

Jahresbericht 1949

des Elektrotechnischen Laboratoriums
Gruppe H ö l t e r s / Bearbeiter J a h n .

A) Drehstrom-Netzmodell.

Als Hauptaufgabe bestand die Erweiterung der Modellanlage durch den Drehstromteil. Die bereits im Jahre 1948 durchgeführten Planungen wurden erweitert und zur Ausführung gebracht.

1. Schaltanlage

Die Netzmodell-Schalttafel nach Schaltbild OB 4e2-82-2959 gestattet alle für den Betrieb des Drehstrommodells benötigten Anlagenteile jeweils nach den Erfordernissen der Schaltung zentral zu bedienen. Sie hat 7 Felder und ist in dem Bericht H 72 nach der schalttechnischen und der konstruktiven Seite beschrieben. Es schließen sich die beiden Motor-Generatoren und der Phasenschieber an. Die Generatoren und der Phasenschieber (nach Bericht H 164) wurden bei dem Büro für Elektrische Maschinen hergestellt und kamen leider erst Ende November zur Anlieferung, so daß es nicht möglich ist, mit ihnen Versuche durchzuführen. Die Schaltanlage wird ergänzt durch die Kurzschluß- und Belastungsdruckschleifen (nach A/T 50), durch den Synchron-Deferner, den Kollektor-Gleichrichter und die Blindleistungs-Batterie.

2. Leitungsmodell.

Den zweiten Hauptteil des Drehstromnetzmodells bildet das Leitungsmodell nach (A/T 42 und A/T 56), das die Nachbildung von 800 km 110.000 V Doppelleitung darstellt. Dieses Modell nach Antonetti ist nach Bericht H 72 durchgeführt, daß verschiedene Netznachbildungen mit einfachen Umschaltungen durch Laschen hergestellt werden können. Für das Schalten der Fehler (insbesondere Kurzschlüsse) wurde von der Gruppe H ö l t e r s der Synchron-Schalterschalter gebaut. Als vielseitig schaltbarer ohmscher Verbraucher wurde ein dreiphasiger Regelwiderstand nach Antennotis A/T 61 erstellt.

SECRET

B) Schutzrichtungen

Neben den Erweiterungen zur Modellanlage liefen Untersuchungen und Entwicklungen für die Verbesserung der magnetischen Schutzrelais. So wurde zunächst in Zusammenarbeit mit den KAV ein neues Gittersperr-Relais entwickelt, das für die Gleichrichtereinheiten $\frac{1}{2}$ verwendet wird. Angaben über diese Relais enthält der Bericht H 9. ^{12/3} des Herrn Jauer, sowie das Datenblatt GB/TB 490629.

Hierauf wurde ein magnetischer Rückschlagenschutz für die Gleich- und Wechselrichter der Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragung erforscht und untersucht. Die erzielten Ergebnisse sind in dem Bericht H 70 zusammengestellt.

C) sonstige thematische Arbeiten

Die Entwicklung der Modellanlage und der Schutzrelais konnte leider nicht mit größerer Ausführlichkeit durchgeführt und beschrieben werden, weil der Berichtler durch organisatorische Aufgaben des Büros stark in Anspruch genommen war. In besonderen Obliegenheiten lagen ihm die ordnungsgemäßen Verpackungen und Versendungen der Ergebnisse des Gleichrichterbüros, wofür vielfach besondere Einrichtungen geschaffen werden mußten. So wurde im Anfang August ein zweiter Gleichrichterzug mit während der Fahrt nach Rußland geeigneten Gleichrichtern H 80 1/1 und 2/1 ausgerüstet, für deren Versorgung ebenso wie im Jahre 1948 2 Diesel-elektrische Aggregate aus Kinnats gelangten.

D) Agerthemenatische Arbeiten

Der Berichtler beteiligte sich an den Entwurfsarbeiten für eine Lichtbogenofenanlage nach Bericht H 64.

20.11.49
ja/la

SECRET

25X1A



**Der Stand der Stromrichtertechnik
in Deutschland und ihre Entwicklung
in der nächsten Zukunft.**

~~June 1949~~

Sekundärstrom der Drehstromwandler	0,028 A
Leistung	2 VA
Überstromsiffer	größer als 15
Hilfsstrom des Gleichstromwandlers	2 A
Übersetzung des Zusatzwandlers	2/0,043 A
Leistung	3,6 VA
Überstromsiffer	größer als 5
<u>Relais</u>	
Anzuge- und Haltepule	
für 220 V Es	
Verwiderstand	6000 Wdg 0,1 mm ² CuL 650 Ohm
Halteverwiderstand	650 Ohm (3 W)
Anziehen	8500 Ohm (3 W)
Halten	1000 Aw
Gegenspule	135 Aw
Ansprechen	6,5 V (0,032 A)
Verwiderstand R_v	1600 Wdg 0,1 mm ² CuL 200 Ohm
<u>Dämpfkreis</u> 0	45 Aw
	2000 Ohm (3 W)
	2 nF 400 V Ws
	Prüfspannung 1200 V Ws
	3 kOhm (3 W)
<u>Überspannungsableiter</u>	
R_{11}	900 Ohm

1. Zweck und Arten der Stromrichter.

Stromrichter sind Geräte der Starkstromtechnik, die die Umformung einer Stromart in eine andere bewerkstelligen, ohne den Umweg der Erregung mechanischer Energie als Zwischenenergieform zu beschreiten. Als Stromarten sind dabei zu unterscheiden der Gleichstrom, der Wechselstrom (einphasiger Wechselstrom) und der Drehstrom (dreiphasiger Wechselstrom) beliebiger Frequenz. Sie sind den umlaufenden elektrischen Maschinen in verschiedener Beziehung überlegen; sie sind anspruchslos in ihrer Aufstellung und Wartung, haben meist einen besseren Wirkungsgrad und sind mit verhältnismäßig geringem Aufwand vielseitig und praktisch tragheitslos steuer- und regelbar.

Die Umformung einer Stromart in die andere geht immer so vor sich, dass durch periodische Umschaltungen, die der Stromrichter vollführt, eine periodisch wechselnde Veränderung der Strombahnen zwischen dem einen und dem anderen Stromsystem stattfindet. Unter dem Sammelbegriff Stromrichter unterscheidet man Gleichrichter, Wechselrichter und Umrichter.

Gleichrichter sind Stromrichter, die Wechselstrom oder Drehstrom in Gleichstrom umwandeln, indem mittels des genannten Schaltmechanismus Stromelemente der Wechselstroms (z. B. Dioden) ausgewählt und auf der Gleichstromseite zu Gleichstrom zusammengefügt werden.

Wechselrichter sind Stromrichter, die dem umgekehrten Zweck dienen. Bei ihnen wird mittels des Schaltmechanismus der Gleichstrom zeitlich aufgeteilt, und es werden die entstehenden Stromelemente in wechselnder Richtung dem Wechselstromnetz zugeführt.

Stromrichter nennt man endlich die Stromrichter für den allgemeinen Verwendungszweck, einen Wechselstrom oder Drehstrom einer Frequenz in einen Wechselstrom oder Drehstrom der gleichen oder anderen Frequenz umzuformen. Einer der wichtigsten Anwendungsfälle ist die Umformung von Drehstrom von 50 Hertz in Einphasen-Wechselstrom von 16 2/3 Hertz. Auch hier geht es im Grunde nichts anderes als ein Auswählen pa^{ssender} Stromelemente des einen Stromsystems und passender Zuleitung dieser Stromelemente an das andere Stromsystem.

Für die technische Durchführung der erforderlichen periodischen Schaltfunktion stehen mehrere Wege offen. In der Starkstrompraxis haben sich indessen nur drei Arten von Stromrichtern durchgesetzt, die mechanisch wirkenden Kontaktumformer, die Trockengleichrichter, die, wie der Name schon sagt, nur die Gleichrichtung des Stromrichters zulassen, und die Lichtbogen-Stromrichter. Unter den letzteren gibt es solche, die durch den elektrischen Lichtbogen in der freien Atmosphäre brennt und solche, bei denen ein Lichtbogen in einem Vakuumgefäß unterhalten wird.

Von dieser zuletzt genannten Art der Stromrichter soll im Folgenden ausschliesslich die Rede sein. Man bezeichnet sie in ihrer technisch-physikalischen Kennzeichnung als Gasentladungs- oder Dampfentladungs-Stromrichter, da es sich bei dem Lichtbogen dieser Geräte um eine Bogenentladung von Quecksilberdampf in einem evakuierten Gefäß handelt. Dieses Vakuumgefäß hat immer eine Kathode und eine oder mehrere Anoden, womit die Elektroden gemeint sind, zwischen denen der Lichtbogen brennt.

Unter diesen Dampfentladungs-Stromrichtern gibt es wiederum zwei verschiedene Formen, die sich in der Ausbildung und physikalischen Wirkung der Kathode unterscheiden. Bei der einen Art von Stromrichter-

gefasst hat man als Kathode eine mittels eines Heizdrahtes auf Acetat erweichte Oxydkathode, die dadurch befähigt ist, Elektronen zu emittieren. Ausserdem befindet sich in dem Vakuumgefäss etwas Quecksilber, von dem ein Teil verdampft, so dass in ihrer Wechselwirkung mit den Elektronen aus der Kathode die Voraussetzungen für die Bildungsmöglichkeit eines Quecksilberdampf-Lichtbogens gegeben sind. Das Gleiche erreicht man durch eine Edelgasfüllung des Gefässes.

Auf der anderen Seite gibt es Stromrichtergefässe mit einer Kathode, die aus einem Behälter mit flüssigem Quecksilber besteht. Leitet man an dieser durch Herausziehen einer stromdurchflossenen Tauchelektrode einen kleinen Hilflichtbogen ein, so bildet sich auf der Quecksilberoberfläche ein Fleck hoher Temperatur aus, der einerseits Elektronen emittiert und andererseits als Ausgangspunkt einer erheblichen Quecksilberdampfentwicklung ist. Mit der damit im Gefolge stehenden Zündung des Hauptlichtbogens zwischen Anode und Kathode stellt sich ein gewisser Gleichgewichtszustand in der Elektronen- und Dampfemission des Kathodenfleckes einerseits und der Erhaltung der den Lichtbogen bedingenden Voraussetzungen im Entladungsräum andererseits ein. In diesem Raum bildet sich ein Plasma aus, das Elektronen, ionisierte Quecksilberteilchen und neutralem Quecksilberdampf enthält. Der weitgehend überschüssige Quecksilberdampf kondensiert dabei an den Gefässwänden und kehrt als flüssiges Quecksilber zur Kathode zurück.

Die erstgenannte Art der Gasentladungs-Stromrichter nennt man Gleichkathoden-, die zuletzt beschriebene Art Quecksilberkathoden-Stromrichter. Um diese soll es sich im Folgenden vorzugsweise handeln. Je nachdem das Vakuumgefäss aus Glas oder aus Eisen gefertigt ist, spricht man von Glas- oder von Eisen-Stromrichtern. Alle Stromrichter haben das

-4-

für ihren Betrieb entscheidende gemeinsame Merkmal, dass ein Stromfluss nur in der positiv gerichteten Stromrichtung von Anode zur Kathode möglich ist. Die Zündung und Unterhaltung des Lichtbogens setzt also voraus, dass die Anode positiv gegenüber der Kathode ist.

Aber auch bei positiver Anodenspannung lässt sich der Zündzeitpunkt des Lichtbogens durch äußere Einwirkung beeinflussen. Durch ein an eine passende Steuerspannung angeschlossenes vor der Anode angebrachtes und elektrochemisch wirkendes Steuerungsgitter lässt sich die sonst eintretende Zündung des Lichtbogens aussetzen und auf einen späteren Zeitpunkt verschieben. Man nennt diese Beeinflussung die Gittersteuerung des Stromrichters. Sie gestattet bei Gleichrichtern eine bequeme Gleichspannungsreglung und macht bei Wechselrichtern und Umrichtern ihren Betrieb durch passende Auswahl der aufeinanderfolgenden Zündungen der Lichtbogenstrecken überhaupt erst möglich.

Die Arbeitsweise eines Stromrichtergerätes ist somit gekennzeichnet durch die periodische Aufeinanderfolge der Brennzeit und Löschzeit der Lichtbogenstrecken, wobei man sich zu vergegenwärtigen hat, dass bei Gross-Stromrichtern beispielsweise 50mal in der Sekunde ein Lichtbogen mit einem Stromfluss von einigen hundert bis einigen tausend Ampere gezündet wird und nach jeweiliger Löschung dieses Lichtbogens eine Sperrspannung zwischen Anode und Kathode von einigen tausend bis zu einigen zehntausend Volt eintritt.

In der Anfangszeit der heute fast vier Jahrzehnte umspannenden Entwicklung der Stromrichter ging man bei der Konstruktion der Gehäuse rein empirisch vor, und dieser Weg war bei den damals geforderten Beanspruchungen hinsichtlich Ströme und Spannungen auch gangbar, sofern der Materialaufwand keine entscheidende Rolle spielte. Dieser

-5-

empirische Standpunkt wurde von den Konstrukteuren etwa von 1910 bis 1930 in aller Entschiedenheit behauptet. Die Erfahrung hat ihnen Recht gegeben, solange es sich um Gleichrichterseinheiten für Gleichspannungen bis etwa 1000 V und Gleichströme bis etwa 3000 A handelte. Die 1927 aufgestellten Gleichrichter für die Berliner Stadt- und Ringbahn die heute noch pausenlos in Betrieb sind, sind ein Zeugnis dafür. Aber als man von den seit fast ausschließlich üblichen Gleichrichterseinheiten mit 6 Anoden zu größeren mit 12 Anoden oder sogar mit 24 Anoden überging und sich an Gleichrichterströme je Einheit von 6000 A und darüber heranwagte, traten Schwierigkeiten in der Beherrschung der Vorgänge im Entladungsgefäß ein, zu deren Überwindung die bisherigen Erfahrungen nicht mehr ausreichten. Typische Fälle dieser Krisenzeit des Gleichrichterbaus sind die gänzliche Zurücknahme der Projektierung von Gleichrichterseinheiten für Gleichströme bis 20000 A und die Rückdatierung einer für 16000 A projektierten Gleichrichterseinheit auf 8000 A Gleichstrom. Ähnliche Schwierigkeiten stellten sich bei Übergang zu höheren Gleichspannungen von einigen tausend oder einigen zehntausend Volt ein und das Bild verkomplizierte sich weiter als gleichfalls in den Jahren um 1930 die Gittersteuerung der Gleichrichter Wirklichkeit wurde.

In diesen Jahren begann von anderer Seite her eine tiefgehende Erforschung der Physik der Gasentladungen, und es schien, als hätten sich die hier gewonnenen Erkenntnisse eine Bereicherung des Erfahrungsmaterials der Gleichrichterkonstruktion ergeben. Tatsächlich ist von zahlreichen Physikern und Ingenieuren im Laufe der Jahre eine erstaunliche Forschungsarbeit auf diesem Gebiet geleistet worden, die es nicht nur ermöglichte, Stromrichtergefäße betrieblicherer und mit geringerem und besser ausgenutztem Materialaufwand zu bauen, sondern

-6-

auch die höheren Spannungsebenenansprüchen zu beherrschen. Aber trotzdem bereitete es grosse, bei einigen Firmen beinahe unüberwindliche Schwierigkeiten, den reifen Erkenntnissen der Gasphysik bei der Konstruktion der Stromrichtergefässe ihre Beachtung zu verschaffen. Es ist bemerkenswert, dass dies nicht auf unvorhergesehene praktische Schwierigkeiten zurückzuführen war, sondern mehr auf der geradezu eiferrichtigen Weigerung der Gleichrichterkonstruktoren, den inzwischen gewonnenen fortschrittlichen Standpunkt der Betrachtungsweise der Probleme anzuerkennen.

Zu denjenigen, die die Notwendigkeit dieses Einbruchs der technischen Physik in die Konstruktion der Stromrichtergefässe als ihre Aufgabe eingesehen haben, und die auch die schaltungsmässig bedingten elektrotechnischen Probleme ergründet und studiert haben, zählen die durch diese Schrift vertretenen Mitarbeiter dieses Gebietes.

Bevor auf die konstruktiven Merkmale der Stromrichter und die zu diesen gehörenden elektrotechnischen Einrichtungen näher eingegangen wird, soll im Folgenden einiges über die Anwendungsgebiete der Stromrichteranlagen gesagt werden.

2. Anwendungsgebiete der Stromrichter.

Die Erzeugung und Verteilung der elektrischen Energie erfolgt heute in Deutschland bekanntlich ganz überwiegend in Form des Drehstroms mit einer Frequenz von 50 Hertz. Nur in Ausnahmefällen werden noch Stromerzeuger für Gleichstrom oder einphasigen Wechselstrom von $16 \frac{2}{3}$ Hertz, angetrieben durch Kraftmaschinen grösserer Leistung, Wasserturbinen oder Dampfturbinen, verwendet. Auch die Verbraucher elektrischer Energie werden zum grossen Teil aus Drehstromnetzen versorgt. Die allge-

-7-

-7-

meinen Netze unserer Städte und Landbezirke sind in der Type Regel Drehstromnetze von 380 kV oder 220 V verketteter Spannung. Überall dort, wo aus historischen Gründen noch Gleichstromnetze vorhanden sind, ist man bestrebt, auf Drehstrom überzugehen. Moderne Fabriknetze sind Drehstromnetze von 380 V oder 500 V verketteter Spannung. Verbraucher größerer Leistung werden meist unmittelbar an das 6 kV- oder 10 kV-Netz angeschlossen.

Demgegenüber gibt es aber eine Reihe von Verbrauchern, welche entweder an ihrem Betrieb unbedingt auf Gleichstrom angewiesen sind oder für die eine Speisung mittels Gleichstrom so große Vorteile mit sich bringt, daß man davon nicht abgehen will. Diese Verbraucher, die im Folgenden näher beschrieben werden sollen, wurden früher über rotierende Umformer aus den allgemeinen Verteilungsnetzen gespeist. In den letzten zwanzig Jahren sind an die Stelle solcher Umformeranlagen mehr und mehr Stromrichteranlagen getreten und heute werden rotierende Umformer kaum noch aufgestellt. Praktisch alle modernen Gleichstromanlagen größerer Leistung sind Quecksilberdampf-Stromrichteranlagen mit Eisengefäßen. Die Hauptanwendungsgebiete des Quecksilberdampf-Stromrichters gliedern sich in der folgenden Weise:

1. Elektrische Bahnen.

Die Speisung von elektrischen Bahnen im Orts-, Nah- und Fernverkehr und von Industrie- und Grubenbahnen geschieht mit Ausnahme der mitteleuropäischen Fernbahnnetze mit Einphasen-Wechselstrom 16 2/3 Hertz heute fast ausschließlich mit Gleichstrom. Wo noch andere Systeme in Betrieb sind, wie z.B. bei den Hamburger Vorortbahnen, ist man bestrebt, auf Gleichstrom überzugehen. Als Stromumformer für Gleich-

-8-

-8-

strombahnen können heute nur noch Stromrichter in Frage, die noch vorhandene rotierenden Umformer sind am Aussterben. Die in Betracht kommenden normalen Betriebsspannungen sind

550 V Gleichspannung für Straßenbahnen,
750, 1100 oder 1500 V für Stadt- und Vorortbahnen
mit eigenem Bahnkörper sowie für Industrie- und
Grubenbahnen und
3000 V für Fernbahnen.

Die installierten Leistungen je Stromrichtereinheit liegen zwischen 150 kW für kleine Straßenbahnanlagen und 3000 kW für die Schnellbahnen unserer Großstädte und für Fernbahnen. Die Zahl der in Deutschland zur Zeit in Betrieb befindlichen Stromrichter ist schwer abzuschätzen, allein in Berlin beträgt sie weit über hundert.

2. Industrielle Antriebe.

Industrielle Antriebe toter Leistungen, für die ein großer Drehzahl-Regelbereich verlangt wird, sind mit Gleichstrommotoren ausgerüstet. Solche Antriebe werden anstelle der früher üblichen Leonard-Umformer heute in der Regel durch gesteuerte Stromrichter gespeist. Nur in besonders gelagerten Ausnahmefällen, wie z.B. bei Fördermaschinen-Antrieben, steht der Leonard-Umformer noch erfolgreich im Wettbewerb mit der sog. Umkehr-Stromrichteranlage, die in diesen Fällen besonders kompliziert ist, da sie für stopfreien Übergang von Vorwärtsbetrieb auf Bremsen und Rückwärtsbetrieb bei jeder Drehzahl eingerichtet sein muß.

Bei ^{Wahl} Netzwerkantrieben, besonders für durchlaufende Netzwerke, bei Antrieben größerer Papiermaschinen und für ähnliche Aufgaben wird

-9-

-9-

man unbedingt dem Stromrichterantrieb den Vorzug geben, der bei gleicher Betriebssicherheit einfacher und billiger als ein Umformer ist und der dann fragefrei geregelt werden kann.

Die Gleichspannungen solcher Antriebe liegen zwischen 500 und 1200 V, größere Gleichstrommotoren mit mehr als 1200 V Kollektorspannung sucht man zu vermeiden. Die vorkommenden Leistungen je Stromrichtereinheit bewegen sich zwischen einigen hundert kW und 3000 kW und mehr. Naturgemäß sind Antriebe dieser Art noch nicht allzu häufig, doch waren in Deutschland bei Kriegsbeginn schon eine Reihe von ^{Werk} Motoren, einige Papiermaschinen und die Gebläsemotoren aller großen Windkanäle, mit Ausnahme derjenigen in Adlershof, mit Stromrichterantreiben ausgerüstet. Das bemerkenswerteste Beispiel war die 1937 in Betrieb genommene Breitbandstraße in Dinslaken, deren sechs Endgerüste mit Stromrichterantrieben arbeiteten. Es waren dafür 6 Stromrichtereinheiten für 600 V bei 3000 A Dauerlast aufgestellt.

2. Chemische Industrie.

Die chemische Industrie benötigt für verschiedene chemische Umsetzungen in erheblichem Umfang Gleichstrom; sie erzeugt diesen fast ausschließlich mittels Stromrichteranlagen. Vor allem anderen ist für das große Gebiet der Elektrolyse zu nennen. Durch elektrolytische Zersetzung wässriger Lösungen werden in der Hauptsache erzeugt

Wasserstoff,

Chlor und Natronlauge

Zink und

Elektrolytdämpfe.

Der Energieaufwand für die Kupfergewinnung beträgt etwa 130 kWh je Tonne.

-10-

-10-

Durch die sogen. Schmelzflußelektrolyse, bei welcher eine geschmolzene Verbindung des betreffenden Metalles zerlegt wird, werden hauptsächlich gewonnen

Aluminium	mit einem Aufwand von 21 kWh/kg
Magnesium	" " " " 20 kWh/kg
Natrium	" " " " 14 kWh/kg und
Beryllium	" " " " ?

Die Stromrichteranlagen für Elektrolyse sind leistungsmäßig die größten ihrer Art. Beispielsweise sind die Betriebswerte eines Bäder-systems für Aluminium heute 900 V und 30 000 A. Dabei wird die Spannung durch Reihenschaltung einer grossen Anzahl von Gefen deswegen so hoch gewählt, damit man es am möglichst guten Wirkungsgrad erreicht. Bei Anlagen mit Spannungen unter 500 V sind die Verluste so hoch, dass sie vorteilhafter mit Kontakttransformatoren betrieben werden. In Deutschland waren 1959 insgesamt für Elektrolyse-Anlagen aller Art Stromrichter mit einer Gesamtleistung von etwa 1 000 000 kW in Betrieb.

Als weiteres Anwendungsgebiet für den gesteuerten Stromrichter in der chemischen Industrie kam im letzten Jahrzehnt der Gl Lichtbogen-Lichtbogenofen zur Acetylenherstellung aus Abgasen der Hydrierwerke oder aus Ergas hinzu. Derartige Lichtbogenöfen arbeiten mit einer Gleichspannung von 7000 bis 10000 V und einem Strom von etwa 10 000 A. Die einzige Lichtbogenofen-Anlage in Deutschland in Krefeld hatte 14 solcher Einheiten in Betrieb. Weitere Anlagen waren im Bau.

4. Sonderstromversorgung.

Ein weiteres fast ausschließlich dem Stromrichter vorbehaltenes Gebiet ist die Erzeugung der Anodenspannung für die Endstufen der Gross-sender. Es handelt sich hier um Spannungen von 10 000 V und mehr und Leistungen von 200 bis 2000 kW. Ein anderes Anwendungsgebiet bilden

-11-

industrielle Sender für Hochfrequenzheizung-

1. Wechselrichter für Induktionsöfen.

Bisher ist bei der Aufzählung von Anwendungsgebieten der Stromrichter nur von ungesteuerten oder gesteuerten Gleichrichtern die Rede gewesen. Wir gehen jetzt auf die Besprechung der Anwendung des Stromrichters als Wechselrichter oder Umrichter über.

Ein interessantes Anwendungsgebiet des Stromrichters als Wechselrichter ist der Betrieb von Induktionsöfen zur Geglühung von Elektrostahl, bei denen Frequenzen des Stromes zwischen 300 und 2000 Hertz in Betracht kommen. Eine Versuchsanlage dieser Art wurde 1952 auf der Industrie-Ansstellung in Essen gezeigt.

2. Umrichter für Wechselstrombahnen.

Ein eindrucksvolles Bild von der Vielseitigkeit der Anwendung von gesteuerten Stromrichtern geben die sog. Umrichter zur Erzeugung von Biphasen-Wechselstrom 16 2/3 Hertz für den Betrieb der auf diese Stromart abgestimmten Fernbahnen, wobei die Erzeugung dieses Stromes unmittelbar aus dem Drehstrom 50 Hertz der Landesversorgung vor sich geht. Anlagen dieser Art mit einer Leistung von 1000 bis 3000 kW sind in Reichenhall für die Wälderbahn, in Pforzheim und in Nürnberg errichtet worden.

3. Hochspannung-Gleichstromübertragung.

Ein weiteres Anwendungsgebiet der gesteuerten Stromrichter, das, wie viele andere bereits seit über 15 Jahren als Zielsetzung voranschreitet, ist die Kopplung von zwei Landesnetzen mit Drehstrom 50 Hertz über eine Gleichstromleitung. Das Schwerkraft liegt dabei in der Verwendungsmöglichkeit von Kabeln. Beispielsweise lag ein Gedanke zugrunde, für die Energieübertragung aus Skandinavien nach Deutschland

-12-

ein Gleichstromkabel durch die Ostsee zu legen, das über eine Gleichrichteranlage an das nordische und über eine Wechselrichteranlage an das deutsche Energienetz angeschlossen ist. Damit ist eines der interessantesten Probleme angeschnitten, das der Hochspannungs-Gleichstromübertragung, der Übertragung grosser Energien über Entfernungen von der Grössenordnung 1000 km ^{mit denkwürdigen Leistungen bis zu 1000 MW} An seiner technischen Lösung wurde in Deutschland bis Kriegsende intensiv gearbeitet. An diese Arbeiten ist heute verschiedentlich angeknüpft worden und es ist dadurch der seit Jahren immer neu aufliebende Wettbewerb zwischen der 400 kV- Drehstromübertragung und der Gleichstromübertragung gleicher Spannungsleistung wieder in den Vordergrund getreten.

Es überschreite aber den Zweck und den Rahmen dieser Schrift bei weitem, auf dieses Problem ausführlicher einzugehen.

Die Stromrichterart

Es gibt nun noch weitere Anwendungen des gesteuerten Stromrichters, die aus dem Rahmen der bisher aufgeführten Stromarten ausser, wie man auch zuweilen zu sagen pflegt, der Strom-Umarten, völlig herausfallen. Bei ihnen werden die Lichtbogenstrom eines Stromrichters nur noch zum Vollzug einer Behälterfunktion herangezogen.

Ein bedeutendes Anwendungsgebiet dieser Art ist der sog. Stromrichter-motor, ein Aggregat einer elektrischen Maschine und eines Stromrichters, bei welchem Letzterer die Funktion des Kollektors eines Gleichstrommotors übernimmt. Mit einer solchen Anordnung ist es möglich, ausgehend von einem Drehstromnetz normaler Frequenz, einen Motorantrieb mit stetiger Drehzahlregelung zu schaffen.

Die sog. Synchrontype des Stromrichter-motors besteht aus einem Synchro-motor, der über einen Umrichter von dem Drehstromnetz gespeist wird. Der Umrichter gestattet, die netzfrequente Spannung in eine andere Wechselspannung umzuwandeln, deren Frequenz von Null an stetig

regelbar ist, wodurch es möglich ist, die Drehzahl des Motors stetig zu verändern.

Die sog. Asynchron-type des Stromrichter-motors besteht aus einem Asynchronmotor, dessen Schlupfen ^{nicht} wie über einen Umrichter des Netz zugeführt wird. Der Umrichter hat hierbei wie bei einer Drehzahlregelung mit Hinterrmaschine die Aufgabe, die schlupffrequente Spannung in eine netzfrequente Spannung umzuwandeln und somit je nach der Größe und Richtung der über den Umrichter übertragenen Leistung eine stetige Drehzahlregelung im über- und unterasynchronen Bereich bis herab auf Null zu ermöglichen.

Die Entwicklung der Stromrichter-motoren wurde sowohl von den deutschen Firmen AEG und BBC, als auch in Amerika, in Russland und in der Schweiz aufgegriffen. Die AEG lieferte an die Conti-Werke in Hannover einen Synchron-Stromrichter-motor von etwa 150 kW für den Antrieb eines Inlanders. In Ausland wurde 1948 ein 500 kW-Motor für einen Walzstrahnenantrieb in Betrieb genommen. Im übrigen steht die Entwicklung des Stromrichter-motors noch ziemlich in den Anfängen. Indes man verspricht rasch weitere Fortschritte hinsichtlich besserer Ausnutzung des Motors bei Verwendung von Schaltungen, die anstelle mehrerer Stromabzweigungen eine entsprechende Anzahl von Einanoden-Gefüßen erfordern. Dieser Umstand kommt der heute erfolgten Entwicklungstendenz, die, wie nachher noch gesagt werden wird, den Einanoden-Gefüßen den Vorrang gibt, unmittelbar entgegen.

2. Schweißmaschinen:

Als reines periodisch wirkendes Schaltorgan wird der gesteuerte Stromrichter als Kurzschalter für Schweißmaschinen verwendet. Durch Änderung der Gittersteuerung lässt sich leicht jedes gewünschte Schweißprogramm erreichen. Zur Erzielung des gleichen Zweckes sind

auch sog. Ignitron-Gefässe, Finanoden-Stromrichter-Gefässe, mit einem Kundstift an der Kathode anstelle des Steuerleiters an der Anode, verwendet worden. Dieser, aus einem besonderen Material gefertigte Kundstift, gestattet eine augenblickliche Mensündung eines Lichtbogens ohne vorheriges Bestehen einer Kathodenfleckbildung.

10. Schalter.

Weitere Anwendungsöglichkeiten des Stromrichters als trägeitelooser Schalter sind bisher erst an kleinen Versuchsmodellen erprobt. So kann man z. B. einanodige Gefässe, die paarweise antiparallel geschaltet sind, zur automatischen stopfreien Synchronisierung von Drehstrommaschinen verwenden, wobei die Lichtbogenstromen nach Umstellung der Stromverbindung durch einen Trennschalter überbrückt und entlastet werden.

Auch die ^{Übertragung} Untersuchung von hochgespanntem Gleichstrom, die bekanntlich mit dem üblichen Leistungsschalter nicht mehr möglich ist, kann mit einem Stromrichter in Verbindung mit einem Kondensator bewerkstelligt werden. Eine solche Einrichtung, die man als Kondensator-schalter bezeichnet, erlangt vielleicht im Zusammenhang mit der Hochspannungs-Gleichstromübertragung noch einmal größere Bedeutung.

11. Batterieladung.

Neben der nach Schilderung der ausserordentlich vielseitigen Verwendungsmöglichkeit der gesteuerten Stromrichter zu unserem Ausgangspunkt, den Gleichrichtern zurück, so haben wir die Pflicht, ein Anwendungsgebiet zu erwähnen, das zugleich das historisch älteste ist, nämlich die Batterieladung. Allerdings ist die Heransicht von Queck Silberkathoden-Stromrichtern heute nur noch den grossen Leistungen bei entsprechend hoher Batteriespannung vorbehalten, da das

Gebiet kleiner und mittlerer Leistungen, vor allem bei niedriger Batteriespannung, vorwiegend von den Freckengleichrichtern und Glühkathodengleichrichtern sowie neuerdings mehr und mehr von den Kontaktanfermern beherrscht wird.

Die Bauformen der Stromrichtergefäße.

Es soll nun auf die Ausführung der Stromrichtergefäße und auf die physikalisch-technischen Gesichtspunkte für ihre Konstruktion näher eingegangen werden. Dabei soll ausschließlich von Quecksilberdampf-Stromrichtern mit Quecksilberkathode die Rede sein. Die Arbeitsweise eines Stromrichters ist, wie bereits gesagt worden ist, gekennzeichnet durch die periodische Aufeinanderfolge von der Brennzeit einer Lichtbogenstrecke und der daran anschließenden Sperrzeit. Die Beanspruchung des Stromrichters ist daher festgelegt durch die Strombelastung während der Brennzeit und die Sperrspannungsbeanspruchung des Entladungsräume während der Sperrzeit. Der brennende Lichtbogen selbst ist gekennzeichnet durch die sog. Brennspannung, die je nach Größe und Art des Stromrichters etwa 20 bis 35 V betragt. Die hierdurch bedingten Verluste im Gefäß bestimmen dessen Temperaturverhältnisse, die mit den günstigsten physikalischen Bedingungen der Entladungstrecke in Einklang stehen müssen, bzw. sie bestimmen die durch Kühlung abzuführende Wärmemenge. Die Sperrspannungsbedingungen nach Verlöschchen des Lichtbogens dürfen andererseits zu keiner sog. Rückzündung führen, womit man die Störung meint, die eintritt, wenn vorübergehend eine Anode selbst zum Ausgangspunkt eines Lichtbogens wird. Infolgedessen setzt die einwandfreie Steuerfähigkeit des Stromrichters voraus, dass jede Entladungstrecke nach Verlöschchen des Lichtbogens rasch und genügend vollständig entionisiert wird,

-16-

da meist die Gitterstromröhre der der erlesenen Anode nachfolgenden Anode gefährdet ist.

Wie bei anderen Maschinen und Geräten wird auch bei einem Stromrichter die Bauform bestimmt durch die auch vielfach widerstreitenden Forderungen nach Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit.

Die in einer Entladungsröhre stehenden Wärmeverluste errechnen sich aus dem Produkt von Brennspannung zwischen Anode und Kathode und dem fließenden Strom, wobei eigentlich noch genauer gesagt werden müsste, welche Mittelwerte dieser Größen gemeint sind.

Bei richtig konstruierten Stromrichtern mittlerer Größe ist die Brennspannung ziemlich unabhängig von der Belastung und beträgt durchschnittlich 20-25 V. Davon entfallen als Spannungsgefälle an der Kathode etwa 8-10 V und als Spannung an der Anode 4-5 V, während der Rest der Brennspannungsabfall in der eigentlichen Lichtbogenmulde verkehrt wird. Die weitgehende Unabhängigkeit der Brennspannung von der Röhrentype schließt in sich, dass die Wärmeverluste unabhängig von der Betriebsspannung sind, so dass der Wirkungsgrad umso besser wird, je höher die Betriebsspannung ist.

Die an den einzelnen Bauteilen anfallenden Verluste des Stromrichtergerätes müssen nun bei Temperaturen abgeführt werden, die einen einwandfreien Betrieb gewährleisten. Die an der Kathode entstehende Verlustleistung äußert sich in einer Temperatursteigerung sowie einer dem Belastungsstrom entsprechenden Verdampfung des Kathodenquacksilbers. Da sich beides auf die Höhe des Quacksilberdenkstrahles im Vakuum auswirkt, der für das betriebssichere Arbeiten des Stromrichters von ausschlaggebender Bedeutung ist, müssen von konstruktiver und betrieblicher Seite Vorkehrungen getroffen werden, um diesen Wert in bestimmten Grenzen zu halten. Das sind die Temperaturregelung

-17-

an der Kathode und die Bereitstellung von ausreichenden Kühlflächen für die Kondensatoren des Quecksilberdampfes.

Die Anode als der eigentliche Sitz der Ventilwirkung des Stromrichtergefäßes soll während der Brennzeit ein einwandfreies Zünden und Brennen des Lichtbogens und bei Beginn der jeweiligen Sperrzeit ein möglichst rasches Kationisieren und Wiederfreierwerden der Entladungsstrecke von positiven Ladungsträgern gewährleisten. Dies bedingt, dass die Anode einmal vor einem direkten Einstrom des Quecksilberdampfes geschützt werden muss, was im allgemeinen durch ein Zurückweichen des Anodenkopfes in sog. Anodenarme bewirkt wird. Ausserdem sind besondere Kationisierungsflächen vorzusehen, sog. Abreggitter und Steuergitter, die indessen den freien Durchtritt des Lichtbogens während seiner Brennzeit nicht allzusehr behindern dürfen.

Die an den Anodenarmen anfallende Verlustwärme wird nur zu einem ganz geringen Teil durch Wärmeleitung über die Anodenboizen an die daran anschließenden Kühlkörper weitergegeben. Der grösste Teil wird bei den hier herrschenden Temperaturen von 600-800 °C an die Umgebung abgestrahlt. In Anbetracht dieser verhältnismässig hohen thermischen Beanspruchung der Anode muss als Material für die Anodenköpfe äusserst reiner Elektrographit verwendet werden.

Für die Bauart des Stromrichtergefässes ist vor allem die Temperaturhaltung der den Quecksilberdampfdruck bestimmenden Flächen massgebend. Je nach der spezifischen Belastung der Kondensationsflächen erfolgt die Wärmeabfuhr durch Luft- oder Flüssigkeitskühlung.

Bei kleinen und mittleren Gefässleistungen kommt man meist mit Luftkühlung aus. Ein typisches Beispiel dafür sind die Gleichrichter, die bei sechsstündiger Bauart für Gleichstromstärken bis etwa 400 A gebaut werden. Das Feld grösserer Gleichstromstärken wird durch die Eisenblechrichter beherrscht. Ihre Bauformen sind bei den verschiede-

-18-

nen Herstellerfirmen recht unterschiedlich. Was viele Eisengleichrichter mit dem Glasgleichrichter gemeinsam haben, ist der oberhalb der Kathode angeordnete zentrale Kühlturm, um dessen unteren Teil sich die Anoden herumgruppieren. Die Anoden befinden sich dabei entweder in besonderen Armen, die dem Luftstrom eines Lüfters ausgesetzt sind, oder sie sind in einen besonderen zylindrischen Kessel untergebracht, der gegebenenfalls den Unterbau für den obengenannten Kühlturm bildet.

Solche luftgekühlte Stromrichtergefäße werden bei Bestückung mit 6 Anoden für Gleichstromstärken bis 1000-1500 A ausgelegt, wobei Gleichspannungen bis 600-800 V in Betracht kommen. Bei höheren Gleichspannungen ist die Gleichstromstärke herabzusetzen. Zur Verwendung als Sendegleichrichter sind luftgekühlte Mehranodengleichrichter für Gleichspannungen bis 20000 V ausgeführt worden.

Bei Gleichstromstärken oberhalb 1000 A sind Eisengleichrichter im allgemeinen wassergekühlt, wobei die Kathode und die Gefäßwände in erster Linie wassergekühlt sind, während die Anodenbolzen bei den größeren Gefäßtypen für Gleichströme oberhalb 5000 A wassergekühlt sind. Bestückt ~~man~~ diese Gefäße bei Gleichströmen

bis etwa	1000 A	mit 6 Anoden
"	"	4000 A " 12 "
"	"	6000 A " 18 " und
"	"	8000 A " 24 "

Es ist klar, daß bei derartigen Grossgleichrichtern mit ~~zunehmender~~ wachsender Anodenzahl der Gefäßdurchmesser sehr groß werden muß. Bei einem 8000 A-Gleichrichter beträgt er etwa 3 m, womit sich eine Lichtbogenlänge von beinahe 2 m ergibt. Bei einer solchen Länge der Entladungstrecke sind jedoch Brennspannungen von 40 V und mehr zu erwarten. Aus diesem Grunde ist man vor etwa 10 Jahren dazu übergegangen, Einanoden-Stromrichtergefäße zu bauen, ~~aber~~ ^{also} je Anode ein eige-

-19-

-19-

nes entsprechend kleineren wassergekühltes Gefäßes mit eigener Kathode vorzusehen. Damit kehrte die Entwicklung scheinbar wieder zu jenen Bauformen zurück, die bei dem Entwurf der ersten Eisengleichrichter vor fast 40 Jahren bestanden haben, denn auch die damaligen Gleichrichter waren einanodig ausgeführt. Es ist jedoch zu bedenken, daß die tatsächliche konstruktive Ausbildung nach den heute vorliegenden Erkenntnissen der Gasentladungsphysik eine vielfältig andere ist, als die damals durchgeführte.

Die Aufrechterhaltung des Vakuums eines Eisengleichrichters erforderte bisher im allgemeinen und bei den Hochstromtypen auch heute grundsätzlich eine ständig laufende Vakuum-Pumpenentwicklung. Der Hauptgrund für diese Notwendigkeit ist die Schwierigkeit, die Dichtungen für die isolierten Anodendurchführungen genügend temperaturfest auszubilden. Seit etwa 10 Jahren sind indes an auf diesem Gebiet wesentliche Fortschritte gemacht worden. Es ist gelungen, die entscheidenden Fragen der Gefäßdichtigkeit zu klären, völlig dichte Schweißnähte herzustellen, und es ist gelungen, temperaturfeste und hochvakuumdichte Elektrodeneinführungen herzustellen.

So ist man schon vor einer Reihe von Jahren dazu übergegangen, luftgekühlte Mehranodengefäße für Gleichstromströme bis 1500 A pumpenlos auszuführen. Es sind bei diesen Lebensdauern von 10-bis 20000 Brennstunden erreicht worden. Ferner legte man bei der Entwicklung der Binodengefäße im Gegensatz zu den Vereinigten Staaten, wo üblicherweise 6 Gefäße an eine gemeinsame Vakuumpumpe angeschlossen wurden, in Deutschland von Anfang an Wert darauf, diese Gefäße pumpenlos auszuführen.

Bevor wir auf die Beschreibung der für solche Stromrichtergefäße entwickelten Elektrodendurchführungen eingehen, müssen wir indessen

-20-

-20-

einen Punkt des Gefäßbaues erwähnen, dessen Kenntnis zur Beurteilung der Durchführungsrichtungen unerlässlich ist. Stromrichtergefäße sind nach ihrer Fertigung und Evakuierung nicht unmittelbar betriebsfähig, da an den innenseitigen Gefäßwänden Gasreste eingeschlossen sind, die mit der Gefäßerwärmung austreten und das Vakuum verschlechtern. Aus diesem Grunde führt man mit dem Gefäß einen Prozeß durch, den man Formieren oder Ausheizen nennt und der darin besteht, durch langsam gesteigerten Strombetrieb bei niedriger Gleichspannung und bei ständig laufender Vakuumpumpe eine Gefäßerwärmung und Erwärmung der übrigen Innenteile zum Zwecke der Austreibung der Gasreste durchzuführen. Für ganz gewöhnlich geht diesem Prozeß eine Sonderbehandlung der Graphitanoden und andererteile voraus. Dieser Ausheizprozeß ist indessen begrenzt durch die Temperaturfestigkeit der in dieser Beziehung entwickelten Teile des Gefäßes. Und diese Teile sind die Durchführungsrichtungen.

Die älteren Gumdichtungen, die bei Groß-Stromrichtern heute noch vielfach angewendet werden, vertragen eine Temperaturbeanspruchung von wenig über 70° C. Es war daher ein Fortschritt, als es gelang, Durchführungen mit Keramik als notierendes Dichtungsmaterial zu entwickeln, bei denen eine Weichlothaut auf der Keramik die vakuumdichte Verbindung mit dem Gefäß Eisen herstellte. Solche Dichtungen vertragen bereits über 100° C. Einen außerordentlichen Fortschritt erzielte man mit Silber-Hartlötungen zwischen Keramik Keramik und Eisen. Die Temperaturfestigkeit dieser Dichtungen erreichte 400-500° C, allerdings wird sie bisher nur für äußere Keramikdurchmesser von etwa 60 mm ausgeführt werden. Eine andere Elektrodendurchführung, die sich für pumpenlose Gefäße sehr bewährt hat, ist auf einer Glas-Eisen-Verschmelzung aufgebaut. Bei ihr ist ein emailleüberzogener Durch-

-21-

-21-

führungsbolzen bzw. ein Durchführungsrohr aus Chromstahl über einen Glaspfropfengleichfalls emaillierten Eisrohr verschmelzen. Die Temperaturgrenze dieser Dichtungen liegt z.zeit bei 300-350°C, bei normalem Gleichlichterbetrieb begrenzt man die Beanspruchung mit Rücksicht auf Elektrolyseerscheinungen, die unter der Spannungswirkung bei höheren Temperaturen im Glas auftreten würden, auf 200 bis 250°C.

Eine der größten Schwierigkeiten, die den pumpenlosen Betrieb wassergekühlter Eisengefäße gegenüberstanden, war die Wasserstoffdiffusion bei der das Vakuum im Gefäß infolge Diffusion von atomarem Wasserstoff aus dem Kühlwasser ständig verschlechtert wird. Hier galt es, sowohl die Kühlwasserseite des Vakuumgefäßes mit einem ausreichenden Schutz zu versehen, als auch das Kühlwasser chemisch derart zu behandeln, daß die als Vorbedingung für die Wasserstoffdiffusion erkannte Korrosion vollkommen vermieden wird.

Was die Fertigung der Stromrichtergefäße anlangt, können für die außerhalb der Vakuumhaut liegenden Bauteile die in der Elektrotechnik allgemein üblichen Materialien verwendet werden. Gänzlich anders gilt indessen für die Fertigung der Innenteile. Hier kommt es auf die richtige Auswahl der Materialien, auf ihre Oberflächenbehandlung, ihre genaue physikalische und chemische Überprüfung entscheidend an. Ferner sind peinlich durchgeführte Waschungen mit Waschmitteln, wie Tetrachlorkohlenstoff oder Trichloräthylen und Benzol sowie Alkohol erforderlich, wobei Lösungsmittelfeste Bürsten und saubere fussel-freie Tücher gebraucht werden müssen.

Besonders hohe Ansprüche sind an die Güte von Eisenblechen, sog. Tiefziehbleche, zu stellen. Diese müssen aus Elektro Stahl herge-

-22-

-22-

stellt sein und einen geringen Kohlenstoffgehalt aufweisen. Die unvermeidlichen restlichen Verunreinigungen müssen unterhalb der äußerst erreichbaren Grenzen liegen. Ferner muß ihre Oberfläche fehlerfrei sein, die Bleche dürfen auch keine sog. Döpfungen aufweisen. Alle weiteren Einbauteile aus Eisen müssen gleichfalls aus Elektro Stahl gleicher Reinheit, in einigen Fällen sogar aus Armeeisen gefertigt werden. An Rohrmaterial dürfen nur vakuumdichte, nahtlos gezogene Rohre verwendet werden.

Das für die Kathode erforderliche Quecksilber, das in einer Menge von etwa 20 g je l A Gleichstrom benötigt wird, muß dennoch rein sein, was in besonderen Reinigungs- und Destillier-anlagen erreicht wird.

Graphit ^{für} die Anodengitter, Blenden und anderen Einbauteile muß in reinster Qualität verwendet werden, es muß saurefrei sein und darf Beimengungen, wie Calcium- und Siliciumverbindungen, nur spurensweise enthalten.

Schließlich sei noch erwähnt, daß sich zur Vermeidung von Überspannungen bei Ersteinschaltungen des halben Stromrichtergefäßes eine Argonfüllung mit einem Partialdruck von etwa 10 Torr bewährt hat.

Aber wir wollen uns bei der Besprechung der Bauformen der Stromrichtergefäße nicht in Einzelheiten verlieren. Einige Typen pumpenloser Stromrichter in sechsanodiger und einanodiger Ausführung, die den derzeitigen Anforderungen zunächst entsprechen dürften, sind in den am Schluß dieses Berichtes vorgeschlagenen Fabrikationsprojekt aufgeführt. Vorerst ist es notwendig, einiges über die weiteren Bestandteile einer Stromrichteranlage mitzuteilen.

Damit wenden wir uns der Elektrotechnik der Stromrichter zu, der wichtigste Bestandteil jeder Anlage in dieser Hinsicht ist der Stromrichter-Transformator.

-23-

4. Stromrichter-Transformatoren.

Ein Transformator hat in elektrischen Anlagen im allgemeinen die Aufgabe der Spannungsübersetzung, weshalb man ihn auch schlechthin als Umspanner bezeichnet. Diese Funktion ist bei Stromrichteranlagen ebenfalls zu erfüllen, da das Stromrichtergerätes ja nur Schaltfunktionen vollführt, also nichts anderes als mehr oder weniger komplizierte galvanische Verbindungen zwischen dem einen Netz und dem anderen Netz herstellt, bei denen das Spannungsverhältnis ^{des Transformators} unverändert bleibt.

Aber die durch den Stromrichter aus dem einen Stromsystem herausgeschnittenen Stromelemente müssen auf die Leitungsbestandteile des anderen Stromsystems richtig und zweckmäßig verteilt werden. Diese Funktion ist nun ebenfalls dem Transformator überantwortet. Sie ist in allgemeinen noch mit einer sog. ^{Phasen}Plasmatransformation verknüpft. Das bedeutet, daß z.B. bei einem Gleichrichter, der Drehstrom in Gleichstrom umwandeln soll, der zugehörige Transformator neben der Umspannung auf seiner Sekundärseite ein höherphasiges Wechselstromnetz, etwa ein sechsphasiges, zwölfphasiges oder noch höherphasiges System, herstellt. Erst dieses System wirkt mit den Ventilströcken des entsprechenden vielanodigen Gleichrichtergerätes oder des Systems von ebensovielen Einanodengeräten zusammen und die hieraus entstehenden Stromimpulse setzen sich erst aus dem Gleichstrom zusammen.

Da man bemüht ist, einen möglichst geglätteten Gleichstrom zu erhalten, was durch die Reaktanzen des Gleichstromverbrauchers oder durch durch eine besondere sog. Gleichstromdrossel begünstigt wird, muß man bei den ^{Wahl}Einsetzungsverhältnissen eines Transformators aber

-25-

in Kauf nehmen, daß seine primären Wechselströme nicht mehr rein sinusförmig, sondern treppenförmig abgesteckt sind, wobei die Zahl dieser Treppenstufen von der Vervielfachung der sekundären Phasenzahl abhängt. Je höher diese Phasenzahl ist, desto feiner sind die Schaltprozesse des Stromrichtergerätes abgesteckt und desto mehr nähert man sich der Forderung nach einer möglichst oberwellenfreien Gleichspannung bei gleichzeitig möglichst oberwellenfreien Wechselströmen auf der Drehstromseite. Ähnliches gilt für Wechselrichter und Umrichter.

Ein Stromrichtertransformator vereinigt in sich die Funktionen der Umspannung und der Phasentransformation. Für die schaltungsmäßige und konstruktive Entwicklung der Stromrichtertransformatoren sind indessen noch eine ganze Reihe weiterer Bedingungen zu erfüllen. Sie stehen zum Teil im Einklang miteinander, zum Teil widersprechen sie sich. Und dies ist der Grund für die Entwicklung einer außerordentlichen Fülle von Schaltungen, wobei die Möglichkeiten ihrer Weiterentwicklung noch nicht einmal abgeschlossen ist.

So soll z.B. bei einem Gleichrichter eine sog. Gleichspannungskennlinie über den ganzen Belastungsbereich möglichst gleichmäßig und flach verlaufen, der prozentuale Gleichspannungsabfall, der durch die Streureaktanzen des Transformators verursacht wird, soll also ^{nicht hoch} während der Kurzschlußspannung des Transformators wiederum nicht zu niedrig sein soll. Diese sich anscheinend widersprechenden Forderungen lassen sich nur durch Kunstschaltungen erfüllen, die auf eine Verlängerung der Anodenbrenndauer bzw. Verteilung des Gleichstroms auf mehrere gleichzeitig brennende Anoden des Stromrichtergerätes abzielen. Hierdurch läßt sich wiederum eine bessere Gefäßausnutzung, ein weiteres Auslaufen des jeweils verbleibenden

-26-

-26-

Anodenstromen erreichen. Eine weitere Forderung, die nicht leicht zu erfüllen ist, ist die Erzielung einer wirklichen mehrphasigen Symmetrie der Transformatorschaltung bei jeder Belastung, denn das mehrphasige Wicklungssystem muß aus einzelnen Teilwicklungen der drei ^{sech} Sementenkel des Transformators, die den drei Spannungs-
✓ Grundvektoren entsprechen, aufgebaut werden, und es ist nicht leicht, bei solchen Anordnungen eine allseitige Symmetrie der Streuverhältnisse der Wicklungen zu erreichen.

Die ältere Entwicklung der Stromrichtergefäße führte, wie bereits gesagt worden ist, zur Schaffung von Mehranodengefäßen mit gemeinsamer Kathode für alle Lichtbogenstrucken. Hierzu gehört zwangsläufig ein Transformator mit einem mehr oder weniger komplizierten Sekundärwicklungs-system mit einem Sternpunkt oder Nullpunkt, der für ^{den} einen Gleichrichter ^{den} seinen Minuspol bildet. Die Weiterentwicklung dieses Schaltungssystems für höhere Phasenzahlen von 12 oder 24 führte bei den Gefäßen zu grossen Lichtbogenlängen und bei den Transformator-konstruktionen zu komplizierten Wicklungsaufbauten mit schwer erreichbarer Mehrphasensymmetrie. Es ist nun bemerkenswert, daß die Umkehr zur Neuentwicklung von Einanodengefäßen, die ursprünglich nur auf die Erreichung kürzerer Lichtbogenlängen abzielte, auch die Transformator-Schaltungstechnik aufgelockert hat. Es wurde jetzt möglich, Mehrphasenschaltungen ohne Sternpunkt, sog. Polyanschaltungen, anzuwenden, die gerade solche Einanodengefäße erfordern und bei denen es keine Schwierigkeit mehr bereitet, selbst bei Phasenzahlen über 24 eine völlige Schaltungssymmetrie zu erreichen. Dazu haben sie die Eigenschaft, daß die erzielte Gleichspannung etwa gleich der Durchmesserspannung des Wicklungspolygons, also etwa doppelt so groß wie bei den sog. Sternschaltungen mit Nullpunkt

-27-

-27-

bei gleicher Teilwicklungsanzahl wird. Dafür ist es aber nicht ohne weiteres möglich, solche Schaltungen für mehrfache Anodenbeteiligung zu entwickeln. Sie sind also die gegebenen Schaltungen für Hochspannungsgleichrichter.

^{wichtig}
Die Vertreterin dieser Schaltungen in der Klasse der Sechshephasen-gleichrichters ist die sog. dreiphasige Graetzschaltung, die wir als ^{und} sechshephasige Brückenschaltung bezeichnen. Bei ihr beträgt die Brenndauer der Ventilströcke 120° bis 60° Zündfolge, wobei jede Ventilströcke den vollen Gleichstrom führt. Vergleichen wir damit die bekannte Sechshephasen-Sternschaltung in der Ausführung als Zweimal-Dreiphasen-Sternschaltung mit Saugtransformator, so haben wir bei ihr ebenfalls 120° Brenndauer der Ventilströcke bei 60° Zündfolge. Aber hier ist der Gleichstrom ständig auf je 2 Ventilströcke verteilt, während bei der Brückenschaltung jede Ventilströcke mit dem vollen Gleichstrom belastet ist. Dafür tritt aber an den Ventilströcken ^{der} bei Brückenschaltung keine höhere maximale Sperrspannung auf als bei der genannten Sternschaltung mit Saugtransformator, gleiche Wicklungsanzahl vorausgesetzt, obgleich ^{sie} ~~in~~ die etwa doppelte Gleichspannung liefert wie letztere.

Neben dem eigentlichen Haupttransformator, der oftmals ein System mehrerer Transformatoren ist, besteht die vollständige Stromrichterschaltung noch aus weiteren Bauteilen. So ist der Haupttransformator oft verknüpft mit einem Regeltransformator mit Stufenwechsler, der zur Einregelung der Gleichspannung dient, sofern der Haupttransformator nicht schon selbst mit Regelstufen ausgeführt ist. Bei Betrieb von Stromrichtergeräten mit der doppelten, dreifachen oder vierfachen Anodenzahl gegenüber der Phasenzahl der Transformatorschaltung können oftmals Stromteiler-Drosselspulen

-28-

-28-

zur Anwendung, die eine gleichzeitige Stromaufnahme der parallel geschalteten Anoden erzwingen wollen. Den gleichen Zweck erfüllt die Ausführung jeder sekundären Transformatorwicklung in mehreren Teilwicklungen, deren gegenseitige Streureaktansen diejenigen Ausgleichspannungen liefern, die die gleichzeitige Stromaufnahme der Anode erzwingen.

Damit verlassen wir dieses interessante Gebiet, um einige Worte über die notwendigen Hilfseinrichtungen einer vollständigen Stromrichteranlage zu sagen.

1. Hilfseinrichtungen einer Stromrichtereinheit.

In den Hilfseinrichtungen einer Stromrichtereinheit zählen zunächst die Vorstöße für die Zündung und Erregung des Lichtbogens des Stromrichtergefäßes sowie die Einrichtungen für die Gittersteuerung.

Unter Umständen können dazu noch Überwachungseinrichtungen für die Kühlung und für die Vakuumhaltung. Bei pumpenlosen Stromrichtern kommt diese in Fortfall.

Den größten Rahmen nehmen aber diejenigen Einrichtungen ein, die dem Zweck der selbsttätigen Regelung bestimmter Größen oder der Durchführung von Steuerprogrammen dienen und mit der Störungsüberwachung und mit der Automatisierung bestimmter Betriebsvorgänge zusammenhängen.

So einfach der Bau von Erregerschützen und Steuerschützen, insbesondere für die bedienungstechnisch einfachen pumpenlosen Stromrichter an sich ist, so vielgestaltig ist die Ausführung der Einrichtungen für die selbsttätigen Regelungen und verschiedenen Automatisierungen. Es ist unmöglich, im Rahmen dieser Schrift auch nur annähernd auf

-29-

-29-

alle die Probleme einzugehen, die hier zur Diskussion gestellt und mit den Mitteln der Relais- und Röhrentechnik in verschiedener Weise gelöst worden sind.

In- und für sich erfordert die Gittersteuerung die Übertragung kurzer Spannungsspitzen mit einer genügenden Flankensteilheit auf die Steuergitter, nur in Ausnahmefällen sind längere Steuerimpulse erforderlich. Außerhalb der Brenndauer der Anoden sind die Entladungsstrecken durch eine negative Gittervorspannung gesperrt zu halten.

Mit der Gittersteuerung werden alle Regelaufgaben der Stromrichter-technik gelöst, z.B. die Regelung der Spannung, des Stromes, der Leistung, der Drehzahl und der Frequenz. Mit Hilfe von Reglern, wie z.B. Kohle- oder Thyatronreglern, Thomasreglern oder dem trägheitslosen Elektronenröhren-Reglern und Stromtor- oder Thyatron-Reglern können gleichzeitig mehrere Einflüsse geregelt werden. Dabei ist es möglich, jede gewünschte Kennlinie auszuregeln.

Die Möglichkeit, Stromrichter mit Hilfe negativer Gitterspannung gesperrt zu halten, wird bei der Kurzwellenlöschung besonders ausgenutzt, die z.B. durch schnellwirkende Relais eingeleitet wird. Weitere Besonderheiten besprechen wir bei der folgenden Aufzählung verschiedener Stromrichteranlagen.

6. Ausführung von Stromrichteranlagen.

Wir halten uns bei der nachfolgenden Besprechung der besonderen Ausführungsmerkmale von Stromrichteranlagen an die im 2. Kapitel dieser Schrift gegebene Reihenfolge der Anwendungsgebiete.

1. Elektrische Bahnen.

Bei Anlagen für Bahnbetrieb ist zunächst die weitgehende Unabhän-

-30-

-30-

gigkeit des Wirkungsgrades eines Stromrichters von der Belastungshöhe ins Gewicht fallend, da gerade der Bahnbetrieb eine ständig wechselnde Belastung unter Einfluß von Überlastungsstößen bei dem Anfahren eines Zuges mit sich bringt. Gegen die Überlastungsstöße ist ein Stromrichter verhältnismäßig unempfindlich. Da aber auch erheblich häufiger mit Streckenschlüssen zu rechnen ist, sind als Streckenschalter sog. Schnellschalter vorzusehen, die ursprünglich für den Schutz von Eisenbahntransformern entwickelt worden sind, aber nun auch der wesentliche Bestandteil der Stromrichter geworden sind.

Schnellschalter sind besonders konstruierte Überstromschalter hoher Schaltleistung für Gleichstrom in einpoliger Ausführung, deren besonderes Merkmal, wie der Name schon andeutet, die hohe Schaltgeschwindigkeit ist. Ihre Aufgabe ist es, einen Gleichstromkurzschluß bereits in seinem ersten Entstehen abzuschalten, wozu Abschaltzeiten unterhalb $1/100$ s erforderlich sind, die Zeitdauer der Lichtbogenlöschung im Schalter mit eingerechnet. Die eigentliche Ansprechzeit bis zum Öffnen der Kontakte beträgt indessen nur etwa $1/1000$ s. Bei einigen Gleichstromanlagen mit Gittersteuerung wird der Überstromschutz durch einen solchen Schnellschalter häufig mit der vorhin erwähnten Gitterabschaltung kombiniert. Die Betätigung der Steuergitter durch Aufschaltung einer negativen Gittervorspannung erfolgt in dem Falle innerhalb der sehr kurzen Ansprechzeit des Schnellschalters vermittelt eines Hilfskontaktes. Die Kurzschlußschaltung durch Schnellschalter allein ist eine sehr plötzliche und deshalb oft mit der Entstehung hoher Überspannungen verbunden. Die Gitterabschaltung arbeitet demgegenüber weicher, setzt aber voraus, dass der Stromrichter im entscheidenden Falle tatsächlich steuerfähig ist.

-31-

-31-

Bei Parallelbetrieb mehrerer Gleichrichter werden meist sog. Rückstromschnellschalter verwendet, die bei eintretenden Rückfaltungen der dreiphasigen Gleichrichter gleichstromseitig abschalten. Bei gesteuerten Gleichrichtern kann man diese Rückstromschnellschalter wieder mit einer Gitterabschaltung der Rückfaltung kombinieren.

Rückfaltungen sind Störungserscheinungen, die zwar im Augenblick unangenehm sind, vor allem für die dynamische Beanspruchung des zugehörigen Transformators, und die eine ^{kurze} völlige Ausserbetriebsetzung des Gleichrichters notwendig machen. Sie verlaufen indes so für den Gleichrichter ^{hinführend} rasch ohne Hinterlassung von Spuren, man kann diesen praktisch in Bruchteilen einer Sekunde wieder in Betrieb nehmen.

Kommen wir nun zurück auf die weitere Besprechung der Bahn-Gleichrichteranlagen, so müssen wir zuerst hervorheben, dass auch gerade bei diesen die ^{oder geringe} ~~mögliche~~ Anfahrzeit der Stromrichter ins Gewicht fällt. Dazu kommt die Möglichkeit der teilweisen oder vollständigen Automatisierung solcher Anlagen. In einer wichtigen Teilaufgabe dieser Automatisierung gehört die selbsttätige Wiedereinschaltung der Gleichrichtereinspeisung bei Streckenrutschungen.

Bei Vollbahnen werden gelegentlich Wechselrichter den Gleichrichtern beigelegt, die zur Rücklieferung der Bremsenergie an das Drehstromnetz dienen, wie dies bei Gebirgsbahnen von Bedeutung sein kann.

Eine Gleichstromausregelung ist bei Bahn-Gleichrichtern ohne Bedeutung.

2. Industrie-Im-Antriebs.

Bei industriellen Antrieben steht die Möglichkeit und Notwendigkeit, Gleichstrommotoren verschiedener Schaltung nach verschiedenen Programmen zu regeln, im Vordergrund. Industrie-Im-Antriebe sind also ein weites Betätigungsfeld u. die Anwendung der Negeltechnik. Was hier

-32-

besonders ins Gewicht fällt, ist die partielle Trägheitslosigkeit und beträchtliche Genauigkeit der bei Stromrichter erzielbaren Regelungen.

Inbesondere werden Antriebe größerer Leistung, von denen ein hoher Drehzahlverbrauch oder häufiges Anfahren, ^{Arbeits- & Leerlauf} Stillstehen ^{Arbeits- & Leerlauf} oder ^{Arbeits- & Leerlauf} gefordert wird, vorteilhaft als sog. Stromrichter-Antrieb ausgeführt. Bei diesen Regelantrieben spricht ein gesteuert er Stromrichter den Ankerkreis eines Gleichstrom-Heben- oder Hubmotors, dessen Feldwicklung konstant erregt wird. Bei einem bestimmten Ankerstrom ist dann das Drehmoment des Antriebs konstant, während seine Drehzahl proportional der angesteuerten Gleichspannung ist. Durch Umschalten des Motorankers oder des Motorfeldes und Umsteuern des Stromrichters auf Wechselrichterbetrieb lässt sich der Antrieb bis zum Stillstand abbremzen und kann anschließend mit umgekehrter Drehrichtung hochgefahren werden.

Ein bemerkenswertes Beispiel für einen solchen Stromrichterantrieb ist die im Jahre 1937 erbaute Breitbandstrasse der Bundesisen-Walwerke Dinslaken. Die sechs Walzgerüste der Fertigstrasse dieser Anlage werden von 6 Gleichstrommotoren von je 200 kW Dauerleistung angetrieben, welche stossweise auf der Doppelseite überlastbar sind. Der Ankerkreis eines jeden Walzenzugmotors wird von einer Stromrichteranlage für 600 V, 3000 A Gleichstromleistung gespeist, welche durch Gittersteuerung geregelt wird. Die Feldwicklungen aller 6 Motoren liegen über Hebenschlussregler an einem gemeinsamen Erregernetz, das von einem Gleichrichter gespeist wird.

Die sechs Walzgerüste werden durch Regler der Stromrichterspannung über die Gittersteuerung aus dem Stillstand hochgefahren und können bei Störungen im Walzbetrieb einzeln oder gemeinsam über die Strom-

-33-

r unterliegen abgebrannt und ersetzt werden. Dazu wird der Ankerkreis des Motors durch einen druckluftbestätigten Trennschalter umgepolt, nachdem vorher durch Betätigung der Gittersperrung der Ankerstrom unterbrochen wurde. Im normalen Walzbetrieb sind die Stromrichter auf etwa 90% ihrer Spannung ausgenutzt. Die Feinregelung der Drehzahl der Walzgerüste erfolgt durch Feldänderung der Walzenzugmotoren mittels ihrer Nebenschlussregler. Die Gittersteuerung der Stromrichteranlagen wird zu einer Gegenkopplierung der Walzgerüste benutzt, welche abhängig von der Belastung des betreffenden Gerätes und der der übrigen Gerüste erfolgt. Es wird dadurch erreicht, dass die Drehzahl der einzelnen Gerüste während des Walzvorganges nur ganz wenig abfällt. Ausserdem besteht die Möglichkeit, bei zu grosser Schleifenbildung oder bei zu grossem Zug den Walzenmotor über zwei Druckknöpfe willkürlich in die Gittersteuerung eingreifen und einzelnen Motoren kurze Beschleunigungsstösse zu geben oder sie etwas zu verlangsamen. Für diese Eingriffe in die Steuerung ist die Spannungsreserve zwischen 90% und dem vollen Wert der Stromrichterspannung vorgesehen. Die Breitbandstrasse Dinslaken war von 1937 bis 1945 in Betrieb und der Stromrichterbetrieb hat sich in dieser Zeit gut bewährt.

Im Chemische Industrie.

Der Elektrolysebetrieb ist gekennzeichnet durch das Fahren der Gleichstromanlage in Dauerbetrieb bei genau eingereguliertem Gleichstrom. Es kommen aber dann vorzugsweise glattergesteuerte Gleichrichter mit selbsttätiger Konstantstromregelung in Betracht. Um den Regelbereich der Gittersteuerung in vernünftigen Grenzen zu halten, wird sie für gewöhnlich ergänzt durch eine grobstufige Regelung mittels eines Autotransformators, der dem Haupttransformator vorgeschaltet ist.

-34-

-34-

Da es sich bei Elektrolyseanlagen um die Aufbringung oft gewaltiger Leistungen handelt, die einen erheblichen Teil der Leistung der örtlichen Stromversorgung ausmachen, ist die Oberwellenfreiheit der netzseitigen Wechselströme oftmals von entscheidender Bedeutung. Mitarbeiter kommt es auf die Unterdrückung ganz bestimmter harmonischer der Ströme an, die erfordert, die Anlage für 12-phasigen, 24-phasigen und noch höherphasigen Betrieb auszuliegen. Bei Gruppen von Hochphasengleichlichtern erreicht man dies durch z.B. Verwendung von Transformatoren mit verschiedenen geschalteten Primärwicklungen oder durch Verwendung von Schwenktransformatoren, die die erforderlichen Winkeldrehungen um 30° oder 15° bewerkstelligen.

4. Senderstromversorgung.

Die Senderstromversorgung bedeutet ebenfalls kontinuierlichen Dauerbetrieb, jedoch bei gleichbleibender Gleichspannung. Wie bereits gesagt worden ist, beträgt die erforderliche Anodenspannung der Senderöhren bis 20 kV und darüber.

Ein besonderes Kennzeichen dieser Sendegeräte ist die Notwendigkeit einer Schutzeinrichtung gegen die häufig an den Senderöhren stattfindenden Überschläge, die für den Gleichlichter vorübergehende Kurzschlüsse bedeuten. Diese Einrichtung bewirkt eine kurzzeitige Sperrung des Gefäßes mit sofort nachfolgendem Hochregeln der Anodenspannung der Senderöhre, wobei der ganze Vorgang weniger als 1 Sekunde dauert, so dass er von den Manfredierern kaum oder nur als Ausfall einer Silbe oder eines kurzen Wortes wahrgenommen wird.

5. Das Blindleistungsproblem.

Es wird zu erwarten, dass keine nach nun die Besonderheiten der Stromlichteranlagen für alle weiteren Anwendungsgebiete aufzuführen. Statt-

-35-

desen soll noch eine allgemeine Frage der Gittersteuerung erörtert werden.

Sie bereits mehrfach gesagt worden ist, bedeutet die Gittersteuerung die Beeinflussung einer Kathodenstrecke in dem schon Stromlosen Zustand, in dem sie normalerweise bei Positivwerden der Anodenspannung ründen würde. Diese Beeinflussung kann bedeuten, den durch negative Gitterspannung verhinderten Stromausbruch willkürlich auf einen späteren Zeitpunkt zu verschieben oder vollständig zu unterdrücken. Ersteres kommt bei Röhren aller Art oder bei Wechselrichtern und Umrichtern zur Ermöglichung ihres Betriebes in Betracht, letzteres bei Schutz gegen Überströme oder sonstige Störungen, wie Rückzündungen oder Durchzündungen. Während bei Gleichrichteranlagen ein Versagen der Gittersteuerung nur eine Veränderung ihres Betriebszustandes nach sich zieht, bedeutet dies bei einem Wechselrichter ein Versagen der Kommutierung oder der Anodenablenkung, was einen drehstromartigen Kurzschluss zur Folge hat. Man spricht dann von einem Klappen des Wechselrichters.

Gleichviel was immer mit der Gittersteuerung beabsichtigt wird, gibt es Gründe, die technischen Möglichkeiten der Gittersteuerung nicht gedenken zu übersehen. Auch eine so einfache Gittersteuerung, etwa zur Spannungsregelung eines Gleichrichters, bedeutet eine Vereinfachung der schaltungstechnischen Auschnitte aus den Spannungsharwellen der drehstromseitigen Wechselspannungen. Dies bedeutet in der Regel eine Zunahme der Gleichspannungsabweichungen. Außerdem entsteht aber eine seitliche Verlagerung der Anodenströme und damit die gleiche Verlagerung der primären Netzströme. Ihre Grundursache erfährt eine Phasenverschiebung im nachteiligen Sinne, der Gleichrichter, nimmt Blindleistung aus dem Netz. Das ist ein Nachteil, denn bei gleichbleibendem Gleichstrom und herabgeglichener Gleichspannung mindert die

gleichstromseitig gelieferte Wirkleistung ab, während die Scheinleistung auf der Netzseite unverändert bleibt. Die Veränderung der Gleichstromleistung bedingt also die Entnahme von Blindleistung aus dem Netz.

Dies hat eine gewisse Ähnlichkeit mit der Eigenschaft der Wechselspannungsregelung mittels eines Drehstromtransformators, der ebenfalls eine Phasenverschiebung des Netzes vorzieht. Aber hier ist es möglich, je nach der Verschaltung des Drehstromtransformators eine nachlassende oder vorklassische Phasenverschiebung einzustellen, und durch Kombinieren zweier solcher Transformatoren ist es möglich, die Phasenverschiebung durch den einen mit der Phasenverschiebung durch den anderen zu kompensieren. Dies ist bei Stromrichtern unter normalen Bedingungen nicht möglich. Die Kennlinie der Anodenströme setzt voraus, dass die Anodenspannung der abblenden Anode positiv gegenüber der gerade transduzierenden Anode ist und das ist nur durch eine Schaltung der Gittersteuerung möglich.

Handwritten signature

Es sind nun allerdings Verfahren entwickelt worden, diese Wirkung anzunehmen und z.B. den Gleichrichter auch bei Zündvorstellung der Gittersteuerung aus dem Kommutieren seiner Anodenströme zu befreien.

Mit solchen Mitteln ist es möglich, Wechselrichter, die wegen ihrer besonderen Kommutierungsbedingungen, die schon normalerweise Zündvorstellungswinkel von etwa 40° voraussetzen, wobei diese sich blindleistungsmäßig genau so auswirken wie die Zündschelle auch bei Gleichstrom, mit kompensierter Blindleistung zu führen oder sogar zu steuern, dass eine induktive Blindleistung in das Drehstromnetz hineinfließt.

Mit diesen Einrichtungen der im Fluss befindlichen künftig zu weiterentwickeln, die auch besonders bei Anlagen für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung von Bedeutung ist, soll dieser Fixkurs in die

Technik der Stromerzeugung behandelt werden, und wir wollen nun noch einige Worte zur Messtechnik der Stromrichter sagen.

6. Stromrichter-Messtechnik.

Die Untersuchung und betriebsmäßige Überwachung einer Stromrichteranlage und ihrer Teile erfordert Messgeräte und Einrichtungen, wie sie die Messtechnik für allgemeine Anwendungszwecke im grossen Masse bereits entwickelt hat. Hierzu rechnen neben Spannungs- und Strommesser und Leistungsmesser der Schleifmesssillograph und der praktisch unentbehrliche Elektronenstrahlmesssillograph. Ausserdem gibt es seltener angewendete Messgeräte, die bereits fertig entwickelt sind und für Stromrichteranlagen gelegentlich von Bedeutung sein können. Solche sind z.B. die Geräte zur Messung des Oberwellenanteils von Spannungen oder Strömen bzw. zur Messung von Spannungsharmonischen bestimmter Ordnung. Ferner gibt es Geräte, die schon mehr unmittelbaren Anwendungen für Stromrichter entsprechen, wie z.B. der Gleichstromwandler, ein Stromwandler mit zwei Eisenternen mit anormalem Magnetisierungskern, der die Übertragung auch der Gleichstromkomponente eines Stromes gestattet.

Messeinrichtungen, die indessen schon ausschliesslich für die Bedürfnisse der Stromrichterüberwachung entwickelt und in verschiedenen Ausführungsformen gebaut worden sind, sind die Vakuummeter. Sie sind nicht nur als direktanzeigende Messgeräte, sondern auch als signalisierende Apparate ausgebildet worden. Mit dem Aufkommen der pumpenlosen Stromrichtergerätee, die keine Vakuummeter benötigen, hat das Interesse an diesen Geräten nachgelassen.

Mehr noch als die Höhe des Vakuums ist jedoch die Brennspannung des Lichtbogens des in Betrieb befindlichen Stromrichters für die Beurteilung eines gesunden Arbeitszustandes ausschlaggebend. Es ist daher notwendig, Messgeräte zur Messung der Brennspannung zu entwickeln.

-36-

eines gewissen Arbeitszustandes ausschlaggebend. Es ist daher notwendig, Messgeräte zu entwickeln, die die Brennspannung unmittelbar zur Anzeige bringen. Dies gilt namentlich für punktenlose Strahlrichter erüsse, die mit dem Fortfall des Vakuummeters keinerlei Kontrollinstrument für ihre innere Beschaffenheit mehr haben.

Bisher war man gezwungen, die Brennspannung wattmetrisch zu bestimmen, was wegen des Eingriffs in die Strahlbahnen mittels Spezialwandlern und aus weiteren Gründen umständlich ist und nur im Prüfland vertretbar ist, ganz abgesehen davon, dass sich die Brennspannung erst aus einer Division einer Wattmeterablesung durch eine Strommesserablesung ergibt.

Es sind bereits Methoden vorgeschlagen worden, die eine rein spannungs-mässige Messung der Brennspannung in Verbindung mit einem direktzigen Messinstrument ermöglichen. Sie beruhen auf der zweckdienlichen Anwendung gesenkter Kathoden, die aus der Spannung zwischen Anode und Kathode, die während der Lichtbogenbrenndauer die Brennspannung, im übrigen aber eine gleichmässige teils positive, teils negative Spannung vorstellt, gerade die Brennspannung herauszuschneiden. Indessen muss diese messtechnische Herauslösung der Brennspannung nicht über ihre ganze, im allgemeinen veränderliche Brenndauer erfolgen, sondern über eine feste Zeit, die ein ganzsätzlicher Bruchteil der Periode ist, denn nur dann ist das Messinstrument mit Vollbeträgen der Brennspannung fest sichtbar. Daneben gilt es, die unter Umständen sehr hohe Sperrspannung während der Leuchtdauer des Messgerät fernzuschalten, ohne die Messgenauigkeit der Naformordnung zu beeinträchtigen.

Bei einem derartigen Gerät macht es keine Schwierigkeiten, anormale Veränderungen der Brennspannung zur unmittelbaren Störungsanzeige aus-

-36-

zunutzen. Im ubrigen ist es angebracht, das Brennspannungsfoltneter selbst genau fest innerhalb des Bedienungsgebietes der Anlage zu installieren wie die ublichen Strom- und Spannungsmesser fur die ausseren Betriebsbedingungen der Anlage.

3. Orientierende Arbeiten fur die Planung einer Stromrichterfabrik.

Es soll nun erschieden ein Plan fur die unter den gegenwartigen Verhaltnissen gebotene und mogliche Fertigung von pumpenlosen Stromrichtergeraten mittlerer Leistung erstellt werden.

Ein Programm fur die in den nachsten Zukunft zu erwartenden Gefalldentwicklung ist auf der nachfolgenden Tabelle zusammenge stellt. Die darin aufgefuhrtten Positionen sind bereits wahrend des Krieges bei der WEG und bei SVE in Entwicklung begriffen gewesen oder bereits zu einem gewissen Abschluss gekommen. Da uberdies wurden in den letzten Jahren Versuche zur Steigerung der Gefalldleistung angestellt auf Grund von Ueberlegungen, zu deren Verwirklichung es wahrend des Krieges nicht mehr gekommen ist.

Hier ist vor allen Dingen die Entwicklung von vakuumisolierten Elektrodendurchfuhrungen zu nennen, bei denen auf die Verwendung legierter Stahle verzichtet werden kann. Ferner erwhnen wir die Entwicklung einer quecksilberarmen Kathode, bei der die Verinsparung und damit die Beanspruchung der Kondensationsflachen auf einen Bruchteil der sonst zu erwartenden reduziert werden kann.

-40-

Programm für die Gefährdungsentwicklung.

Pos.	Bezeichnung	Typen - leistung	Anwendungsgebiet
a)	Einanoder pumpenlos, wassergekühlt	6er Satz 800 V 3000 A 1500 V 2000 A 3000 V 1000 A	Elektrolyse, elektrische Bahnen
b)	Sechsanoder pumpenlos, luftgekühlt	00 V 600 A	Elektrische Bah- nen, Antirische
c)	Sechsanoder pumpenlos, luftgekühlt	800 V 1500 A 1500 V 800 A 3000 V 500 A	.
d)	Sechsanoder für Hochspannung pumpenlos, luftgekühlt	12000 V 100 A 24000 V 50 A	Sendeanlage
e)	Einanoder f. Hochspannung pumpenlos, wassergekühlt	6er Satz 10000 V 600 A	Lichtbogenofen
f)	Kleine Einanodengefäße für Schweißwerke		
g)	Ignitrongefäße	6er Satz 400 V 1000 A 400 V 2000 A max	Industrienetz Schweiß...

-41-

-41-

Für die Produktionskapazität des Stromrichterwerkes wird die Annahme gemacht, dass im Jahr

200 Stromrichter je 1000 - 1 200 MW

gefertigt werden.

In jedem Stromrichter gehören die Hilfsbetriebe, das sind die Einrichtungen für Fütterung, Erregung, Sinterstromerzeugung, und Kühlung.

Die übrigen zu einer Stromrichteranlage erforderlichen Apparate und Geräte werden von anderen Werken geliefert.

(Die beiliegende Anlage zeigt die zur Fertigung vorgesehenen Stromrichtertypen.)

Für die Planung wird die vereinfachende Annahme gemacht, dass nur unpaarlose stromrichterbauelemente gebaut werden. Die Möglichkeit, verschiedene Stromrichtertypen zu fertigen, wurde durch Zuschläge von 1-20% zu den Zahlen für Arbeitsstunden, Material, Montage- und Werkeinrichtung berücksichtigt. Die Zahlen wurden durch Erfahrungswerte aus früher existierenden Stromrichterwerken gewonnen.

1. Arbeitskräfte

Aus den Fertigungszeiten für einen Stromrichter und dem Jahresfertigungsprogramm wurde der Bedarf an Arbeitskräften festgestellt. Dabei wurde, mit Rücksicht auf die hohe Zahl von Fachkräften nur Zweischichtbetrieb angenommen. Danach ergibt sich eine Werkbelegschaft von

20 Ingenieuren,
40 Technikern
40 Angelernten
60 Facharbeitern
150 angelernten Arbeitern

SUMME..... 310 Mann.

-42-

-42-

2. Werkzeuginrichtungen

Das Fertigungsprogramm erfordert die Einrichtung von Schweißerei, Dreherei, Fräseerei, Bohrererei, Werkzeugwand Vorrichtungsbau, Schweiserei, Schleiferei, Lötlerei, Strahlerei, Waschräume, Ofenraum, Montagewerkstatt, Wägelerei, Prüfstelle, Betriebswerkstatt, Materialprüfstelle und Labordaten.

Der Geldaufwand dafür ist:

Maschinen	250.000,—
Spezialeinrichtungen	185.000,—
Prüfzeileinrichtungen	300.000,—
Werkzeuge, Transport- geräte, Schaltungsein- richtungen usw..	<u>265.000,—</u>
	<u>1.050.000,—</u>

3. Ausbaubedarf

Fertigungsprogramm und Werkzeuginrichtung verlangen Fabrikationsräume von ca. 2.000 qm (einer Lager), das in ein Drittel im Erdgeschoss in einer lichten Höhe von 5-6 m, der Rest in einer Höhe von 4-5 m. Es wird damit gerechnet, dass vorhandene Fabrikräume zu einem hohen Preis gemietet werden können.

4. Materialbedarf

Für 200 Strahlrichter ergibt sich ungefähr folgender Materialbedarf:

140 to Eisen, und zwar Tiefzieh-, Feinblech, Mittelblech, Grobblech, Flachblech, Wandblech.

10 to nahtloses Stahlrohr

6 to Gußeisen

5 to Elektroden, Graphit

-43-

-44-

§ to verschiedene Einzelteile

15 kg Molybdän

Basiskonzepte: Halbfabrikate aus Porzellan, Quarz, Frequenz,
Steatit, Hartpapier

Fertigfabrikate, wie Kleintransformator, a,
Bronchien, Schalter, Relais,
Instrumente, Frequenzrichter,
Widerstände, Kondensatoren.

5. Rentabilitätsberechnung:

a) Einnahmen:

	DM	RM
200 Stromrichter je RM 20.000,--		4.000.000,--

b) Ausgaben:

Gehälter und Löhne	1.710.000,--
Fertigungsmaterial	1.054.000,--
Verbrauchsmaterial	600.000,--
Miete	60.000,--

Investierungen:

Werkzeuggestaltung	1.050.000,--
Werkzeuinstitution	150.000,--
Anlaufkosten	500.000,--
Sicherheitsausgang	180.000,--
	1.880.000,--

20% Amortisation	396.000,--	3.850.000,--
------------------	------------	--------------

e) Fabrikationsgewinn 3,5%	150.000,--
----------------------------	------------