Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 63 (1972)

Heft: 21

Artikel: Aufbau und Schaltungstechnik von statischen Wechselrichtern

Autor: Keller, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915749

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

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

Aufbau und Schaltungstechnik von statischen Wechselrichtern

Vortrag, gehalten an der Informationstagung des SEV über Notstrom- und Dauerstromversorgung vom 7. Juni 1972 in Luzern,

von *P. Keller*

621.314.572 : 061.3

1. Einleitung und Übersicht

Der Aufschwung der Fernmelde- und Fernwirktechnik, der Automatisierung und elektronischen Datenverarbeitung in den vergangenen Jahren hat ganz allgemein an die Stromversorgung dieser Systeme gesteigerte Anforderungen gestellt. Eine grosse Anzahl Verbraucher in den verschiedensten Anwendungsgebieten, wie elektronische Datenverarbeitung (EDV), Radar- und Sendeeinrichtungen, Kraftwerk- und Fernwirkanlagen sowie Notbeleuchtung, erfordern unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlagen (USV-Anlagen), die häufig auch als Dauerstromversorgungsanlagen bezeichnet werden.

Das Prinzipschaltbild (Fig. 1) zeigt eine redundante Dauerstromversorgungsanlage. Die wichtigsten Begriffe, Redundanz und (n—1)-Betrieb seien kurz erläutert.

Redundanz in Verbindung mit Dauerstromversorgung sind Reserven, die bei Ausfall eines Anlagenteils unterbrechungsfrei zur Stromversorgung hinzugezogen werden können. Solche Reserven können im Netz oder in weiteren Wechselrichtern sein. Beim ($n-1$)-Betrieb stecken eben diese Leistungsreserven in zusätzlichen Wechselrichtern, das heisst von n installierten Wechselrichtern sind ($n-1$) in der Lage, die Verbraucher zu speisen. Erfährt also einer der n-Wechselrichter irgendeinen Defekt, so muss nur dafür gesorgt werden, dass er genügend schnell von der Sammelschiene abgetrennt wird, damit die Verbraucher keinen Unterbruch erleiden.

Bei 50- und 60-Hz-Systemen muss diese Abschaltzeit inklusive Fehlererfassung, unterhalb einer Millisekunde liegen. Diese Zeiten sind nur mit elektronischen Schaltern zu erreichen.

Kurz zu den einzelnen Geräten (Fig. 1):

Über den Transformator *1* und den Sammelschienenschalter *2* speist das Netz die Batterieladegeräte *4...7*. Für lange Netzausfälle ist zusätzlich eine dieselelektrische Netzersatzgruppe *3* vorgesehen.

Die Batterieladegeräte versorgen die Wechselrichter *12...15* mit Gleichstrom und laden gleichzeitig die Batterien über speziell angepasste *U-I*-Kennlinien. Dadurch wird eine grosse Lebensdauer bei geringer Wartung erreicht.

Ein Beispiel über die Grössenverhältnisse:

Bei einem Wechselrichter mit einer Leistung von 120 kVA muss das Batterieladegerät eine Leistung von 170 kW aufweisen. Damit die Batterie bei einem Netzausfall die Energieversorgung eine halbe Stunde aufrechterhalten kann, muss sie eine 10-h-Kapazität von etwa 800 Ah aufweisen.

Die Wechselrichter formen ihrerseits den Gleichstrom in einen Wechselstrom um. Bei einem Netzausfall beziehen sie ihre Energie aus der vorgeschalteten Batterie.

Über die elektronischen Schalter *16...19* versorgen die Wechselrichter die Sammelschiene und damit die Verbraucher *21* mit Wechselstrom.

Als Ergänzung ist im Prinzipschaltbild ein elektronischer Netzbypass *20* eingezeichnet. Dieser ermöglicht es, bei Ausfall mehrerer Wechselrichter oder aber zur Bewältigung schwerer Anlaufvorgänge — beispielsweise zum Anfahren grosser Asynchronmotoren — das Netz zur Stützung der Sammelschiene hinzuzuziehen.

Dadurch wird eine erhöhte Redundanz des Systems erreicht.

Auf die kurz beschriebenen Geräte wird in der Folge näher eingegangen, einzig das Batterieladegerät gehört nicht in den Rahmen dieser Betrachtungen.

2. Wechselrichter

Der Wechselrichter stellt wohl das komplizierteste Gerät der Anlage dar, werden an ihn doch auch die grössten Anforderungen gestellt [1; 2; 3; 4][1]).

2.1 Allgemeines

Ein Wechselrichter hat die Aufgabe, die Gleichspannung in Wechselstromenergie umzuformen und dies bei grosser Zuverlässigkeit. Erst mit dem Aufkommen der Leistungshalbleiter konnte dieses Problem einwandfrei gelöst werden. Heute werden Geräte von einigen VA bis etwa 300 kVA in kompakten Einheiten gebaut. Grössere Leistungen werden durch das Parallelschalten kleiner Geräte bewältigt. Damit aber die Wechselrichter für Dauerstromversorgungsanlagen geeignet sind, müssen sie eine hohe Frequenz- und Spannungskonstanz sowie einen kleinen Klirrfaktor der Ausgangsspannung aufweisen. Die geforderten Werte sind: Frequenzabweichung $< 1\,\%$, statische Spannungsabweichung $< 2\,\%$. Bei Laständerungen muss die Spannung aber unter allen Umständen innerhalb der Grenzen von $U_n = +10\,\%$ und $U_n = -8\,\%$ des Nennwertes bleiben. Dabei ist immerhin zu berücksichtigen, dass die Wechselrichter die Energie aus Batterien beziehen, deren Spannung sich doch beträchtlich ändern kann. Als Beispiel: Eine Batterie mit einer Schwebeladungsspannung von 265 V hat eine Entladespannung von etwa 200 V. Dies entspricht einer Änderung von über 30 %.

Zunächst sei das Prinzipschaltbild eines Wechselrichters betrachtet (Fig. 2). Im Halbleiterumformer *1* steckt das eigentliche Herz des Gerätes. Der Ausgangstransformator *2* hat die Aufgabe, die Spannung auf das richtige Niveau zu bringen und zusätzlich Gleich- und Wechselstromseite galvanisch zu trennen. Das Leistungsfilter *3* reduziert die Spannungsoberwellen des Umformers und verleiht dem Wechselrichter hervorragende dynamische Eigenschaften. Dazu kommen noch Ein- und Ausgangsschützen *4*, *5* sowie die Steuerelektronik *6*, welche die richtige Zündfolge der Thyristoren und damit die Spannungsregelung zur Aufgabe hat.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

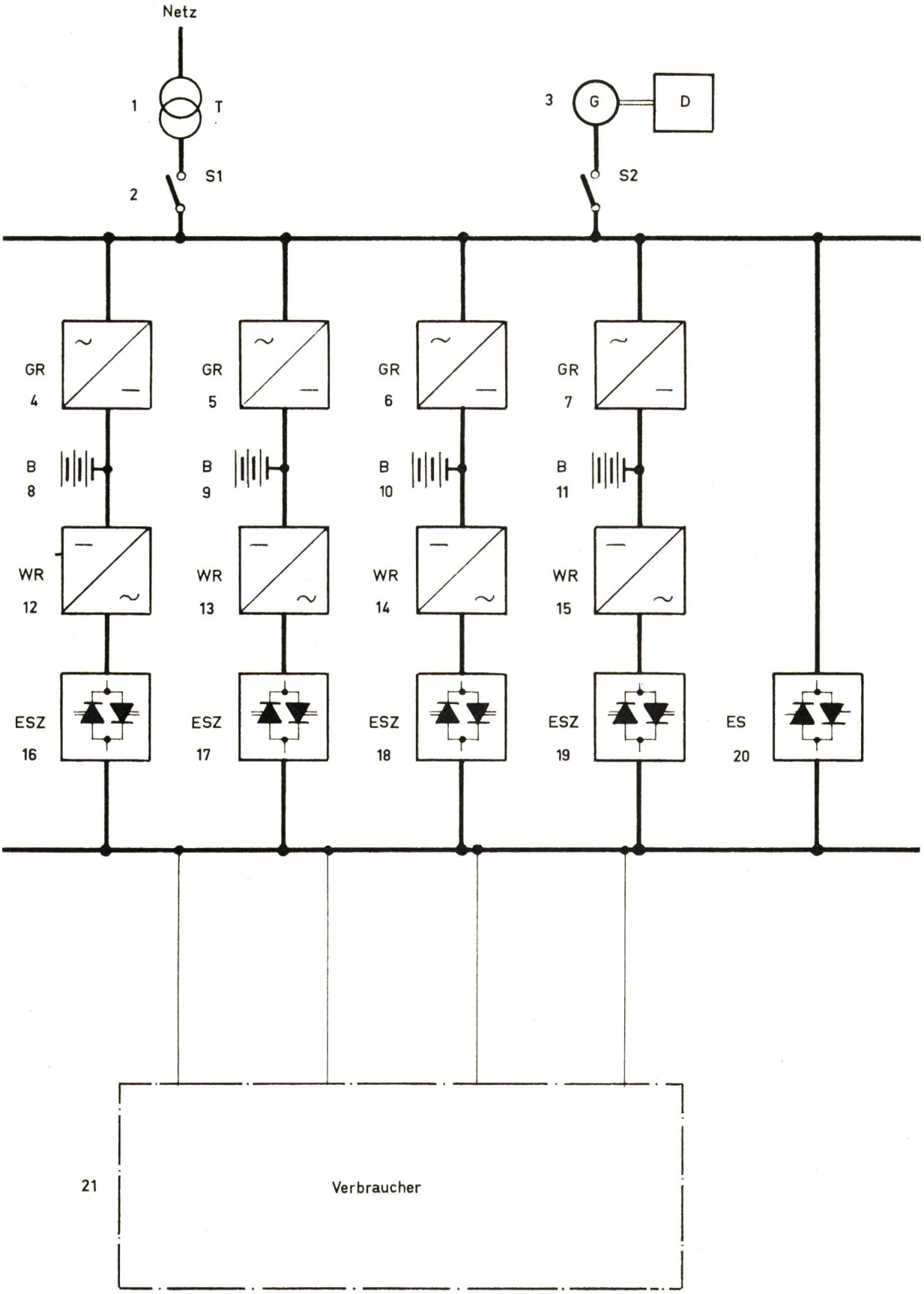

Fig. 1
Gesamtkonzept einer Dauerstromversorgungsanlage

1	Netztransformator
2	Sammelschienenschalter
3	Dieselgenerator
4...7	Batterieladegeräte
8...11	Batterien
12...15	Wechselrichter
16...19	statische Schalter mit Zwangskommutierung (ESZ)
20	statischer Schalter (ES)
21	Verbraucher

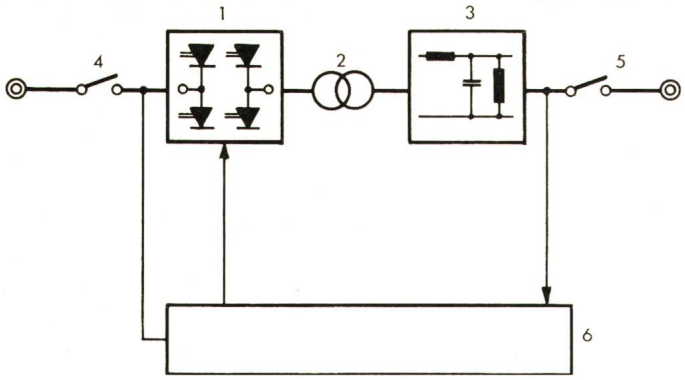

Fig. 2
Prinzipschaltbild eines Wechselrichters

1 Halbleiterumformer
2 Ausgangstransformator
3 Filter
4, 5 Schützen
6 Steuerung und Regelelektronik

2.2 Wechselspannungserzeugung

Wie wird nun überhaupt eine Wechselspannung aus einer Gleichspannung erzeugt?

Einfachheitshalber sei dieses Grundprinzip mit Hilfe mechanischer Umschalter erläutert (Fig. 3). Zwischen zwei mechanischen Umschaltern *1*, *2*, welche wechselweise auf die positive und die negative Batterieklemme umschalten, ist die Last *3* angeordnet. In Fig. 4 sind die Vorgänge genauer dargestellt. Im linken Teil der Figur wird gezeigt, wie an die Last eine positive Spannung gelegt wird. Der Umschalter S_1 ist auf die positive Klemme und der Schalter S_2 an die negative Klemme geschaltet. In einem nächsten Schritt wird S_1 auch an die negative Klemme umgelegt. Die Spannung an der Last wird damit Null. Wenn dieser Vorgang logisch fortgesetzt wird, kommt nun das Umlegen von S_2 an die positive Seite der Quelle. Der Schaltzustand ist damit genau zum ersten entgegengesetzt, was gleichbedeutend mit negativer Spannung an der Last ist. In Fig. 4 ganz rechts sind beide Schalter an der positiven Klemme. Die resultierende Spannung an der Last ist wiederum gleich Null.

Die Frequenz dieser, so erzeugten Wechselspannung, das heisst die Zeitdauer T einer Periode, wird durch die Umschaltzeitpunkte von S_1 und S_2 bestimmt. Die Amplitude A der Spannung ist aber direkt durch die speisende Batteriespannung $2U_g$ bestimmt, welche sich im Betrieb um etwa 30 % ändern kann. Die Ausgangsspannung muss aber auf eine Genauigkeit von 2 % ausgeregelt werden. Die Ausregelung erfolgt durch Verschieben der Zeitpunkte t_2 gegenüber t_1, respektive t_4 gegenüber t_3. Fig. 5 verdeutlicht dieses Prinzip. Es zeigt zwei Fälle mit verschiedener Batteriespannung, links kleine, rechts grosse Spannung. Oben sind die entsprechenden Wechselspannungen an S_1 (U_5) und in der Mitte diejenigen an S_2 (U_6) dargestellt. Die an der Last resultierenden Spannungen (U_{56}) zeigt die untere Zeile. Man sieht, wie durch das Verändern des Steuerwinkels α die Länge der resultierenden Rechteckspannung variiert werden kann. Damit ist es also möglich, auch bei variabler Batteriespannung eine konstante Ausgangsspannung zu erhalten. Wie die Figuren zeigen, ist an dieser Stelle eine Rechteckspannung vorhanden. Um eine sinusförmige Ausgangsspannung zu erhalten, muss man zusätzlich Leistungsfilter nachschalten. Auf diese sei jedoch später eingegangen.

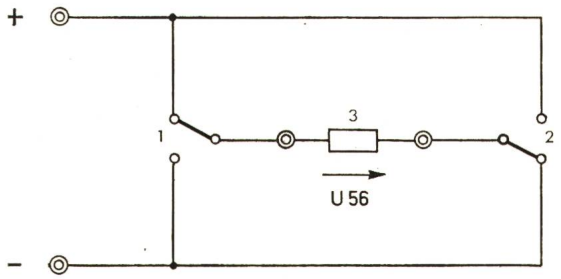

Fig. 3
Prinzip der Spannungsregelung

1, 2 mechanische Umschalter
3 Last

2.3 Kommutierung

Nachdem man nun gesehen hat, wie prinzipiell eine Wechselspannungserzeugung erfolgt, wird die Kommutierung, das heisst Umschalten, näher betrachtet.

Für die Wechselrichter können selbstverständlich keine mechanischen Schalter verwendet werden, da diese einem zu grossen Verschleiss unterworfen wären. Bei einer Frequenz von 50 Hz müssten sie ja fünfzigmal pro Sekunde umschalten. Sie müssen daher durch elektronische Schaltelemente ersetzt werden. Dafür stehen Thyristoren zur Verfügung. Sie können durch

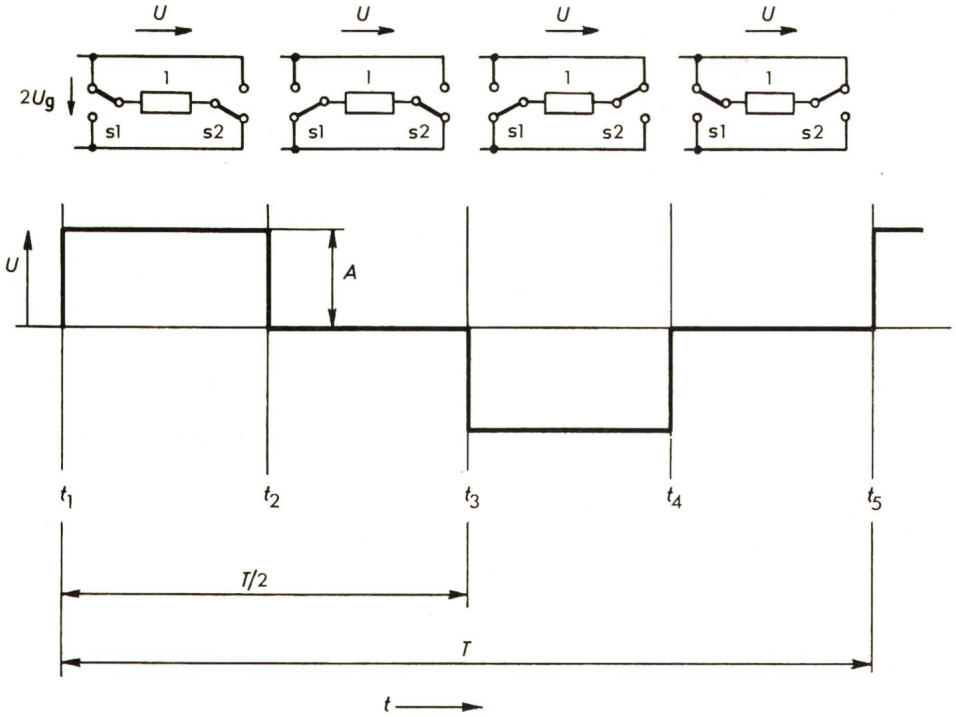

Fig. 4
Umformung einer Gleichspannung in eine rechteckförmige Wechselspannung

1 Verbraucher
U Wechselspannung
A Amplitude der Wechselspannung $A \approx 2\ U_g$ (Gleichspannung)
T Periodendauer
$t_1 \ldots t_5$ Umschaltzeitpunkte
S_1, S_2 mechanische Umschalter

einen Steuerimpuls eingeschaltet werden, ihre Sperrfähigkeit erlangen sie aber erst wieder nach einem Stromnulldurchgang. Wie die Fig. 6 zeigt, soll aber eine Gleichspannung ein- und ausgeschaltet werden. Um hier einen Stromnulldurchgang zu erzwingen, braucht es zusätzliche Schaltelemente, nämlich den Hilfsthyristor *4*, die Kommutierungsdrosselspule *2* und den Kommutierungskondensator *3*. Wegen des erzwungenen Stromnulldurchganges spricht man von Wechselrichtern mit Zwangskommutierung. Nun soll dieser Schalter einmal ein- und ausgeschaltet werden. Durch Anlegen eines Steuerimpulses an das Gate, die Steuerelektrode des Thyristors, wird der Thyristor *1* leitend und damit die Spannung an die Last *5* geschaltet. Das schwierige Problem stellt nun das Abschalten dar. Zuerst muss dafür gesorgt werden, dass der Kondensator im Löschkreis in der eingezeichneten Polarität aufgeladen ist. Damit das Bild übersichtlich bleibt, ist dieser Aufladekreis nicht eingezeichnet. Durch das Zünden des Hilfsthyristors wird nun diese Kondensatorspannung in Sperrichtung an den leitenden Hauptthyristor *1* gebracht. Der Laststrom baut sich ab und der Thyristor löscht. Alle Wechselrichterschaltungen mit Zwangskommutierung beruhen auf diesem Grundprinzip.

2.4 Verschiedene Wechselrichter-Schaltungen

Damit ist das Prinzip bekannt, wie sich der mechanische Schalter durch Halbleiter ersetzen lässt. Es folgen nun die gebräuchlichsten Wechselrichter-Schaltungen. Zuerst sei eine Brückenschaltung vorgestellt (Fig. 7). Zum besseren Verständnis ist dazu das Ersatzschaltbild mit mechanischen Schaltern angegeben. Damit der eingezeichnete Schaltzustand erreicht werden kann, müssen die eingerahmten Thyristoren gezündet werden.

Beide Brückenhälften sind wie die mechanischen Elemente voneinander unabhängig umschaltbar. Sie bestehen je aus den beiden Thyristoren *1*, *2*, den antiparallelen Blindstromdioden *3*, *4* (sie werden oft auch Rückarbeitsdioden genannt), den Kommutierungselementen, Kondensatoren *5*, *6* und Drosselspule *7*. Wie der Kommutierungsvorgang, d. h. das Umschalten, bei dieser Schaltung abläuft, sei in der Folge erklärt.

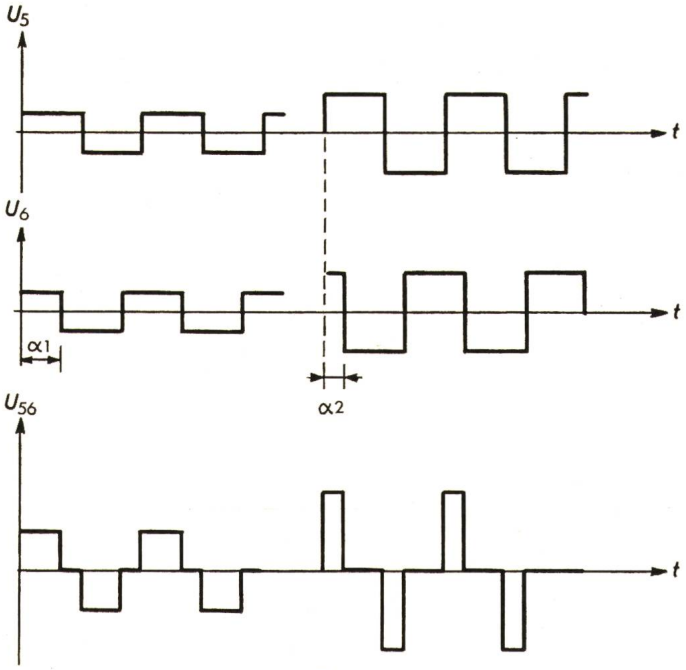

Fig. 5
Spannungsregelung

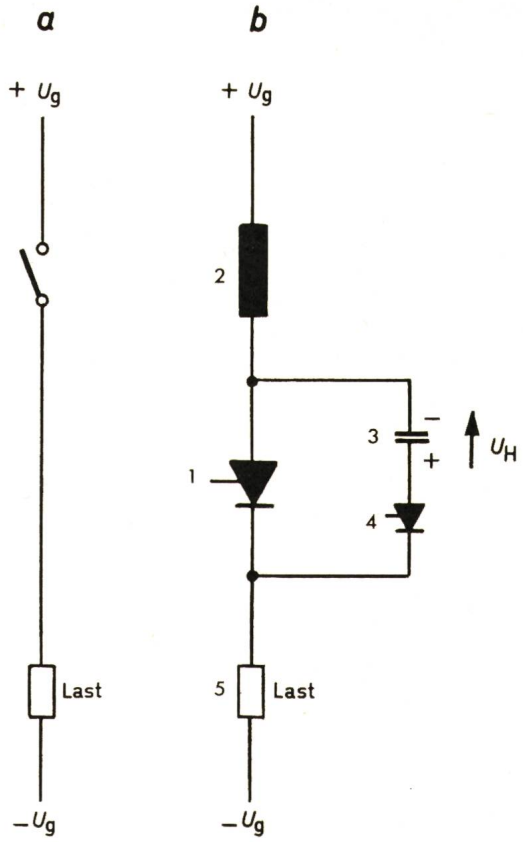

Fig. 6
Prinzip der Kommutierung

a mechanischer Schalter
b Halbleiter-Schalter
1 Hauptthyristor
2 Kommutierungsdrosselspule
3 Kommutierungskondensator
4 Hilfsthyristor
5 Last

Zunächst sei der obere Thyristor *1* leitend. Der Ausgang ist dadurch an die positive Batterieklemme durchgeschaltet und der untere Kondensator *6* aufgeladen. Soll nun eine Umschaltung an die negative Klemme erfolgen, wird der untere Thyristor *2* gezündet und gleichzeitig dem oberen Thyristor *1* der Steuerimpuls weggenommen. Da aber der untere Kondensator aufgeladen war, liegt diese Spannung, $2U_g$, auch an der unteren Hälfte der Kommutierungsdrosselspule *7*. Sie wirkt wie ein Autotransformator, so dass an der gesamten Drosselspule die doppelte Spannung $4U_g$ liegt. Eine Potentialbilanz ergibt damit für den oberen Thyristor *1* eine Sperrspannung von $2U_g$. Der Strom im Thyristor *1* baut sich ab und er löscht.

Ist der Laststrom aber stark induktiv, hat er nach dem Umschalten der Spannung die Tendenz, in der gleichen Richtung weiterzufliessen. Dies kann über die Blindstromdioden erfolgen, daher stammt auch ihr Name. Nach der Umkehr der Stromrichtung (der Zeitpunkt ist durch die Last gegeben), übernimmt der untere Thyristor *2* die Stromführung. Man sieht daraus, dass an den Thyristoren während der ganzen Spannungshalbwelle ein Steuerimpuls anliegen muss, da ja der Leistungsfaktor der Last sich von Fall zu Fall ändern kann.

Damit wurde eine vollständige Umschaltung von der positiven auf die negative Klemme erreicht. Eine Umschaltung in umgekehrter Richtung erfolgt in analoger Weise.

Fig. 8 zeigt eine andere Wechselrichterschaltung, die ebenfalls auf *McMurray* und *Bedford* zurückzuführen ist. Der Vorteil dieser Schaltung liegt in der grösseren Ausgangsleistung, bei Verwendung gleicher Halbleiterelemente, und in der besseren Ausnützung der Kommutierungselemente. Ihr Nachteil ist aber eindeutig der grössere Schaltungs- und Steueraufwand, wie dies aus den beiden Fig. 7 und 8 hervorgeht. Funktionsmässig hat sie aber die gleichen Eigenschaften wie die erstgenannte Variante. Zur Spannungsregelung werden zwei Wechselrichterbrücken benötigt, welche über zwei Ausgangstransformatoren gekoppelt sind. Im oberen Bildteil ist wieder das Ersatzschaltbild dargestellt. Durch Zünden der markierten Thyristoren wird die eingezeichnete Schalterstellung erreicht.

Beide bis jetzt besprochenen Schaltungen eignen sich sehr gut für Frequenzen von 50 und 60 Hz. Soll aber eine höhere

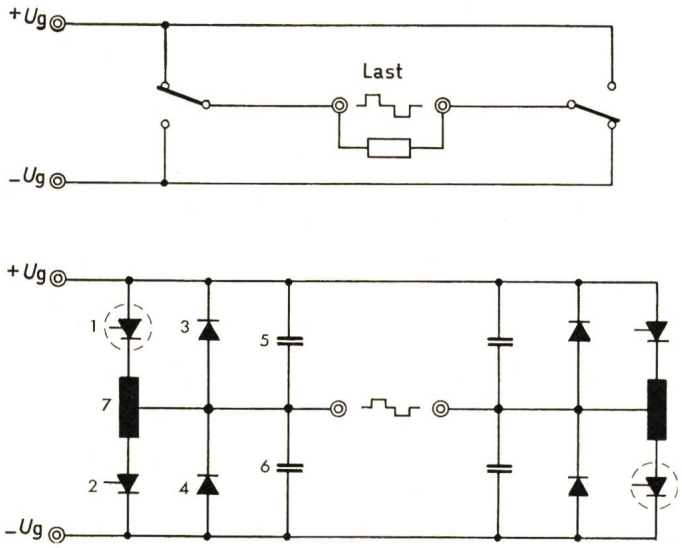

Fig. 7
Brückenschaltung mit zwei unabhängigen Wechselrichterpolen

1, 2 Thyristoren
3, 4 Blindstrom- oder Rückarbeitsdioden
5, 6 Kommutierungskondensatoren
7 Kommutierungsdrosselspule

Frequenz erzeugt werden, beispielsweise 440 Hz, ist die folgende Schaltung besser geeignet (Fig. 9). Hier wird der Löschvorgang nicht mehr mit dem folgenden Hauptthyristor, sondern mit zusätzlichen Hilfsthyristoren *13*, *14* eingeleitet. Da der Löschkreis *9*, *11* bei jedem Kommutierungsvorgang vollständig umschwingt und anschliessend gerade für die nächste Umschaltung wieder bereit ist, ist diese Schaltung wesentlich schneller.

Damit sind die gebräuchlichsten Wechselrichterschaltungen bekannt, sie stellen aber nur eine Auswahl aus der Fülle theoretisch möglicher Varianten dar. Alle haben aber die Eigenschaft, dass sie eine regelbare Rechteckspannung liefern. Eine solche Spannungsform lässt sich für eine Dauerstromversorgungsanlage nicht verwenden. Die notwendige Umformung erfolgt mit Leistungsfiltern.

2.5 Filter

Die Filter haben also die Aufgabe, die Ausgangsspannung der Stellglieder so umzuwandeln, dass sie den Anforderungen der Verbraucher genügen. Die Anforderungen werden durch den zulässigen Klirrfaktor, im allgemeinen kleiner als 5 %, defi-

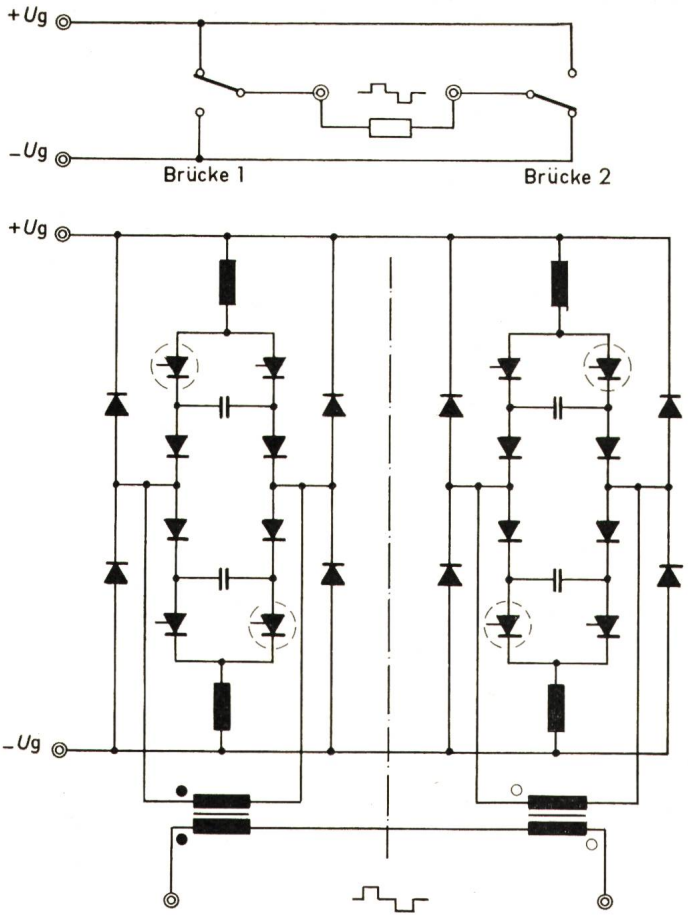

Fig. 8
Brückenschaltung mit zwei abhängigen Wechselrichterpolen

niert. Für spezielle Anwendungen kann aber durch ein grösseres Filter, gleichbedeutend mit Mehrkosten, ein kleiner Klirrfaktor erzielt werden.

In der Praxis werden zur Lösung dieser Aufgabe zwei Schaltungen angewendet (Fig. 10). Das eine Filter, der Tiefpass (Fig. 10a), hat den Vorteil, dass daran auch nichtlineare Lasten, zum Beispiel Asynchronmotoren, angeschlossen werden können. Sein Nachteil liegt allerdings darin, dass bei unsymmetrischer Belastung in Drehstromsystemen die Phasenwinkel leicht verändert werden. Die Schaltung wird aber so aufgebaut, dass sie den heutigen Computersystemen genügt.

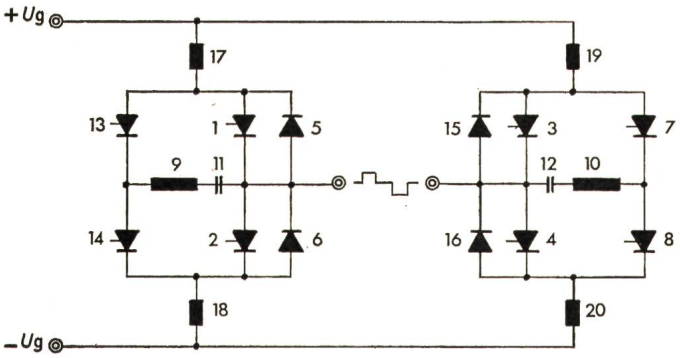

Fig. 9
Brückenschaltung für grosse Frequenzen

1...4 Hauptthyristoren
5...8 Blindstrom- oder Rückarbeitsdioden
9, 10 Kommutierungsdrosselspulen
11, 12 Kommutierungskondensatoren
13...16 Löschthyristoren
17...20 di/dt-Begrenzungsdrosselspulen

Fig. 10b zeigt das Bandpassfilter. Dieses weist den Nachteil der Phasenverschiebung nicht auf. Dagegen neigt es bei Belastung mit nichtlinearem System zu Instabilitäten und damit zu Schwingung der Ausgangsspannung. Durch eine spezielle Anpassung lässt sich diese Schwierigkeit in gewissen Grenzen beherrschen.

Zusammengefasst kann man sagen, dass dank einer geeigneten Dimensionierung beide Filter ihre Aufgabe einwandfrei erfüllen können.

Fig. 11 gibt Auskunft über die Filterwirkung. Im untern Teil (*2*) sieht man die rechteckförmige Spannung, welche der Halbleiterumformer herstellt. Die Einschwingvorgänge, Spitzen, rühren von der Zwangskommutierung her. Sie stören aber nicht, da sie vom Filter vollständig abgeblockt werden.

Das Oszillogramm in Fig. 11 oben ist die gefilterte Wechselrichterausgangsspannung. Das Oszillogramm in Fig. 12 zeigt die guten dynamischen Eigenschaften der Wechselrichter. In der Bildmitte wurde ein Laststoss mit halber Nennlast ausgeführt. Nach ungefähr einer Periode ist die Spannung wieder voll ausgeregelt.

Alle bis jetzt besprochenen Geräteteile können zu dreiphasigen Wechselrichtern zusammengebaut werden (Fig. 13). Sie bestehen aus einer gemeinsamen Steuerelektronik *I*, drei einphasigen Wechselrichterbrücken *II*, drei Ausgangsfiltern *III* und drei Transformatoren.

Damit ist der Aufbau der Wechselrichter bekannt. Es werden damit Geräte verschiedener Leistung, welche in ein Baukastensystem passen, konstruiert (Fig. 14).

Kurz zusammengefasst: Anhand einer Ersatzschaltung wurde gezeigt, wie die Wechselspannungserzeugung im Prinzip funktioniert. Mittels eines einfachen Beispieles wurde die Kommutierung und das Ersetzen der mechanischen Schalter dargestellt. Dies führte dann weiter zu den gebräuchlichsten Wechselrichterschaltungen. Die nachgeschalteten Filter erzeugen aus Rechteck- eine Sinusspannung und verbessern die dynamischen Eigenschaften der Wechselrichter.

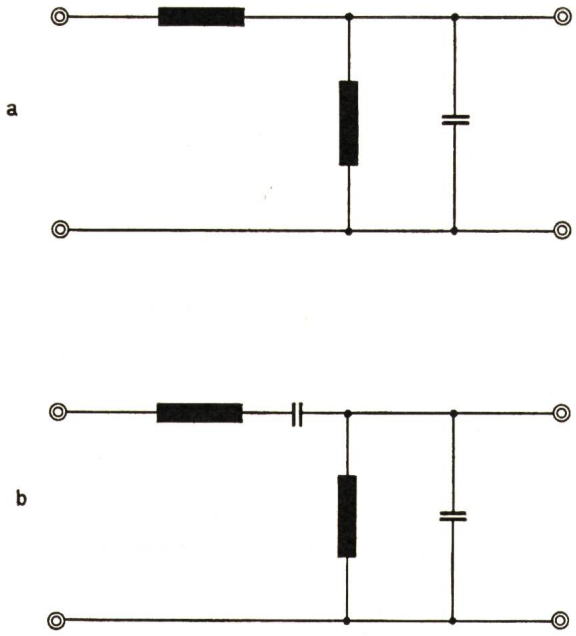

Fig. 10
Filterschaltungen
a Tiefpassfilter
b Bandpassfilter

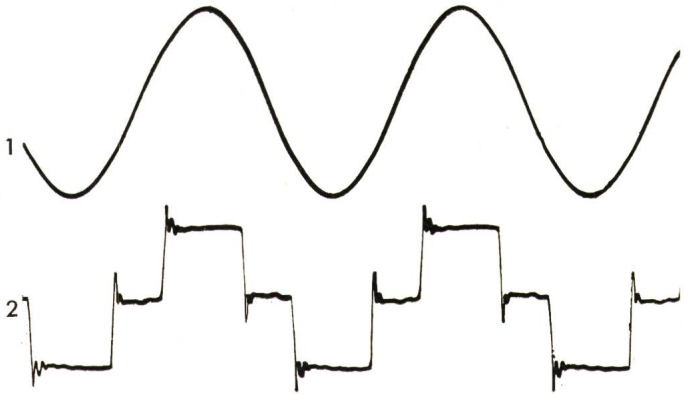

Fig. 11
Wechselrichterausgangsspannung
1 Spannung nach dem Filter
2 Spannung vor dem Filter

Da die Frequenz durch hochstabile elektronische Oszillatoren vorgegeben wird, weist sie eine enge Toleranz auf und ist ausserdem lastunabhängig. Dank der kleinen Zeitkonstanten weisen die Wechselrichter sehr kleine Ausregelzeiten auf.

Die wichtigsten Daten der Wechselrichter sind:

Guter Wirkungsgrad 80...92 % je nach Grösse;
Leistungen bis 300 kVA;
Stat. Regelgenauigkeit der Spannung $\frac{\Delta U}{U_n} < 1\,\%$;
Gute dyn. Eigenschaften $U_n + 10\,\%, -8\,\%$
(bei Belastung mit Computersystemen)
Kleiner Klirrfaktor der Ausgangsspannung $< 0{,}5\,\%$
Hohe Frequenzstabilität $\frac{\Delta f}{f} < 0{,}5\,\%$
Keine speziellen Fundamente notwendig;
Geringer Lärmpegel;
Parallelschaltung möglich.

3. Parallelschaltung

Wozu wird die Parallelschaltung überhaupt benötigt?

Sie erfüllt zwei Aufgaben:

a) Erhöhung der Leistung;
b) Ermöglichung des $(n-1)$-Betriebes und damit die Realisierung redundanter Anlagen.

Damit aber Wechselrichter parallelgeschaltet werden können, braucht es Zusatzgeräte, welche die einzelnen Einheiten aufeinander synchronisieren und die Last gleichmässig aufteilen. Dieses Problem kann grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten gelöst werden.

Im ersten Fall (Fig. 15) wird die Aufgabe durch eine sogenannte Führungselektronik gelöst. Damit aber bei einer Störung in dieser Elektronik nicht das ganze Wechselrichtersystem ausfällt, muss die Elektronik mehrkanalig, das heisst redundant aufgebaut werden. In der Figur sind zwei Kanäle angedeutet. Wird der eine Teil gestört, erfolgt durch spezielle Überwachungsschaltungen eine sofortige Abtrennung, und der andere übernimmt die Synchronisierung und Lastaufteilung allein.

Bei der zweiten Variante (Fig. 16) wird jedem Wechselrichter seine eigene Parallelschaltelektronik zugeordnet. Eine Störung beeinflusst dann nur den gerade betroffenen Wechselrichter.

Bei beiden Varianten wird aber gewährleistet, dass bei irgendeiner Störung, an einem beliebigen Ort, im $(n-1)$-Betrieb

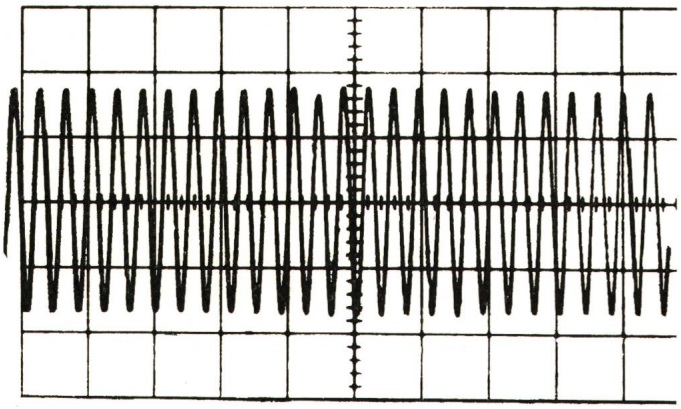

Fig. 12
Wechselrichterausgangsspannung bei einem Halblaststoss

die unterbrechungsfreie Stromversorgung aufrecht erhalten bleibt.

Mit Hilfe der genannten Zusatzgeräte ist es also möglich, Wechselrichter parallelzuschalten. Damit aber redundante Systeme geschaffen werden können, muss ein gestörter Wechselrichter sofort vom System abgetrennt werden können. Dazu wird der elektronische Schalter benötigt.

4. Statischer Schalter

Der statische, oder auch elektronische, Schalter wird zum Abtrennen von Wechselrichtern oder zum Zuschalten des Netzes benötigt. Man unterscheidet demnach zwei Anwendungsfälle und damit auch zwei verschiedene elektronische Schalter (Fig. 17):

Erstens der statische Schalter ES als Bypass, er dient zum schnellen Zuschalten des Netzes, und zweitens der statische Schalter ESZ (das Z bedeutet Zwangskommutierung), er dient zum schnellen Abtrennen gestörter Einheiten. Alle diese Schaltvorgänge müssen innerhalb von 100...200 µs ablaufen, damit die Verbraucher keinen Unterbruch erleiden und die Sammelschienenspannung nicht unter die garantierten Werte absinkt.

Daraus ergeben sich nun automatisch die Anforderungen für die beiden Schaltervarianten, nämlich:

a) Der Bypass-Schalter muss unverzüglich einschalten können, dagegen wird an seine Ausschaltzeit keine besondere Anforderung gestellt.

b) Umgekehrt ist es beim Abtrennschalter: er muss innerhalb 100...200 µs den gestörten Anlageteil abschalten.

Fig. 18 zeigt den prinzipiellen Aufbau dieser Schalter. Oben ist der einfache elektronische Schalter ES dargestellt. Für jede

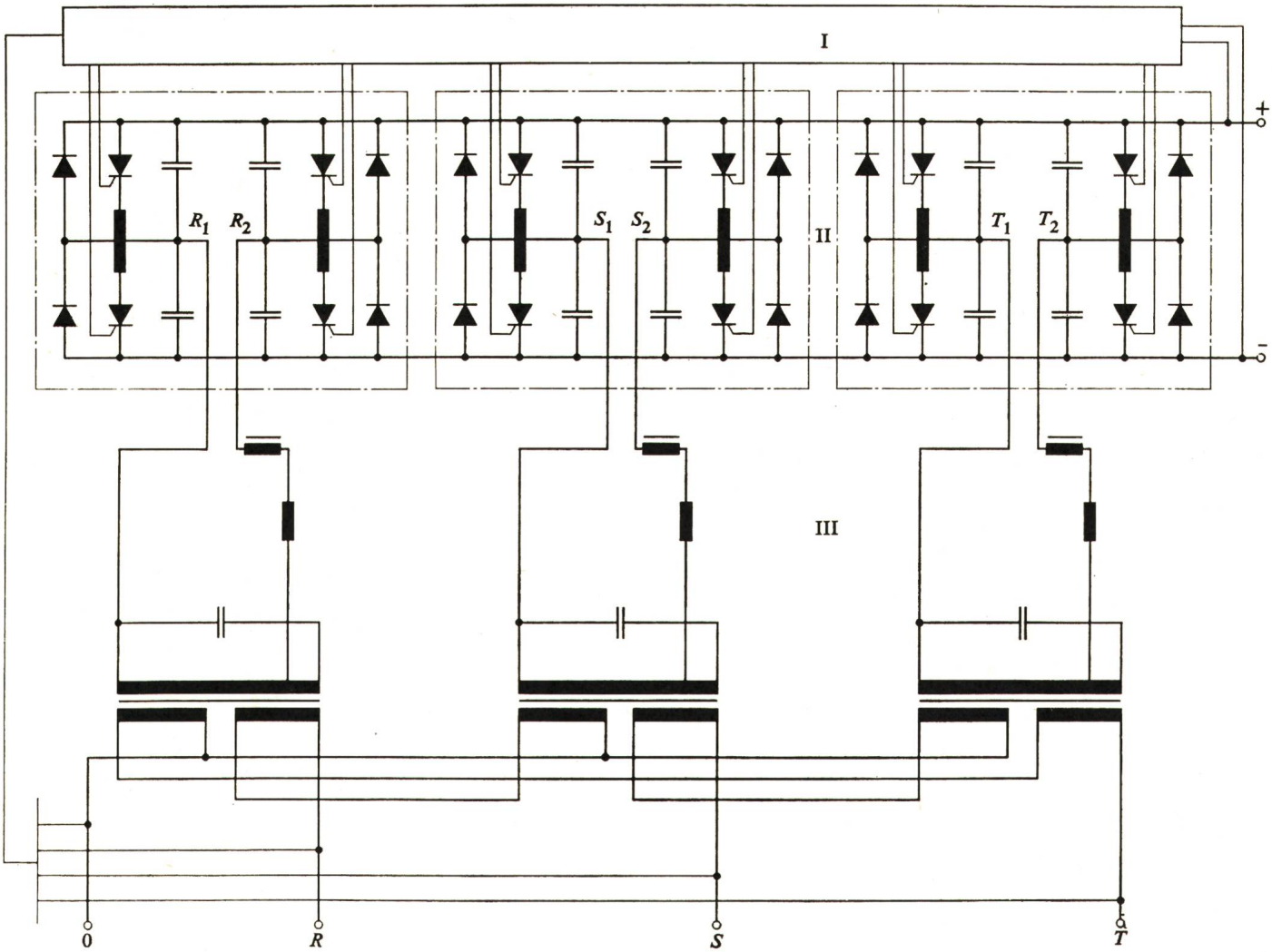

Fig. 13
Prinzipschaltbild eines dreiphasigen Wechselrichters

I Steuerelektronik
II 3 Wechselrichterbrücken
III Filter und Ausgangstransformatoren

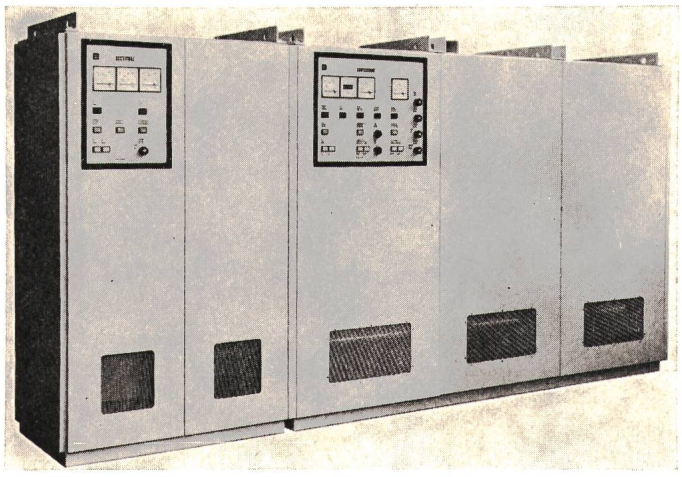

Fig. 14
Dreiphasiger Wechselrichter von 84 kVA mit zugehörigem Ladegerät

Stromhalbwelle ist ein Thyristor vorhanden. Wird im Zeitpunkt t_0 der Ausschaltbefehl erteilt, kann der Strom erst im Nulldurchgang abgeschaltet werden, im ungünstigsten Falle kann diese Zeit bei einem 50-Hz-Wechselrichter 10 ms betragen. Im Zusammenhang mit einem Netzbypass spielt diese Abschaltzeit, wie schon erwähnt, keine Rolle, dann ist ja nur eine kurze Zuschaltzeit erforderlich und diese liegt in den Schaltzeiten der Thyristoren (ungefähr 10 µs).

Auf der unteren Bildhälfte von Fig. 18 ist der elektronische Schalter mit Zwangskommutierung ESZ dargestellt. Er besitzt ausser den beiden antiparallelen Thyristoren eine Löscheinrichtung, wie sie in der Grundschaltung der Kommutierung gezeigt wurde. Damit ist es möglich, den Strom zu jedem beliebigen Zeitpunkt innerhalb 100...200 µs abzuschalten.

Der Hauptanwendungsfall von elektronischen Schaltern mit Zwangskommutierung liegt beim $(n-1)$-Betrieb von Wechselrichtern. Zur Erläuterung dient ein Beispiel mit 4 Wechselrichtern (Fig. 19). Wenn beispielsweise im Wechselrichter *2* ein Defekt auftritt, muss der Schalter *6* sofort diesen gestörten Teil abtrennen. Damit aber eine unterbrechungsfreie Stromversorgung möglich ist, müssen die verbleibenden Wechselrichter die gesamte Last allein übernehmen können. Fig. 20 zeigt eine solche Fehlerabschaltung. Dabei wurde in einem Wechselrichter ein künstlicher Kurzschluss eingeleitet. Dargestellt sind die drei Sammelschienenspannungen und die drei Phasenströme des gestörten Wechselrichters. Es hebt die besonders kurze Abschaltzeit des zwangskommutierten Schalters besonders deutlich hervor.

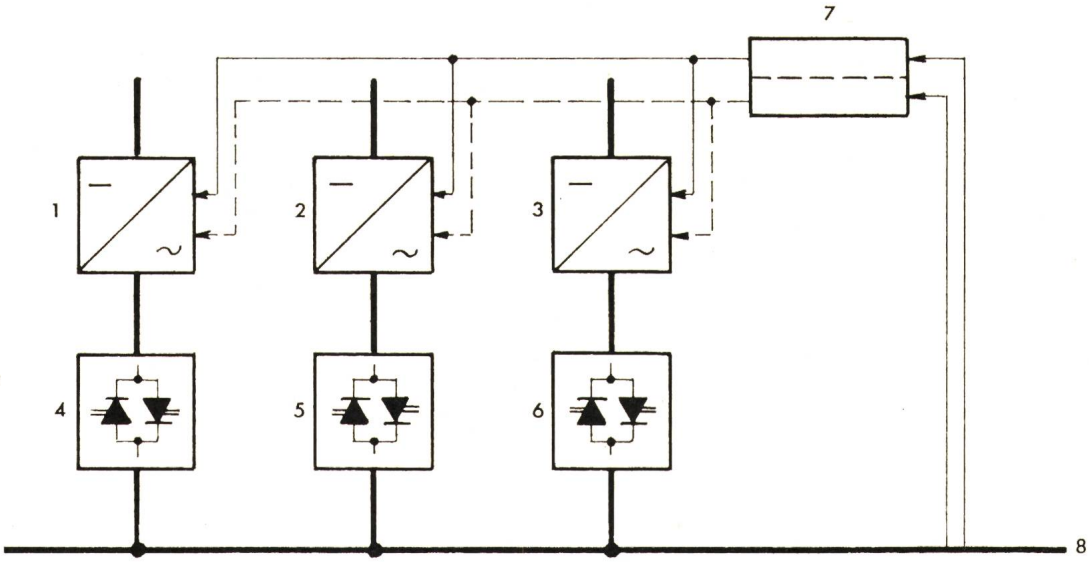

Fig. 15
Parallelgeschaltete Wechselrichter mit Führungselektronik

1...3 Wechselrichter
4...6 statische Schalter (ESZ)
7 Führungselektronik (Zweikanalsystem)
8 sichere Sammelschiene

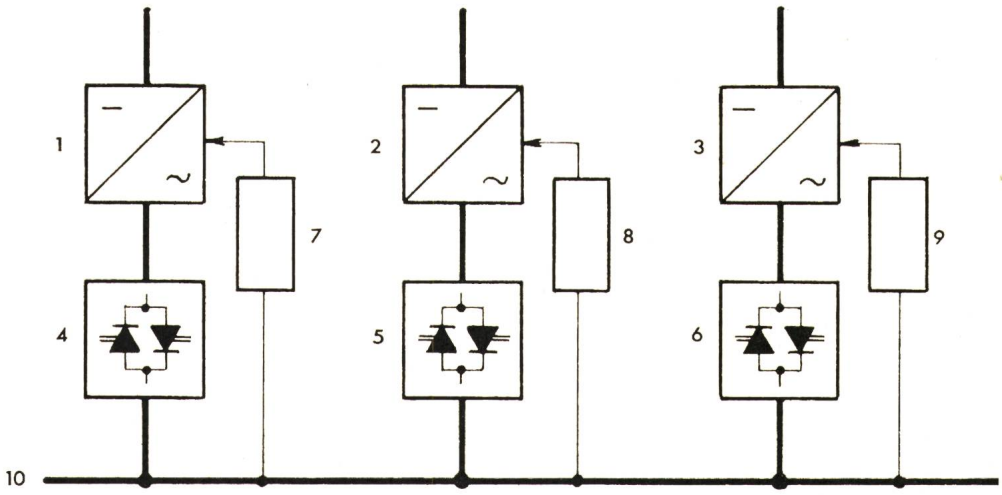

Fig. 16
Parallelgeschaltete Wechselrichter mit unabhängigen Synchronisiereinrichtungen

1...3 Wechselrichter
4...6 statische Schalter
7...9 Synchronisier- und Parallelschaltelektronik
10 sichere Sammelschiene

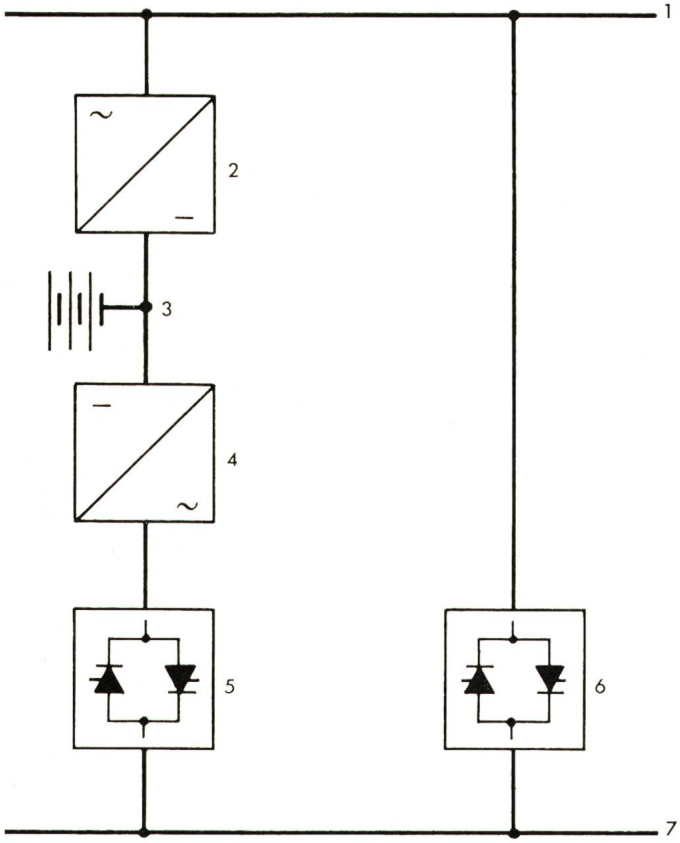

Fig. 17
Prinzipschaltung einer unterbruchsfreien Stromversorgungsanlage (USV) mit statischem Bypass-Schalter

1 Netz-Sammelschiene
2 Gleichrichter
3 Batterie
4 Wechselrichter
5, 6 statischer Schalter ES
7 sichere Sammelschiene

5. Zusammenfassung

Somit sind nun sämtliche Geräte bekannt, die zum Bau einer unterbrechungsfreien Stromversorgungsanlage notwendig sind. Ihre Aufgaben seien nochmals kurz umschrieben.

Die Batterieladegeräte speisen einerseits die Wechselrichter und haben zudem die Aufgabe, die Batterien aufzuladen. Die Batterien sind wiederum so dimensioniert, dass sie während der verlangten Überbrückungszeit die Wechselrichter bei einem Netzausfall mit Energie versorgen können.

Das Herz der Anlage stellen die statischen Wechselrichter dar. Ihre Aufgabe, die Umformung von Gleich- in Wechselstrom, erfüllen sie dank der ausgereiften Technik mit grosser Zuverlässigkeit.

Mit Hilfe der Parallelschaltelektronik und der elektronischen Schalter können redundante Stromversorgungssysteme grosser Leistung aufgebaut werden. Redundante Systeme gewährleisten eine bestmögliche Betriebssicherheit, da bei Ausfall eines Anlageteiles die verbleibenden Geräte in der Lage sind, die Stromversorgung unterbrechungsfrei aufrechtzuerhalten.

Alle genannten Vorteile, guter Wirkungsgrad, wartungsfreier Betrieb, schnelle Regeleigenschaften, unterbrechungsfreie Um- und Abschaltmöglichkeiten, zeigen, dass mit den

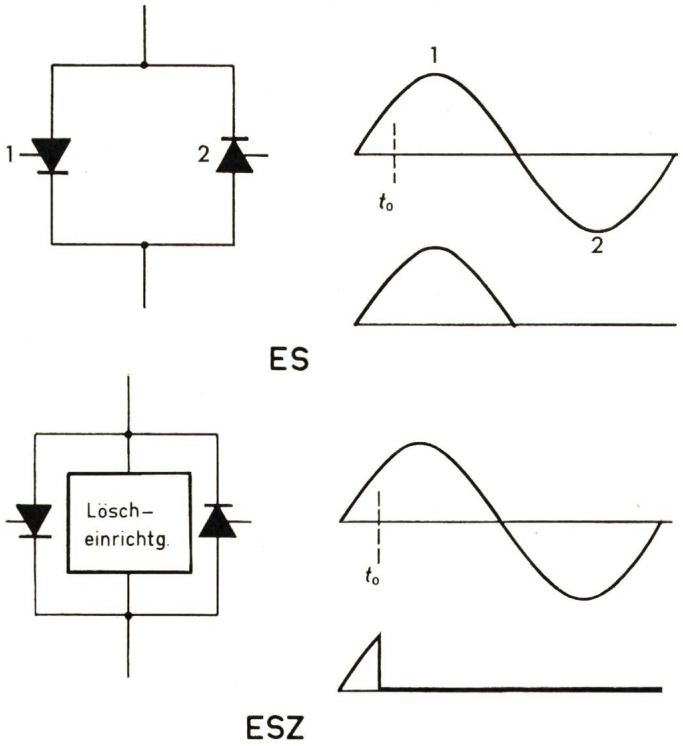

Fig. 18
Prinzipieller Aufbau der elektronischen Schalter
t_0 Ausschaltbefehl

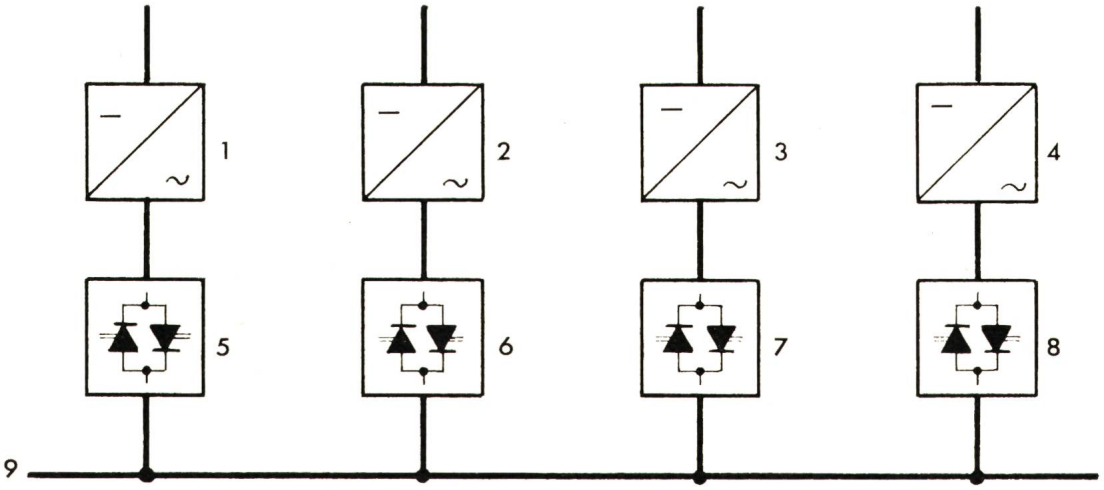

Fig. 19
Parallelgeschaltete Wechselrichter mit zwangskommutierten elektronischen Schaltern

1...4 Wechselrichter
5...8 zwangskommutierte elektronische Schalter ESZ
9 sichere Sammelschiene

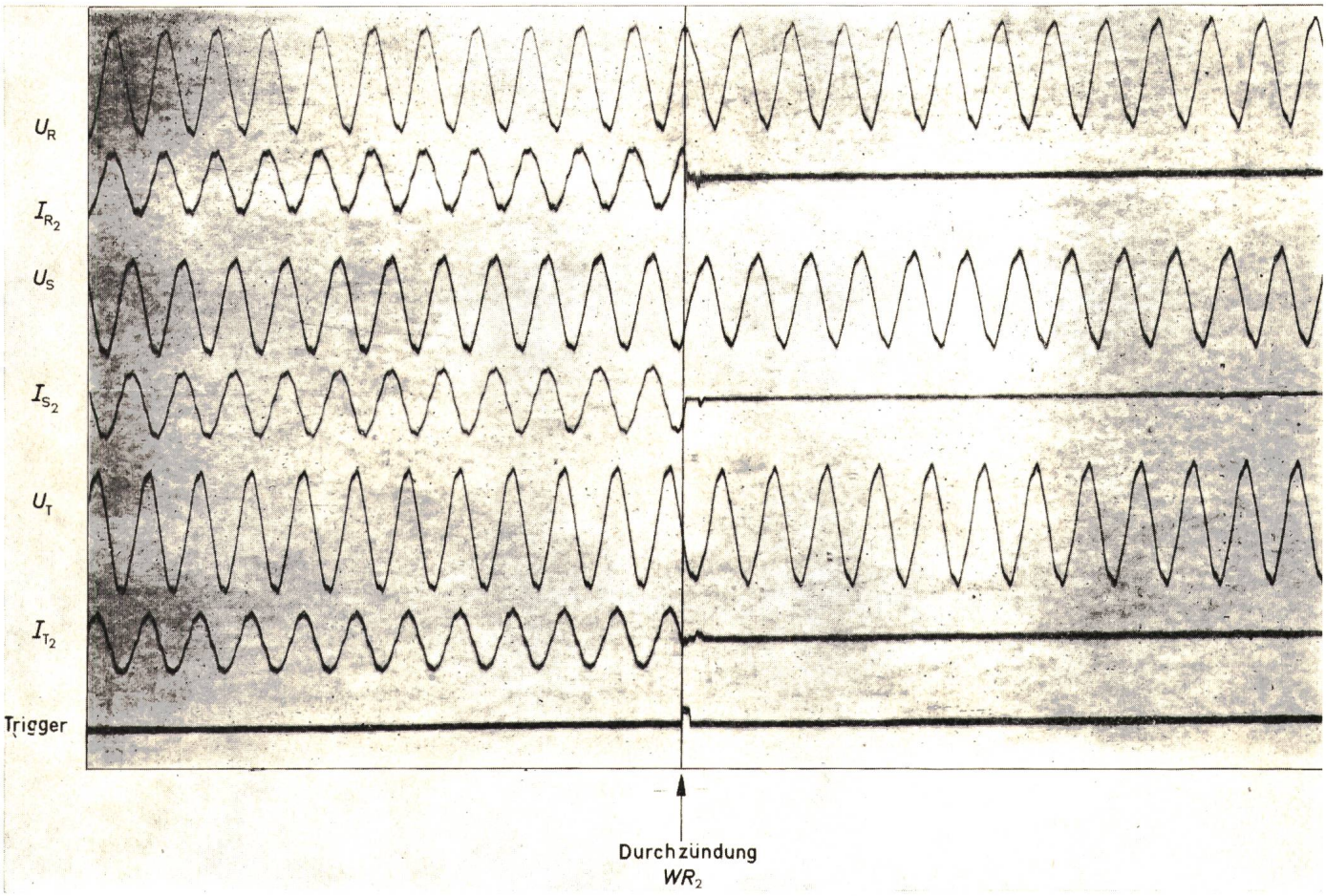

Fig. 20
Oszillogramme einer Fehlerabschaltung beim (n–1)-Betrieb

besprochenen Geräten Dauerstromversorgungsanlagen projektiert werden können, welche den heutigen und zukünftigen Anforderungen genügen.

Literatur

[1] *B. D. Bedford* and *R. G. Hoft:* Principles of inverter circuits. New York/London, John Wiley, 1964.

[2] *R. Bertschi:* Wechselrichter für Notstromversorgung. Brown Boveri Mitt. 53(1966)10, S. 727...733.

[3] *K. H. Schminke:* Unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlagen mit statischen Wechselrichtern. BBC Nachrichten 52(1970)3/4, S. 66...72.

[4] *F. Amrein* und *K. Leimgruber:* Statische Wechselrichter. Brown Boveri Mitt. 57(1970)5, S. 227...237.

Adresse des Autors:
P. Keller, dipl. Ing. ETH, AG Brown, Boveri & Cie., 5400 Baden.

WILHELM LUDWIG HALLWACHS

1859—1922

Als Sohn eines Theologen wurde Hallwachs am 9. Juli 1859 in Darmstadt geboren. Er studierte, unterbrochen von einem Berlinerjahr, in Strassburg Physik. Nach einer Assistentenzeit bei Prof. Kundt zog er 1884 zu Prof. Kohlrausch nach Würzburg, habilitierte sich 1886 in Leipzig und kehrte 1888 zum inzwischen nach Strassburg berufenen Prof. Kohlrausch zurück. Hier machte er 1888 seine Entdeckung auf dem Gebiete der Lichtelektrizität. Die als Hallwachs-Effekt bezeichnete Erscheinung besteht darin, dass eine Metallplatte bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht positiv elektrisch aufgeladen wird, oder wenn sie negativ geladen ist, diese Ladung verliert.

Hallwachs ging bei seinen Arbeiten von einer im Vorjahr von Hertz gemachten Beobachtung aus, die dieser aber nicht weiter verfolgte. Der Hallwachs-Effekt erlangte Bedeutung für die Photozelle, den Tonfilm, die Bildtelegraphie und das Fernsehen.

Im Jahre 1890 heiratete Hallwachs Prof. Kohlrauschs Tochter Marie, die ihm vier Töchter geschenkt hat.

Hallwachs kam 1893 an die Technische Hochschule in Dresden, zuerst als Ordinarius für Elektrotechnik, und 1900 für Physik als Nachfolger Toeplers. Hier nahm er 1904 seine lichttechnischen Studien wieder auf und stiess dabei auf die sog. lichttechnische Ermüdung. 1905 erlangte der Hallwachs-Effekt neue Bedeutung für Einsteins Lichtquantenhypothese.

1921 wurde Hallwachs Rektor der Hochschule; aber schon am 6. Juni 1922 hat ihn der Tod ereilt. *H. Wüger*