_g', die im Leerlauf am Kaskadengleichrichter auftritt, ist gleich der Summe der maximalen Gleichspannungen über den $2N$-Ventilen. Der Scheitelwert der Ventilgleichspannung ergibt sich aus dem Scheitelwert des Blindstroms, der parallel zu diesem Ventil fliesst, und dem Scheinwiderstand der Streukapazität. Man findet auf diese Weise für die tatsächliche Leerlauf-Gleichspannung

$$U_g' = \frac{\sqrt{2}}{j\omega C_s} \left[(i_0 - i_1) + (i_1 - i_2) + \ldots + (i_{2N-1} - i_{2N}) \right] \tag{6}$$

Weil im Leerlauf $i_{2N} = 0$ ist, vereinfacht sich die Beziehung (6) zu

$$U_g' = \frac{\sqrt{2}}{j\omega C_s} i_0 \tag{7}$$

Mit

$$i_0 = \frac{u_0}{Z} \operatorname{tgh} 2Ng \tag{8}$$

kann man das Verhältnis der tatsächlichen zur idealen Leerlaufgleichspannung berechnen:

$$\frac{U_g'}{U_g} = \frac{1}{2N \sqrt{\frac{C_s}{C}}} \operatorname{tgh} \sqrt{\frac{C_s}{C}} \tag{9}$$

Die Formel (9) beinhaltet, dass bereits im Leerlauf am Kaskadengleichrichter ein Spannungsabfall eintritt, so dass man zur Erzielung einer bestimmten Gleichspannung eine höhere Transformatorspannung u_0 aufwenden muss, als nach Gl. (1) zu erwarten wäre. Die numerische Auswertung von Gl. (9) ist in Fig. 3 dargestellt.

Es lohnt sich, die Kettenleitertheorie auch für die Berechnung der kapazitiven Welligkeit anzuwenden.

Aus Fig. 2 erkennt man, dass die kapazitive Welligkeit $\delta U_g'$ durch die Summe der Spannungsabfälle gegeben ist, die sich

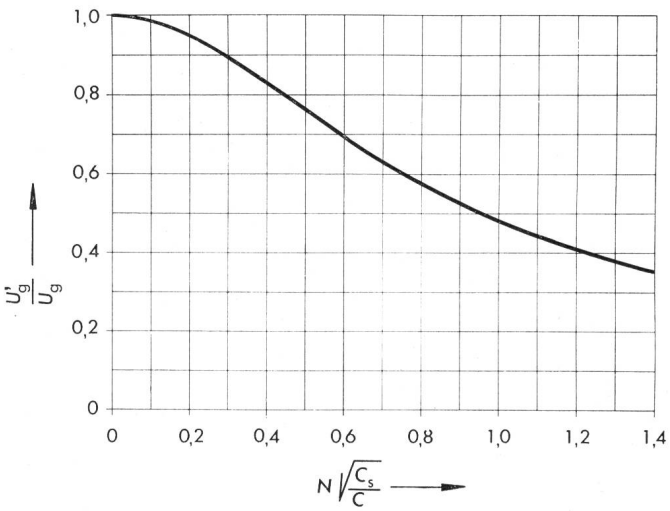

Fig. 3 **Relative Reduktion der Leerlaufspannung U_g'/U_g als Funktion von $N\sqrt{C_s/C}$**

infolge der Blindströme über den Glättungskondensatoren einstellen. Man sieht aus dem Schaltbild des Kettenleiters, dass nur auf jeder zweiten Sprosse ein Beitrag zum kapazitiven Spannungsabfall an der Glättungssäule entsteht. In der internationalen Praxis misst man die Welligkeit zwischen den Scheitelwerten und gibt sie in Prozenten der Gleichspannung an:

$$\delta U'_g = \frac{2\sqrt{2}}{j\omega C}\left(i_1 + i_3 + \ldots + i_{2N-1}\right) \tag{10}$$

Da der Blindstrom in der k-ten Sprosse durch

$$i_k = \frac{u_0 \sinh(2N-k)\,g}{Z \cosh 2Ng} \tag{11}$$

gegeben ist, erhält man für das Verhältnis der kapazitiven Welligkeit $\delta U'_g$ zur tatsächlichen Leerlaufgleichspannung U'_g die Summenformel

$$\frac{\delta U'_g}{U'_g} = \frac{2g^2}{\sinh 2Ng} \sum_{n=1}^{N} \sinh(2n-1)\,g \tag{12}$$

Die in Gl. (12) auftretende Summe lässt sich durch Umwandlung als ein geschlossener Ausdruck angeben:

$$\sum_{n=1}^{N} \sinh(2n-1)\,g = \frac{1}{2} \cdot \frac{\cosh 2Ng - 1}{\sinh g} \tag{13}$$

Es folgt schliesslich mit Gl. (4):

$$\frac{\delta U'_g}{U'_g} = \frac{C_s}{C} \cdot \frac{\cosh 2N\sqrt{\frac{C}{C_s}} - 1}{\sinh\sqrt{\frac{C_s}{C}} \cdot \sinh 2N\sqrt{\frac{C_s}{C}}} \tag{14}$$

Diese wichtige Beziehung (14) ist in Fig. 4 als Funktion des Verhältnisses C_s/C für verschiedene Stufenzahlen N als Parameter in Kurvenform ausgewertet.

2.3 Belastungsabhängiger Spannungsabfall und belastungsabhängige Welligkeit

Wenn der Kaskadengleichrichter mit einem Gleichstrom belastet wird, so entsteht ein belastungsabhängiger Spannungsabfall ΔU_{g1}, der sich nach der Näherungsformel

$$\Delta U_{g1} = \frac{I}{fC} \cdot \frac{N}{3}(2N^2 + 1) \tag{15}$$

berechnet. Darin bedeuten:

I Gleichstrommittelwert
f Arbeitsfrequenz

Die Indizes 1 und 2 weisen auf den einfachen bzw. symmetrischen Kaskadengenerator hin. Auf den Spannungsabfall am Hochspannungstransformator mit seiner wesentlichen Streuinduktivität wird hier nicht eingegangen.

Da der belastungsabhängige Spannungsabfall der dritten Potenz der Stufenzahl proportional ist, ergibt sich für die Stufenzahl ein Grenzwert, bei dem die durch die Erhöhung der Stufenzahl gewonnene Spannung durch den höheren belastungsabhängigen Spannungsabfall an den Schub- und Glättungskondensatoren wieder kompensiert wird. Dies ist der Grund dafür, dass man mit einem vielstufigen Kaskadengleichrichter nicht eine beliebig hohe Spannung erreichen kann.

Ausser dem Spannungsabfall, der durch den Ladungstransport über die Schub- und Glättungskondensatoren entsteht,

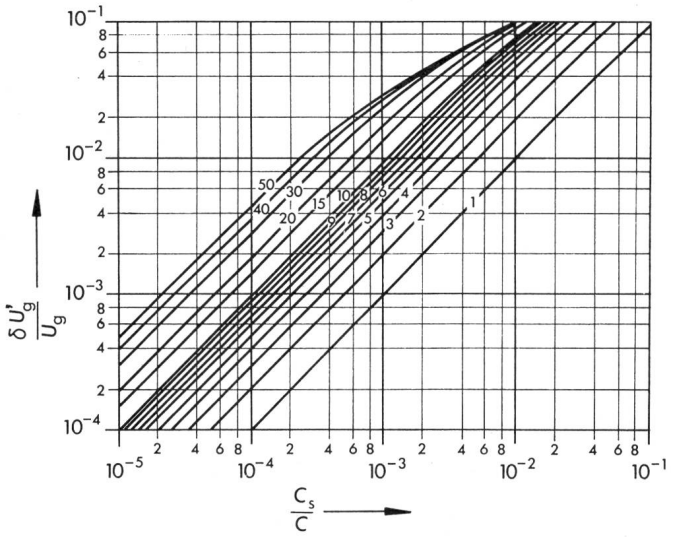

Fig. 4 Relative kapazitive Welligkeit $\delta U'_g/U'_g$ als Funktion des Kapazitätsverhältnisses C_s/C für verschiedene Stufenzahlen

muss man noch den Spannungsabfall an den Hochspannungsventilen in Betracht ziehen. Für die Berechnung des Spannungsabfalls an den hochohmigen Selengleichrichtern hat *Baldinger* eine Formel abgeleitet [6]. Bei den modernen Hochspannungsventilen, die aus Siliziumdioden zusammengesetzt sind, ist der Spannungsabfall vernachlässigbar klein.

Die Unmöglichkeit, aus den geschilderten Gründen mit dem einfachen Kaskadengleichrichter eine Spannung von mehreren Megavolt zu erreichen, hat zur Entwicklung des symmetrischen Kaskadengleichrichters geführt, der in Fig. 5 dargestellt ist.

Bei den symmetrischen Kaskadengleichrichtern tritt die kapazitive Welligkeit nicht auf, weil sich die kapazitiven Blindströme in der Glättungssäule kompensieren. Infolge der Streukapazitäten zwischen den Schubsäulen können durch die Schubkondensatoren beträchtliche Blindströme fliessen. Es ist möglich, diese Blindströme durch Drosselspulen in den einzelnen Stufen des symmetrischen Kaskadengenerators zu kompensieren und so auch den Speisetransformator nicht zusätzlich zu belasten.

Während die belastungsabhängige Welligkeit δU_{g1} des einfachen Kaskadengenerators sich nach der Formel

$$\delta U_{g1} = \frac{I}{fC} \cdot \frac{1}{2} N(N+1) \tag{16}$$

berechnet, gilt für die Welligkeit δU_{g2} am symmetrischen Kaskadengleichrichter die Beziehung

$$\delta U_{g2} = \frac{I}{fC} \cdot \frac{1}{2} N \tag{17}$$

wobei die Welligkeit wieder zwischen den Scheiteln gemessen wird. Zur Gesamtkapazität C/N der Glättungssäule ist noch die Streukapazität der Abschirmhaube gegen Erde zu addieren, die in der gleichen Grössenordnung liegt.

Für den belastungsabhängigen Spannungsabfall ΔU_{g2} gilt die Näherungsformel

$$\Delta U_{g2} = \frac{I}{fC} \cdot \frac{N}{3}\left(\frac{N^2}{2} + 1\right) \tag{18}$$

3. Erfahrungsgrundlagen

3.1 Physikalische Grenzen

Die Analyse der Gl. (18) ist der Ausgangspunkt für die denkbaren Verbesserungen, die man am symmetrischen Kaskadengleichrichter anbringen kann, um höheren Ströme und/oder höhere Spannungen zu erreichen. Es zeigt sich, dass man bei einer Vergrösserung des Stromes I oder der Stufenzahl N die im Nenner der Gleichung auftretende Frequenz oder die Kapazität der Schubkondensatoren vergrössern muss, um den belastungsabhängigen Spannungsabfall in vernünftigen Grenzen zu halten.

Für die Erzeugung hoher Gleichspannungen bis zu 4 MV für die Speisung von Beschleunigern für kernphysikalische Forschungsarbeiten wurden schon vor 15 Jahren druckgasisolierte symmetrische Kaskadengleichrichter gebaut, die 20 Stufen aufwiesen und bei einer Speisefrequenz von 10 kHz Gleichströme bis zu 10 mA lieferten [7]. Druckgasisolierte Kaskadengeneratoren im Milliampèrebereich erscheinen bis 10 MV technisch realisierbar.

Es ist wichtig, in diesem Zusammenhang festzustellen, dass man auch beim symmetrischen Kaskadengleichrichter in der Wahl der kritischen Parameter, d. h. der Arbeitsfrequenz, der Kapazität der Schubkondensatoren und der Stufenzahl nicht frei ist, sondern Grenzwerte zu beachten hat. Die Arbeitsfrequenz des Kaskadengleichrichters kann nicht beliebig gesteigert werden, weil keine Frequenzumformergruppen und Hochspannungstransformatoren für hohe Leistungen und Frequenzen von mehr als 10 kHz zur Verfügung stehen. In der Praxis bedeutet dies, dass man sich auf eine maximale Arbeitsfrequenz von 2 kHz beschränken muss. Bei dieser Frequenz kann man auch für den leistungsstarken Hochspannungs-Speisetransformator noch mit normalem Transformatorenblech auskommen. Die Kapazität der Schub- und Glättungskondensatoren kann ebenfalls nicht beliebig gesteigert werden, da sonst der Kaskadengleichrichter zu einem Stossgenerator mit einer beträchtlichen gespeicherten Energie werden würde. Die im Kaskadengleichrichter gespeicherte Energie kann bei internen Durchschlägen oder Überschlägen am Prüfobjekt schwere Schäden verursachen. Aus der Erfahrung lässt sich sagen, dass die im Kaskadengenerator gespeicherte Energie 30 kWs nicht überschreiten sollte. Die besonders kritische Stufenzahl N, die mit der dritten Potenz in die Rechnung eingeht, kann auch nicht niedrig gehalten werden, weil dies zu hohe Stufenspannungen zur Folge hätte. Man muss davon ausgehen, dass sowohl für die Schub- und Glättungskondensatoren als auch für die Gleichrichterventile eine Stufenspannung von 400 kV den Maximalwert darstellt. Bei noch höheren Stufenspannungen macht man die Feststellung, dass längs der Kondensatoren und längs der Hochspannungsventile eine nichtlineare Spannungsverteilung auftritt, die Überschläge auslöst.

3.2 Kritische Gleichrichterkomponenten

Erst durch die Konstruktion von Hochspannungs-Gleichrichterventilen mit Siliziumdioden anstelle der Selenventile wurde ein wesentlicher Fortschritt im Bau von Prüfgleichrichtern ermöglicht. Dass der Einsatz von Siliziumdioden solange auf sich warten liess, liegt an ihrer bekannten Empfindlichkeit gegenüber Überspannungen und Überströmen. Es ist bekannt, dass man auch mit den modernen Avalanchedioden keine Serienschaltung für hohe Sperrspannungen aufbauen kann, die Überspannungen oder Überströmen widersteht. Zum Schutz der immer noch relativ empfindlichen Siliziumdioden ist es notwendig, in die Diodenkette Dämpfungswiderstände einzuschalten, die den Kurzschlußstrom auf ein verträgliches Mass begrenzen. Ferner muss die Diodenkette mit Kondensatoren kapazitiv gesteuert werden, um eine lineare Verteilung der Sperrspannung zu erzielen. Hochspannungsventile mit Siliziumdioden stellen deshalb ein Netzwerk dar, das sorgfältig berechnet werden muss. Um eine gute Schutzwirkung durch die Serienwiderstände zu erzielen, sollten die Dämpfungswiderstände möglichst hochohmig gemacht werden. Dies hätte aber zur Folge, dass die Ventile, durch die während der Leitphase ein hoher Effektivwert des Stromes fliesst, sich im Betrieb sehr stark erwärmen würden. Aus diesem Grund muss man die Dämpfungswiderstände so dimensionieren, dass bei den maximalen Betriebsbedingungen des Gleichrichters die zulässige Erwärmung der Ventile, die bei etwa 80 bis 90 °C liegt, nicht überschritten wird. Die Steuer-, d. h. Schutzwirkung des kapazitiven Spannungsteilers parallel zu der Ventilkette ist um so höher, je grösser die Querkapazität ist. Eine hohe Querkapazität zwischen den Schubsäulen des symmetrischen Kaskadengleichrichters hat jedoch hohe kapazitive Blindströme zur Folge, wie die Betrachtung nach *Everhart* und *Lorrain* gezeigt hat. Es muss also auch hier ein Kompromiss geschlossen werden.

Bei der Auslegung des Kaskadengenerators und der Ventile stellt die Berechnung des Effektivwertes des Ventilstroms ein besonderes Problem dar, da das Verhältnis zwischen dem Effektiv- und dem Gleichstrommittelwert in der Praxis zwischen 1,5 und 2,5 variieren kann. Dieses kritische Verhältnis hängt – ebenso wie der wichtige Stromflusswinkel – vom Ver-

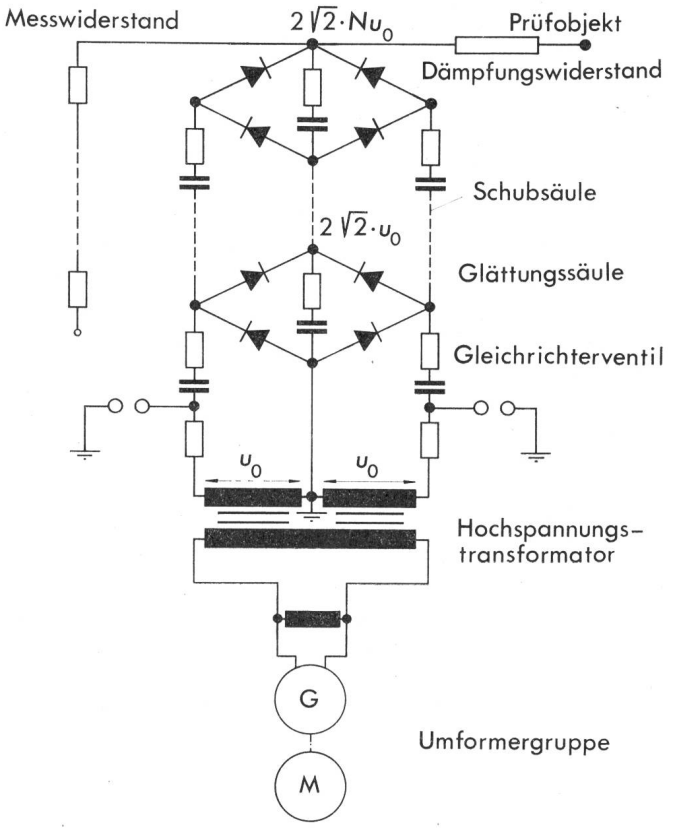

Fig. 5 Blockschaltbild eines kompletten symmetrischen Kaskadengleichrichters

hältnis des komplexen Innenwiderstandes der gesamten Gleichrichterschaltung zum Belastungswiderstand ab.

Es hat sich schon seit vielen Jahren die Praxis eingebürgert, in die Schub- und Glättungskondensatoren Dämpfungswiderstände einzubauen, die so bemessen sind, dass bei einer kurzschlussartigen Entladung der Kondensatoren zumindest der aperiodische Grenzfall erreicht wird (Fig. 5). In der Praxis verwendet man Widerstandswerte, die zwischen 10 Ω und einigen wenigen 100 Ω liegen. Die Dämpfungswiderstände begrenzen den Kurzschlußstrom des Kaskadengenerators im Falle eines inneren oder äusseren Überschlags.

Wie man aus dem Schaltbild des Kaskadengleichrichters erkennt (Fig. 5), addieren sich die Ströme in den Kondensatoren in der Weise, dass durch den untersten Schubkondensator der *N*fache Strom fliesst. Wenn man die Dämpfungswiderstände in den Schubkondensatoren zum besseren Schutz der Gleichrichterkomponenten zu hochohmig macht, werden die Kondensatoren zu stark erwärmt. In diesem Zusammenhang muss auf die früher behandelten kapazitiven Blindströme hingewiesen werden, die sich ebenfalls von oben nach unten in den Schubkondensatoren addieren.

Bei dem Hochspannungstransformator, der den Kaskadengleichrichter speist, ergibt sich insbesondere das konstruktive Problem eines ausreichenden Schutzes der Sekundärwicklung bei Durch- oder Überschlägen am Hochspannungsgleichrichter oder am Prüfobjekt. Bei einem direkten Durchschlag von der Hochspannungshaube des Gleichrichters gegen Erde, wie er im praktischen Betrieb gelegentlich unvermeidlich ist, kann über der Sekundärwicklung eine Überspannung entstehen, die die Form einer Stosswelle und als Scheitelwert die volle Gleichspannung aufweist. Um diese extreme Stossbeanspruchung des Hochspannungstransformators zu vermeiden, muss man die Sekundärklemmen mit Ableitfunkenstrecken schützen und Dämpfungswiderstände in die Zuleitung zum Gleichrichter einbauen (Fig. 5). Auf diese Weise kann man erreichen, dass die einlaufenden Stosswellen in ihrer Steilheit und in ihrer Amplitude auf ein erträgliches Mass reduziert werden.

4. Konstruktionsdetails

4.1 Polaritätsumschaltung und Erdungseinrichtung

Wenn der einfache oder der symmetrische Kaskadengleichrichter mit einer fernbedienten Polaritätsumschaltung ausgerüstet werden soll, so werden die V-förmig auf den einzelnen Stufen angeordneten Hochspannungsventile gemäss Fig. 6 um eine horizontale Welle drehbar gelagert. Die horizontalen Drehwellen werden ihrerseits von einer vertikalen Isolierwelle über Winkelgetriebe angetrieben. Die Polaritätsumschaltung erfolgt in der Weise, dass jeweils auf einer Stufe das untere Ventil in die Position des oberen Ventils gedreht, während das obere Ventil in die Lage des unteren Ventils geschwenkt wird.

Solange der Kaskadengleichrichter unter Spannung steht, würde dieser Polaritätswechsel einen direkten Kurzschluss bedeuten. Deshalb ist es notwendig, den Kaskadengleichrichter vorher zu entladen, d. h. zu erden. Dies erfolgt über die Erdungseinrichtung, mit der die einzelnen Stufen des Gleichrichters über ferngesteuerte Widerstandsarme kurzgeschlossen werden, so dass eine stark gedämpfte Entladung erfolgt. Erst wenn der Kaskadengleichrichter vollständig oder bis auf eine kleine Restspannung entladen ist, wird die Polaritätsumschaltung in Betrieb gesetzt. Durch eine entsprechende sinnvolle Verriegelung ist eine falsche Betätigung der Polaritätsumschaltung unmöglich.

4.2 Dämpfungswiderstand

Das Prüfobjekt wird an die Hochspannungshaube des Kaskadengleichrichters über einen Dämpfungswiderstand angeschlossen, der so bemessen ist, dass bei einem Kurzschluss am Prüfling im Gleichrichter etwa der 50- bis 100fache Nennstrom fliesst (Fig. 5). Die praktische Erfahrung hat gezeigt, dass ein Dämpfungswiderstand dieser Grösse zur Begrenzung des Kurzschlußstromes ausreichend ist, um sowohl den Kaskadengleichrichter, insbesondere die Hochspannungsventile, als auch den Prüfling ausreichend zu schützen. Wenn man die Ausgangsspannung des Kaskadengleichrichters in der üblichen Weise mit einem Messwiderstand direkt an der Hochspannungshaube misst, so vernachlässigt man natürlich den Spannungsabfall, der über dem Dämpfungswiderstand bis zum Prüfling entsteht. Dieser Spannungsabfall ist aber bei dem relativ niederohmigen Dämpfungswiderstand vernachlässigbar klein. Die Messgenauigkeit liegt normalerweise bei ± 2 %.

4.3 Moderne ausgeführte Anlagen

Basierend auf den beschriebenen theoretischen Überlegungen und Erfahrungstatsachen wurden in der jüngsten Vergangenheit ein Prüfgleichrichter 2,5 MV, 200 mA (Gleichstromleistung 500 kW), ein Prüfgleichrichter 2,2 MV, 200 mA, und ein druckgasisolierter Injektorgleichrichter 1,0 MV, 120 mA, für Plasmaexperimente gebaut (Fig. 7).

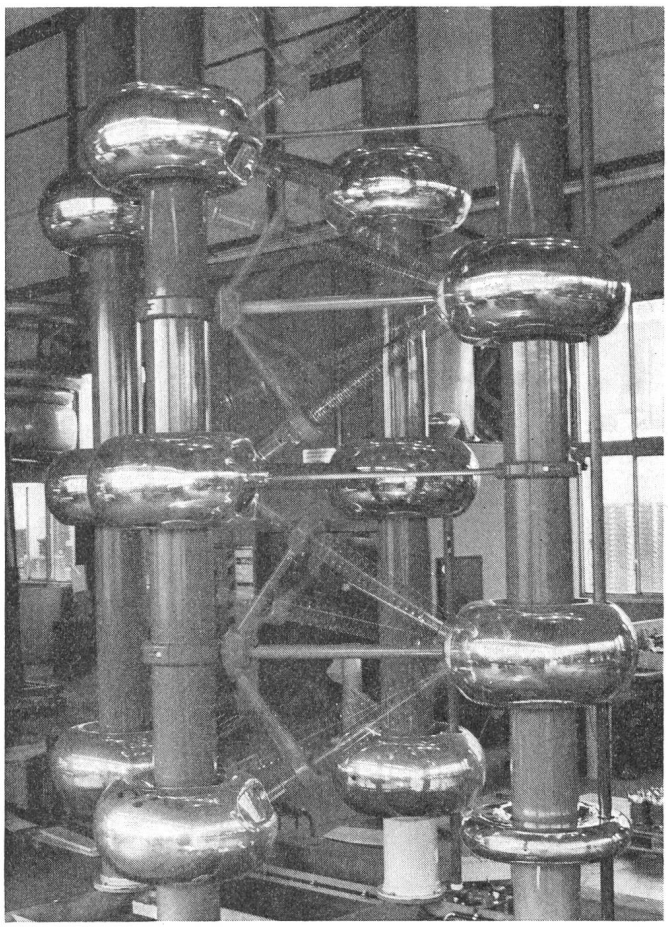

Fig. 6 Kaskadengleichrichter mit Polaritätsumschaltung

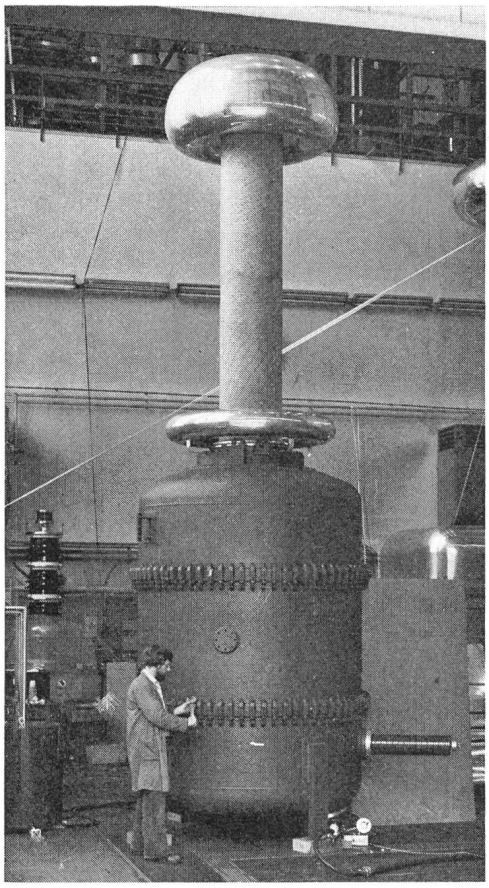

Fig. 7
Druckgasisolierter Injektor-gleichrichter 1,0 MV, 120 mA, für vertikalen oder horizontalen Betrieb mit aufgesetzter 1-MV-Durchführung

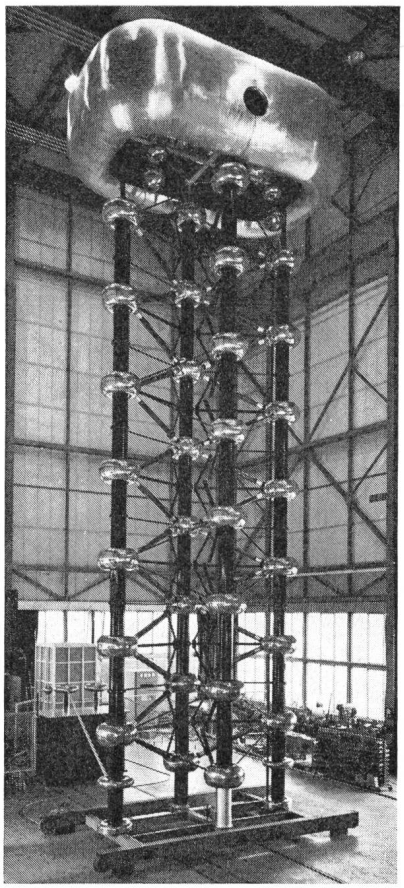

Fig. 8
Siebenstufiger symmetrischer Prüfgleichrichter 2,5 MV, 200 mA

Der leistungsstärkste Prüfgleichrichter von 2,5 MV (Leerlaufspannung 2,8 MV), der in Fig. 8 abgebildet ist, weist 7 Stufen auf und ist mit einer fernbedienten Polaritätsumschaltung ausgerüstet.

5. Ausblick

Bei den druckgasisolierten Hochspannungsgleichrichtern mit schwachen Strömen im Milliampèrebereich für physikalische Anwendungen (Partikelbeschleuniger, Speisung von Hochspannungs-Elektronenmikroskopen) scheinen Spannungen bis zu 10 MV realisierbar. Die weitere Erhöhung der Nennspannung bei den luftisolierten Prüfgleichrichtern nähert sich wegen der stark wachsenden Abmessungen der Hochspannungshallen einer Grenze. Es ist erforderlich, Erfahrungen über die oberhalb 2,5 MV für Gleichspannungen nötigen Isolierdistanzen zu sammeln. Hingegen scheint es leichter möglich zu sein, den Gleichstrom auf grössenordnungsmässig 1 A zu erhöhen. Während bisher der Entwicklung von Hochspannungsgleichrichtern zu noch höheren Leistungen durch das Fehlen geeigneter Komponenten (Hochspannungsventile) Grenzen gesetzt waren, stellen heute die geometrischen Abmessungen von Hochspannungsanlagen mit Gleichstromleistungen im Megawattbereich das Hauptproblem dar. Ist dies noch für offene Anlagen eine Kostenfrage, so markieren die physikalischen Abmessungen für gekapselte SF_6-isolierte Hochspannungsgleichrichter eine Grenze. Man kann für leistungsstarke Injektoren ins Auge fassen, den Gleichrichter in mehrere Drucktankeinheiten aufzuteilen oder den Druckkessel an Ort und Stelle zusammenzuschweissen oder auch mehrere Gleichrichtereinheiten parallel zu schalten, was Schutzprobleme aufwirft.

Literatur

[1] *H. Greinacher:* Erzeugung einer Gleichspannung vom vielfachen Betrage einer Wechselspannung ohne Transformator. Bull. SEV 11(1920)3, S. 59 ...66.

[2] *J. D. Cockcroft* and *E. T. S. Walton:* Production of high-velocity positive ions. Proceedings of the Royal Society London, Serie A 136(1932)6, p. 619...630.

[3] *R. Minkner:* Untersuchungen an Hochspannungsgleichrichtern zur Erzeugung konstanter Gleichspannungen. Dissertation der Technischen Universität Berlin, 1965.

[4] *F. Heilbronner:* Transientverhalten mehrstufiger Hochspannungsprüfanlagen. ETZ-Report No. 11. Berlin, VDE-Verlag, 1973.

[5] *E. Everhart* and *P. Lorrain:* The Cockcroft-Walton voltage multiplying circuit. Rev. Scient. Instrum. 24(1953)3, p. 221...226.

[6] *E. Baldinger:* Kaskadengeneratoren. In: Handbuch der Physik. Hg. von S. Flügge. Band 44: Instrumentelle Hilfsmittel der Kernphysik. I. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer Verlag, 1959; S. 1...63.

[7] *G. Reinhold, J. Seitz* und *R. Minkner:* Die Weiterentwicklung des Kaskadengenerators. Zeitschr. Instrumentenkunde 67(1959)10, S. 258...265.

Adresse des Autors:
Dr.-Ing. *G. Reinhold,* Emil Haefely & Cie. AG, Postfach, 4028 Basel.