

Elektrische Stromrichter

(Gleichrichter)

Theorie, Herstellung und Anwendung

Von

Gustav W. Müller-Uhlenhoff

Oberingenieur



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Mit 272 Abbildungen

ISBN 978-3-663-00471-4

ISBN 978-3-663-02384-5 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-02384-5

Alle Rechte vorbehalten

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1940

Vorwort

Dieses Buch enthält eine Zusammenstellung aller Stromrichterarten. In einzelnen Abschnitten wird die Wirkungsweise und Herstellung der Stromrichter sowie die Planung und Errichtung vollständiger Anlagen erläutert.

In meinem älteren Buche „*Gustav W. Müller*, Quecksilberdampf-Gleichrichter“, Verlag Norden G. m. b. H., das 1924 und 1927 in zwei Auflagen erschien, habe ich lediglich Glasgleichrichter erläutert, daher hoffe ich, daß dies neue, wesentlich erweiterte Werk einen noch größeren Leserkreis finden wird, denn es ist leicht verständlich gehalten und wird Ingenieuren, Betriebsleitern und Studierenden ein Nachschlagewerk sein. —

Beim Lesen des vorliegenden Schrifttums läßt sich die Feststellung machen, daß aus der neuesten Zeit außerordentlich zahlreiche Untersuchungen und Abhandlungen über die Vorgänge in den Stromrichtern vorliegen, was auf eine rege Anteilnahme der gesamten Wissenschaft an der Stromrichtertechnik schließen läßt, aber auch auf eine äußerst starke Marktausweitung der letzten Jahre, denn erst hierdurch konnten größere Mittel zu Forschungszwecken zur Verfügung gestellt werden. Die Dringlichkeit dieser Forschungsarbeiten beweist uns die Vergangenheit, denn das Zusammenwirken von Gleich- und Wechselstrom bei den Stromrichtern (Gleichrichtern) sowie die Einflüsse der von der Sinusform oft stark abweichenden Strom- und Spannungskurven bedeuteten für den Elektrotechniker in den Anfängen der Gleichrichterentwicklung immerhin einige Schwierigkeiten in der genauen Ermittlung praktisch verwendbarer Größen. Wenn daher die früher oft durch teils empirische Verfahren erfolgte Bestimmung der elektrischen Größen für die Bewertung der Transformatoren und Drosselspulen im Laufe der Jahre einer exakteren Methode auf mathematischer Grundlage Platz machte, so ist dies das Ergebnis einer intensiven Forschung zahlreicher Fachkräfte, die in der vorliegenden Schrift an den zweckentsprechenden Stellen erwähnt sind. Doch nicht auf der gleichen Grundlage erfaßbar sind uns bis heute die physikalischen Vorgänge im Innern der Gleichrichtergefäße. So besteht beispielsweise noch keine einheitliche Auffassung über die günstigste Höhe des Quecksilberdampfdrucks in den einzelnen Innenteilen, wie Anodenraum und Kühlraum, sowie den Druck bei den einzelnen Arbeitsphasen. Ferner erkennen wir kein einheitliches Vorgehen in der Frage der Materialauswahl, der Kühlmethode oder der Kühlmittel, ferner der Bearbeitung, Prüfung, Reinigung, Bearbeitungstemperatur, Form-

gebung, Evakuierung u. a. So bestehen im Stromrichterbau neben den durch exakte Rechnung genau erfaßbaren Größen mehrere unbekannte Einflüsse, die im Laufe der Jahre durch intensive Forschung wohl immer mehr gesetzmäßig erfaßt werden; in der Gegenwart jedoch ist der Konstrukteur teilweise noch stärker auf Erfahrungswerte angewiesen, wie in vielen Spezialgebieten der Technik.

Diese Zweiteilung der Stromrichtertechnik in mathematisch erfaßbare Größen und einen großen Anteil der Erfahrungswissenschaft gibt dem Schrifttum sein Gepräge. In dieser Schrift ist daher, unterstützt durch eigene langjährige Erfahrungen des Verfassers im Bau von Stromrichtern und Stromrichteranlagen, eine weitgehende Einordnung von Werten der Erfahrungswissenschaften angestrebt worden. Die mathematischen Größen wurden aus dem bekannten Schrifttum übernommen und auf deren Ableitung zugunsten einer eingehenderen Beschreibung einzelner Einrichtungen und Vorgänge verzichtet. In einem kleineren Abschnitt sind Trockengleichrichter und andere Sonderausführungen erläutert. Den gittergesteuerten Stromrichtern wurde jedoch ein größerer Abschnitt gewidmet, mit Hinsicht auf die große Bedeutung dieses neuesten Fortschrittes im Stromrichterbau. Hierbei wurden auch Konstruktionen gestreift, die das Versuchsstadium noch nicht verlassen haben, doch sollten sie in der Gesamtbetrachtung der Stromrichtertechnik nicht fehlen, zumal da mit der Wahrscheinlichkeit zu rechnen ist, daß die eine oder andere Ausführungsform gesteuerter Stromrichter bald Einzug in die Praxis halten wird.

Soweit es möglich war, wurden die Fabrikate der in- und ausländischen Herstellerfirmen berücksichtigt. Durch die Verwendung vorhandener Druckstöcke und Abbildungen konnten die Bezugszeichen der Schaltungen und Formeln nicht immer einheitlich gewählt werden. Daher wurden die Bilder teilweise mit ausführlichen Legenden versehen, wodurch das Lesen erleichtert ist. Für die Bemessung des Vakuums wurde nach dem Physiker *Torricelli* die heute übliche Bezeichnung „Torr“ gewählt, $1 \text{ Torr} = 1 \text{ mm}$ Quecksilbersäule Druck. Die Angaben im Schrifttum über die Druckhöhe sind besonders für das Zwischenvakuum nicht einheitlich, so werden von *Marti*, *Winograd* und *Gramisch*, Verlag Oldenbourg, Berlin 1933, auf S. 205, entsprechend S. 134 des vorliegenden Buches, für dessen Druck Werte von 0,01—20 Torr angegeben, je nach der Art der verwendeten Pumpen.

Ich bedanke mich an dieser Stelle nochmals bei den Firmen, die mich durch Übersendung von Bildmaterial und Überlassung von Druckstöcken unterstützten.

G. W. Müller-Uhlenhoff, Berlin-Charlottenburg 2

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Allgemeine Betrachtungen	1
1. Die Wirkungsweise der Stromrichtergefäße (Gleichrichtergefäße)	3
a) Die Ventilwirkung der Hochvakuumgleichrichterröhren	4
b) Die Glühkathodenröhren mit Gas- oder Dampffüllung	6
c) Die Ventilwirkung der mit Gas oder Dampf gefüllten Glühkathodenröhren	6
d) Die Ventilwirkung der Hg-Stromrichtergefäße mit flüssiger Kathode	8
e) Der Stromverlauf im zweianodigen Wechselstromgleichrichter	10
f) Der Stromverlauf im Dreiphasengleichrichter	13
g) Der Stromverlauf in Sechs- und Zwölfphasengleichrichtern	15
2. Die Konstruktion und Herstellung der Stromrichtergefäße	17
a) Glas als Baustoff für Röhren und Entladungsgefäße	17
b) Die metallische Stromeinführung in Glasgefäße	19
c) Die metallische Stromeinführung in metallische Stromrichtergefäße mit einem Isolierstoff als Zwischenglied	25
d) Die Stromrichtergefäße aus Glas mit flüssiger Kathode (Quecksilberdampf-Glasgleichrichtergefäße)	29
e) Das Evakuieren oder Entgasen	30
f) Die Vakuumprüfung der Glasgefäße	32
g) Fertige Glasgefäße mit Hg-Kathode	33
3. Die Zündung und Erregung der Stromrichter	35
a) Die Erregung der Stromrichtergefäße	36
b) Die Ausführung der Erregerdrosselpulen	39
c) Die Erregerspannung und Erregerverluste	39
d) Die Zündeinrichtungen	41
e) Die Kippzündung bei feststehender Zündanode	42
f) Die beweglichen Zündanoden	42
g) Die Bimetallzündung	46
h) Die Kontraktionszündung	46
i) Die Resonanzzündung	47
k) Die Hochspannungszündung	47
l) Die Zündung des Argongleichrichters	48

	Seite
m) Die Ingnitronzündung	49
n) Die Spritzzündung.	50
4. Die Glühkathodenstromrichtergefäße	50
a) Die verschiedenen Glühkathoden	51
1. Die direkt geheizte Kathode	52
2. Die indirekt geheizte Kathode	52
b) Die Herstellung der Glühkathodenröhren	53
c) Die Anheizzeit der Glühkathodenstromrichtergefäße.	59
5. Die Belastungsgrenzen, Rückzündungen, die technischen Eigenschaften und Form der Stromrichtergefäße mit Quecksilberkathode, die Vorgänge im Lichtbogen	60
a) Die Rückzündungen, Rückströme und Rückzündungsgrenzen	60
b) Die Rückströme und die Ursache der Rückzündungen	62
c) Die Form der Stromrichtergefäße	67
d) Die Anodenarmform der Glasgefäße	68
e) Die Dampfströmung	69
f) Die Messung der Lichtbogen­spannung (Lichtbogenverlust)	69
g) Die Leistungssteigerung der Glasgleichrichter	71
h) Der Kathodenfall	72
i) Die Fixierung des Kathodenfleckes	74
k) Die Vorgänge im Lichtbogen	74
1. Die freie Weglänge	75
2. Die Voltgeschwindigkeit	76
3. Die Anregungsspannung	76
4. Die Ionisierungsspannung	76
5. Die Leuchterscheinung.	77
6. Die Lichtsäule	77
7. Die Anodenschutz­rohre der Eisgleichrichter	77
8. Der Anodenfall	77
l) Das Anodenmaterial	78
m) Das Quecksilber (Hg)	78
6. Die Überlastungsfähigkeit, die Kurzschlußfestigkeit und der Überlastungs­schutz der Hg-Stromrichtergefäße	80
a) Versuchsergebnisse und Messung der Überlastbarkeit	80
b) Die Gefäßtemperatur	82
c) Die Kurzschlußfestigkeit der Gleichrichtergefäße und ihre Abschaltung beim Kurzschluß.	84

	Seite
7. Die Lebensdauer der Stromrichtergefäße	85
a) Die Alterung der Glasgefäße	86
b) Die Einwirkung von Fremdgasen auf den Lichtbogenverlust . . .	86
8. Die Kühlung der Stromrichtergefäße	88
a) Die künstliche Kühlung der Hg-Dampfglasgefäße	88
b) Die Kühlluftmenge	90
c) Die geführte Luftkühlung der Gefäße	91
d) Die ölgekühlten Gleichrichter	92
e) Die kombinierte Luft- und Flüssigkeitskühlung	93
f) Die Kühlung der Eisengleichrichter mit Preßdichtungen	96
g) Die luftgekühlten Eisengleichrichter	97
h) Die Kühlung pumpenloser Eisengleichrichter	97
i) Die Strömung von ionisierten Wasserstoffatomen durch Eisen bei verschiedenen Kühlmitteln	98
9. Der Bau der Stromrichter und Hilfsapparate	100
a) Der Bau der Glasstromrichter	101
b) Die Bauteile der Glasstromrichter und ihre Schaltungen	104
1. Die Anodendrosselspulen	106
2. Stromteiler im Anodenkreis	109
3. Die Glättungsdrosselspule	112
4. Die Speisung und Regulierung der Kühlventilatoren der Strom- richter	114
5. Die Gefäßvorheizung	116
6. Die Anodensicherungen	116
7. Die Sicherungen im Gleichstromkreis	116
8. Die Wechsel- und Gleichstromschalter	117
9. Die Ventilatormotore	117
10. Der Schutz der Stromrichter beim Versagen der Kühlventilatoren	117
c) Die selbsttätige Zu- und Abschaltung mehrerer Gleichrichter unter- einander	118
d) Die Regulierung der Stromrichterspannung (Gleichrichter)	119
1. Die Gitterregulierung	120
e) Die Konstruktion der Eisenstromrichter mit Vakuumpumpen und Wasserkühlung	125
1. Die Anodenschutzrohre und Führungsbleche	129
2. Die Steuergitter	130
3. Die Kathoden	131
4. Die Vakuumpumpen	132
5. Die Vakuummeßeinrichtung	136
6. Das Ausheizen der Vakuumgefäße und die Prüfung des Vakuums	137

	Seite
f) Die Überlastungsfähigkeit der Eisengleichrichter	138
g) Die Erhaltung der Luftleere der mit Vakuumpumpen ausgerüsteten Eisengleichrichter	139
h) Die Dichtigkeitsprüfung der Eisengleichrichter	139
i) Die pumpenlosen Eisengleichrichter	140
k) Die Vakuumhaltung bei pumpenlosen Eisengefäßen während des Betriebes	140
l) Ausgeführte pumpenlose Stromrichter	143
m) Die wassergekühlten Eisengleichrichter von Philips-Rectron.	144
10. Stromrichter ohne Entladungsgefäße	146
a) Der mechanische Stromrichter	146
b) Der mechanische Gleichrichter mit schwingendem Quecksilberstrahl	146
c) Der mechanische Hochspannungsgleichrichter	147
d) Die Elektrolytgleichrichter	147
e) Die Trockengleichrichter	148
1. Die technischen Daten der Trockengleichrichter	150
2. Die Konstruktion und Schaltung der Trockengleichrichter	152
3. Die Verwendungsgrenze der Trockengleichrichter	155
4. Die Berechnung der Trockengleichrichter	156
f) Die Hochspannungsgleichrichter	157
g) Die Lichtbogengleichrichter von <i>Marx</i>	158
h) Die Glimmgleichrichter	159
11. Stromrichter mit Steuergittern	159
a) Die Steuerung der reinen Elektronenröhren (Hochvakuumröhren) 160	160
b) Die Steuerung dampf- oder gasgefüllter Stromrichtergefäße	161
c) Die physikalischen Vorgänge während der Steuerung mit Gleichstromanodenspannung	162
d) Die Steuerung bei Gitter- und Anodenwechselspannung (gittergesteuerte Gleichrichter)	165
1. Die Gitterregelmöglichkeiten	165
2. Die Gitterregulierung durch Drehregler.	165
3. Die Energieverhältnisse	166
4. Die Gitterregelung mit Wechselstrom einer fest eingestellten Phasenlage und einer überlagerten regelbaren Gleichspannung 167	167
5. Die steil ansteigende Gitterspannung.	168
6. Der Phasendreher und die steile Gitterspannung	168
7. Die elektromechanische Stoßsteuerung mit synchron umlaufendem Zündverteiler	169
8. Die magnetische Stoßsteuerung	171
9. Die Zündkennliniensteuerung	173

	Seite
10. Die Stoßsteuerung mit einem regelbaren Wechselstrom und in Reihe geschaltetem Steuerkreisgleichrichter	174
11. Die Dämpfungssteuerung	174
e) Die historische Entwicklung der Gittersteuerung	176
f) Die Löschung einer Lichtbogenentladung zur Leistungsfaktorverbesserung	179
g) Die Wirkungsweise und Schaltungen der Wechselrichter	180
1. Der fremderregte Wechselrichter	180
2. Der selbsterregte oder freie Wechselrichter	181
3. Die Speicherwechselrichter	182
4. Die netzgeführten oder netzerregten Wechselrichter	183
5. Die Kommutierung beim Wechselrichter	184
6. Die Berücksichtigung der Entionisierungszeit in der Lichtbogenbahn	186
7. Der Leistungsfaktor und Wirkungsgrad der Wechselrichter	187
8. Der Blindleistungswechselrichter	187
h) Der Leistungsaustausch in beiden Stromrichtungen mit zwei Stromrichtergefäßen	188
1. Die Umkehrbetriebe	190
2. Die Vernichtung der Rückströme und Überspannungen in Gleichrichteranlagen für Motorbetriebe	192
3. Die Widerstandschaltung mit einem Spannungswächter	192
4. Der Bremswiderstand mit einer Relaisröhre	193
5. Wechselrichter zur Aufnahme der Rückströme	193
i) Die Umrichter	194
1. Die Gleichstromumrichter (Gleichstromumspanner)	194
2. Die Wechselstromumrichter	195
3. Umrichter für 50-Hz-Drehstrom- und $16\frac{2}{3}$ -Hz-Wechselstromnetze	195
4. Die starren und elastischen Umrichter	197
5. Elastische Umrichter durch Gitterregelung	197
6. Die Zweispannungs- und Doppelumrichter	199
k) Die Stromrichter zum Leistungsaustausch zwischen Wechsel- und Gleichstromnetzen	200
l) Gittergesteuerte Gleichrichter zum Betriebe von Gleichstrommotoren	201
m) Regelbare Wechselstrommotore mit Stromrichtern	203
n) Das Schalten von Stromkreisen mit gittergesteuerten Stromrichtern	204
1. Der Schaltvorgang bei gittergesteuerten Stromrichtergefäßen in Gleichstromnetzen	204
2. Das Schalten von Stromkreisen mit einer Photozelle	204
3. Das Schalten von Schweißvorgängen mit gittergesteuerten Zeitschaltern	206
4. Die Punktnahtschweißung	207

	Seite
5. Sicherheitsschaltungen für schwache mechanische Ansprechenergien	208
6. Stromrichter für Werkstoffprüfung	209
o) Feinregulierung für konstante Gleichspannung	210
p) Einige besondere Verwendungsgebiete gittergesteuerter Stromrichter	210
12. Die technischen Einzelheiten der Stromrichter	211
a) Die Schaltungen der Gleichrichterumspanner	212
b) Die Kommutierung unter Berücksichtigung der Selbstinduktion	215
c) Der Spannungsabfall in Stromrichteranlagen	217
d) Der Gleichrichterkurzschluß	218
e) Schaltungen für einen großen Brennwinkel der Anodenströme	218
f) Die Saugdrosselspule	219
g) Die Berechnung der Gleichrichterumspanner	221
h) Die Anodendrosselspulen	224
i) Regelgrenzen für Gleichrichter mit Spannungsregulierung	225
k) Die Berechnung der Sparumspanner	226
l) Die Berührungsspannung an Stromrichtergefäßen	226
m) Der Leistungsfaktor	227
1. Der Verzerrungsfaktor, die Oberwellen und ihr Einfluß auf das Drehstromnetz	228
2. Der Leistungsfaktor gittergesteuerter Gleichrichter	230
3. Die gemischte Stufen- und Gitterregulierung zur Leistungsverbesserung	231
n) Die Glättungsdrosselspulen und Entstörung der Gleichrichter	232
1. Die Spannungskurven der Gleichstromkreise bei gitterregulierten Gleichrichtern und die Glättungsdrosselspule	233
2. Die Entstörung der Gleichrichter	234
3. Die Glättungseinrichtungen	235
o) Der Wirkungsgrad der Stromrichter	237
13. Die Anwendungsgebiete und Planung von Stromrichteranlagen, Schaltungen, Schaltanlagen und Schaltapparaten	240
a) Die Planung	241
b) Kleinere Stromrichter und Gleichrichter für Batterieladung (Trocken-, Glühkathoden-, Hg-Dampfgleichrichter)	242
1. Der Ladevorgang während der selbsttätigen Ladung	243
2. Das Laden einer großen Anzahl Batterien in Fuhrparkanlagen	243
3. Die verkürzte Ladezeit durch umschaltbare Ladestromspulen	244
4. Das Laden großer Batterien	245
5. Die Ladegleichrichter zum Laden von Netzbatterien	246

	Seite
c) Gleichrichter für Pufferbetrieb	247
d) Gleichrichter für Projektionslampen	248
e) Stromrichteranlagen für Licht-, Kraft-, Bahnnetze und elektro- lytische Anlagen	248
f) Die Kühlluftführung in den Gleichrichterräumen	249
g) Die Wasserkühlung der Stromrichter (Eisengleichrichter)	250
1. Die Frischwasserdurchlaufkühlung	250
2. Allgemeine Erklärung der Härtegrade	250
3. Die Temperaturregler	251
4. Die mittelbare Umlaufkühlung mit Gegenstromrückkühlern	251
5. Gemischte Frischwasser- und Umlaufkühlung	252
h) Die Hoch- und Niederspannungsschaltanlagen für Glas- und Eisen- stromrichter	253
i) Die Gleichstromselbstschalter	253
k) Die Schnellschalter und Rückstromschnellschalter	253
1. Die Kurzschlußabschaltung durch Steuergitter	255
2. Das Schnellrelais für kurzzeitige Unterbrechung	255
l) Die Spannungsteilung in Gleichstromdreileiteranlagen beim Gleichrichterbetrieb	257
1. Die Wirkungsgradbeeinflussung durch Spannungsteiler	257
2. Selbsttätig arbeitende Spannungsteiler	258
m) Selbsttätige und ferngesteuerte Gleichrichterzentralen (Unter- werke)	259
1. Die ferngesteuerten Gleichrichterunterwerke	259
2. Die halbselbsttätigen Unterwerke	260
3. Selbsttätige Gleichrichterunterwerke	261
n) Die Streckenspeisung und selbsttätige Bahnspeiser	265
o) Selbsttätige Streckenspeiser für Lichtnetze und das Einschalten kalter Netze	268
14. Ausgeführte Anlagen und Schluß des Buches	270
Namenverzeichnis	278
Sachverzeichnis	280

Allgemeine Betrachtungen

Die Stromrichter sind ruhende Umformer. Mit Ausnahme einiger, in diesem Buch beschriebener Abarten, werden für Stromrichter sogenannte Entladungsgefäße verwendet. Dies sind von der äußeren Atmosphäre abgeschlossene, aus Glas oder Eisen bestehende, evakuierte Behälter mit eingefügten Elektroden. Die Stromzuführung wird Anode und die Stromableitung Kathode genannt. Erstere bestehen aus Graphit oder schwer verdampfbarem Metall und letztere aus Glühkörpern oder Quecksilber, auf dessen Oberfläche der Fußpunkt des Lichtbogens in Form helleuchtender Kathodenflecke entsteht. Das Innere der evakuierten Gefäße wird, mit Ausnahme der sogenannten Hochvakuumröhren, durch Edelgase oder Metaldämpfe angefüllt.

Die Einführung der Steuergitter in die Entladungsgefäße hat ihre Verwendungsmöglichkeit außerordentlich erweitert. Da der heute stark verbreitete Gleichrichter nur eine der zahlreichen Verwendungsmöglichkeiten der Entladungsgefäße darstellt, mußten neue Bezeichnungen eingeführt werden, für die man in Deutschland nach einem Vorschlag von Professor *Wechmann*¹⁾ als Sammelbegriff das Wort Stromrichter wählte. Im internationalen Schrifttum wird vielfach die Bezeichnung Mutator²⁾ benutzt.

Es bestehen folgende Stromrichterarten:

- a) Gleichrichter zum Umformen von Wechsel- oder Drehstrom in Gleichstrom.
- b) Wechselrichter zum Erzeugen von Wechselstrom aus Gleichstrom.
- c) Wechselstromumrichter zum Erzeugen eines Wechselstromes einer bestimmten Phasenzahl und Frequenz aus einem Wechselstrom anderer Frequenz und Phasenzahl (z. B. $16^{2/3}$ -Einphasenstrom aus 50-Hz-Drehstromnetzen).
- d) Gleichstromumrichter zum Erzeugen einer höheren oder niederen Gleichspannung und umgekehrt.

Außerdem eignen sich Entladungsgefäße zum Schalten von Strömen bei kürzester Schaltzeit. In erster Linie seien für dieses Anwendungsgebiet genannt:

- a) Schalteinrichtungen mit großer Schalthäufigkeit für Punktschweißung.
- b) Röhren mit Steuergitter als Ersatz für mechanische Relais.
- c) Kurzschlußabschaltungen des Hauptstromes an Gleichrichtern mit Gittersteuerung unter Benutzung von Schnellrelais.

¹⁾ ETZ. 1932, H. 53, S. 771.

²⁾ SEV. Zürich 1936, H. 24.

Ferner sind als Anwendungsgebiete der Stromrichter erwähnenswert:

- a) der Leistungsaustausch zwischen Wechselstromnetzen mit Hilfe eines Gleichstromzwischenkreises,
- b) die Stromrückgewinnung bei der Talfahrt elektrischer Bahnen durch Umschaltung von Gleichrichteranlagen in Wechselrichterbetrieb, oder mit Hilfe eines Wechselrichters, der parallel zur Gleichrichteranlage in Betrieb gehalten wird.
- c) Gleichstrommotorantriebe mit einstellbarer Drehzahl vom Stillstand bis zum Höchstwert.
- d) Reversierbetriebe von Werkzeugmaschinen, Aufzugs- und Förderanlagen oder Walzenstraßen, mit Hilfe von zwei in Gegentakt geschalteten, gittergesteuerten Gleichrichtern, die je nach dem Drehsinn des gespeisten Gleichstrommotors in Wechsel- oder in Gleichrichterschaltung arbeiten, wobei die Wechselrichterschaltung eine schnelle Strombremsung und Bremsstromrückgewinnung ermöglicht.

Das Gesamtgebiet ist so umfangreich, daß in einer zusammenhängenden Schrift nur auf die prinzipielle Funktion eingegangen werden kann, auch sind die Versuche einzelner Arbeitsgebiete noch nicht als abgeschlossen zu betrachten.

In der Gleichrichtertechnik sind in den letzten Jahren nennenswerte Fortschritte erzielt worden. Die mechanischen Niederspannungs- und Elektrolytgleichrichter wurden von den Trockengleichrichtern verdrängt. Offenbar haben sich Selen- und Kupferoxydul-Trockenplatten-Gleichrichter am besten bewährt. Wegen der Wichtigkeit dieser Gleichrichterart ist ihnen ein besonderer Abschnitt gewidmet.

Die Glühkathodengleichrichter mit einer direkt geheizten, pastierten Oxydkathode und Edelgasfüllung werden für Spannungen bis 250 V hergestellt.

Eine wesentliche Verbesserung entstand vor einigen Jahren durch die Einführung der Glühkathodengefäße mit indirekt geheizter Kathode, einer geringen Quecksilberfüllung und einem zwischen Anode und Kathode sitzenden Steuergitter. Sie werden mehr- und einanodig hergestellt und eignen sich für Gleichrichter bis zu 20000 V und mehr. Die gittergesteuerten Röhren werden mit Thyatron oder Stromtor bezeichnet und finden häufig als Schaltmittel für beliebige Zwecke Verwendung.

Die Quecksilberdampf-Eisen- und Glasgleichrichter haben wohl den größten Anteil am Markt. Neben den bekannten Anwendungen für Licht- und Kraftnetze, Bahnbetriebe, Batterieladung usw. wurden recht beträchtliche Leistungen für Elektrolyse installiert. Glasgleichrichter werden von mehreren Firmen mit und ohne Steuergitter hergestellt. Die Glaskörper werden im Fabrikationsprozeß evakuiert. Im Gegensatz hierzu erhalten wassergekühlte Eisengleichrichter einen Pumpensatz, um das Vakuum während des Betriebes erneuern zu können. Es sind Anlagen bis zu 80000 A erstellt worden.

Auch wurde von verschiedenen Herstellerfirmen erreicht, Eisengleichrichter herzustellen, die ebenso wie Glaskörper in der Fabrikation evakuiert und ohne Vakuumpumpen betrieben werden.

Erwähnenswert sind noch die Hochvakuumgleichrichtergefäße ohne Gas- oder Dampffüllung, die für kleinere Ströme und Spannungen bis zu 200000 V in Verbindung mit Röntgenapparaten und Entstaubungsanlagen Verwendung finden, teilweise werden hierfür umlaufende mechanische Gleichrichter verwendet.

Interessant ist auch der Lichtbogengleichrichter von *Marx*, bei dem der Lichtbogen in der Atmosphäre arbeitet. Er wurde für höhere Spannungen und große Leistungen untersucht.

Im letzten Abschnitt des Buches befinden sich Abbildungen einiger ausgeführter Anlagen der neuesten Zeit.

Seit 1936 sind in den Errichtungsvorschriften des VDE. unter Nr. 0555 Richtlinien für den Bau von Stromrichtern und Stromrichteranlagen enthalten. Die Stromrichter sind unter der Gruppe Umformer und Transformatoren eingeordnet worden.

1. Die Wirkungsweise der Stromrichtergefäße (Gleichrichtergefäße)

Die Stromrichtergefäße haben die Aufgabe, den Strom in der einen Richtung durchzulassen und in der anderen zu sperren, sie sind daher mit einem Ventil vergleichbar. Der in den Gefäßen stattfindende Sperrvorgang wird mit Ventilwirkung bezeichnet. Am bekanntesten sind die Quecksilberdampf-Glas- und Eisengleichrichter. Dies sind entleerte (evakuierte) Gefäße, die im unteren Teil eine flüssige Hg-Kathode haben, der eine Anode oder mehrere Anoden gegenüberstehen. Für kleinere Stromstärken werden gas- oder dampfgefüllte Glühkathodenröhren verwendet. Der Strom in den Gefäßen fließt stets in der Richtung Anode - Kathode und wird umgekehrt gesperrt.

Etwa gleichzeitig mit der Entwicklung der Rundfunktechnik entstanden die dem Rundfunktechniker geläufigen Hochvakuumgleichrichterröhren, die auch reine Elektronenröhren genannt werden und keine Gas- oder Dampffüllung erhalten. Es sind dies Glühkathodenröhren ohne Steuergitter, die im übrigen wie Rundfunk-Sende- oder Empfängerröhren hergestellt sind.

Um möglichst reine Vorgänge während der Gleichrichtung zu erhalten, werden die Elektronenröhren bis zu einem Druck von etwa 0,000001 Torr entleert, so daß man praktisch einen luftleeren Raum erhält. Im Gegensatz hierzu werden die Hg-Gleichrichter im allgemeinen nur bis zu einem Druck von 0,001--0,005 Torr entleert. Die verbleibenden geringen Gasreste stören im Betriebe nicht, doch soll der Grad der Verunreinigung

ein bestimmtes Höchstmaß nicht übersteigen. Bei Glasgefäßen bestimmt das Maß der im Laufe der Zeit im Innern angesammelten Fremdgase die Lebensdauer und bei größeren Eisengefäßen werden für die Aufrechterhaltung des Vakuums entsprechende Pumpen vorgesehen. Pumpenlose Eisengefäße haben eine gasaufzehrende Wirkung.

a) Die Ventilwirkung der Hochvakuumgleichrichterröhren

Im Bild 1 ist der Schnitt einer Hochvakuumröhre gezeigt. Die Glühkathode wird mittels einer beliebigen Stromquelle geheizt. Hierbei werden von der glühenden Metallspirale Elektronen ausgestrahlt. In der Praxis sind bis

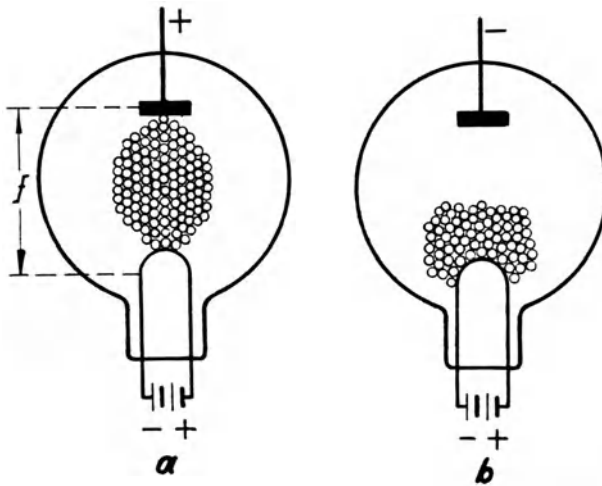


Bild 1. *a* - positive Anodenspannung, *b* - negative Anodenspannung, *f* = Brennspannung

heute nur negative Elektronen bekanntgeworden, daher wird die Potentialbezeichnung fortgelassen. Diese durch Ausstrahlung oder Emission frei werdenden Elektronen strömen bei eingeschaltetem Wechselstromkreis mit hoher Geschwindigkeit nach der Anode, wenn diese eine zur Kathode positive Spannung erhält. Die Geschwindigkeit ist spannungsabhängig, sie nähert sich im Hochvakuum bei hohen Spannungen der Lichtgeschwindigkeit. Sobald die Elektronen an der Anode angelangt sind, ist die leitende Verbindung zwischen ihr und der Kathode hergestellt. Der Strom fließt in der Richtung Anode--Kathode. Nach dem Verlauf einer Halbwelle wird die Spannung des Wechselstromkreises negativ, der Stromfluß hört auf und die Elektronen werden von der jetzt negativen Anode abgestoßen, bis die Anodenspannung wieder positiv wird; jetzt beginnt das Spiel von neuem. Im Bild 1 sind die Elektronenströmungen bei positiver und negativer Anodenspannung angedeutet.

Die Anode wird beim Gleichrichtervorgang wohl erwärmt, doch ihre Temperatur reicht nicht aus, um Elektronen zu emittieren, so daß in der umgekehrten Richtung kein Strom fließen kann. Wegen des völligen Fehlens von irgendwelchen Gasen oder Dämpfen ist in der Sperr-Richtung auch keine Glimmentladung möglich, im Gegensatz zu den gas- oder dampfgefüllten Gleichrichtern.

Der Hochvakuumgleichrichter ist demnach ein vollkommener Gleichrichter; doch hat er den Nachteil, daß durch den stetigen Emissionsvorgang eine beträchtliche negative Raumladung entsteht, die in der Strombahn zwischen Anode und Kathode einen hohen Spannungsverlust im Gefolge hat. Bild 2 I zeigt die Verlustspannung an einer 10-A-Röhre in Abhängigkeit vom Belastungsstrom. Mit negativer Raumladung wird eine Ansammlung von Elektronen bezeichnet; sie entsteht einmal durch fortwährendes, gegenseitiges Abstoßen der Elektronen, zum anderen durch die Anziehungskraft des magnetischen Feldes, das sich um den Heizdraht bildet. Die Elektronen werden in dies Feld gezogen, nur verhältnismäßig wenige werden von der Anode angezogen, so daß für die Strombahn nur eine geringe Anzahl von Elektronen zur Verfügung steht. Daher wächst der Spannungsverlust bei größeren Stromstärken, weil die Anzahl der wirksamen Elektronen im wesentlichen nur durch eine Erhöhung der Anodenspannung vermehrt werden kann.

Dieser Anstieg ist in der Kurve Bild 2 I zu erkennen. Bei 8 A Belastung beträgt der Spannungsverlust bereits 800 V und bei 10 A ist die Sättigung erreicht. Der Stromverlauf von 0 bis zum Sättigungsstrom folgt der Formel von Langmuir und Schottky:

$$i_s = c \cdot u_3^3 \quad (1)$$

Selbst bei der höchsten Anodenspannung nimmt der Strom über diesen Wert hinaus nicht mehr zu.

i_s Sättigungsstrom,
 u_3 Anodenspannung,
 c eine Konstante, die nach der inneren Konstruktion der Röhre bemessen wird.

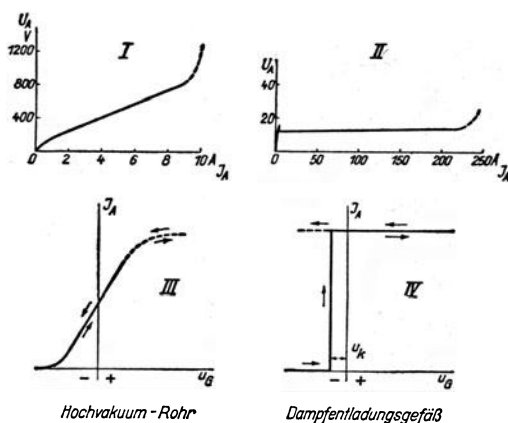


Bild 2. I Spannungsverlauf in Abhängigkeit vom Belastungsstrom beim Hochvakuumrohr, II beim Dampfentladungsgefäß, III Zündcharakteristik in Abhängigkeit von der Gitterspannung beim Hochvakuumrohr, IV beim Dampfentladungsgefäß

Die Kurve läßt auch erkennen, daß der Wirkungsgrad von Hochvakuumgleichrichtern für kleinere Gebrauchsspannungen niedrig sein muß, daher

werden sie nur für Rundfunkgeräte und für Gleichrichter höherer Spannungen verwendet. In den letzten Jahren sind die Hochvakuumröhren für Gleichrichterzwecke bis 20000 V von den Glühkathodengleichrichtern mit Hg-Dampf verdrängt worden. Sie werden heute lediglich für Röntgenapparate und elektrische Entstaubungsanlagen in den Spannungsgebieten von 40000 V an bis zu mehreren 100000 V verwendet, wobei die Betriebsströme kleiner als 1 A sind.

b) Die Glühkathodenröhren mit Gas- oder Dampffüllung

Wie die folgende Erläuterung zeigt, dient die Gas- und Dampffüllung lediglich dazu, die Raumladung durch positive Ionen zu kompensieren. Hierdurch wird die Brennspannung ganz wesentlich vermindert. Im Gegensatz zu Bild 2/I zeigt Kurve II die Brennspannung eines handelsüblichen dampfgefüllten Glühkathodengleichrichters in Abhängigkeit vom Belastungsstrom. Man erkennt an diesen Meßwerten, daß die Spannungshöhe der Brennspannung bei verschiedenen Belastungen bis zu einem Grenzwert von 250 A kaum einer Änderung unterliegt.

Der innere Widerstand wird demnach bis zu diesem Grenzwert mit zunehmendem Strom kleiner. Eine ähnliche Eigenschaft haben auch die Bogenlampen und Scheinwerfer, jedoch mit dem Unterschied, daß die Brennspannung in der atmosphärischen Luft 40—60 V beträgt. Im Abschnitt 10 ist ein Stromrichter von Professor Marx erwähnt, der praktisch in der freien Atmosphäre arbeitet und für hohe Betriebsspannungen erprobt wurde. In den Stromrichtern mit Gas- oder Dampffüllung erfolgt der Arbeitsprozeß in Form einer Lichtbogenentladung, daher werden sie auch Entladungsgefäße genannt.

c) Die Ventilwirkung der mit Gas oder Dampf gefüllten Glühkathodenröhren

Durch die Einführung von Gas oder Metaldampf werden die Vorgänge im Innern der Röhre jedoch komplizierter als bei den einfachen Hochvakuumröhren. Im Bild 3 ist der Querschnitt einer einanodigen Röhre gezeigt. Die aus einer Metallspirale bestehende Kathode wird von einer Batterie oder Transformatorwicklung geheizt. Nach dem Erhitzen ist sie emissionsbereit und emittiert Elektronen. - - (Im Bild 3 die negativ bezeichneten Teilchen.) Diese werden von der positiven Anode angezogen und erzeugen auf dem Wege zur Anode aus den neutralen Dampf- oder Gasatomen positive Ionen. Den Ionisationsvorgang erklärt die Physik so, daß Elektronen gegen neutrale Gasteilchen stoßen. Diese bestehen aus dem Atomkern, um den ähnlich dem Planetensystem ständig Elektronen kreisen. Bei dem Zusammentreffen von Elektronen aus der Entladungsbahn mit einem

neutralen Atomkern werden die ihn umkreisenden Elektronen aus ihrer Bahn gerissen und in die Entladungsbahn gestoßen. Der verbleibende Atomkern ist positiv und bildet ein positives Ion. Die von der Kathode kommenden und die frei gewordenen negativen Elektronen wandern mit der genannten hohen Geschwindigkeit weiter zur Anode, um auf dem Wege nach dort weitere Ionen zu erzeugen. Man nennt diesen Vorgang auch Stoßionisation.

Die Geschwindigkeit der Elektronen ist beispielsweise im Hg-Dampf etwa 340mal so groß als die Geschwindigkeit der Ionen; sie stehen daher im Vergleich zu den Elektronen praktisch still, denn bei einer Weglänge von 340 mm bewegen sich die Ionen nur 1 mm, während die Elektronen die Anode bereits erreicht haben. Die Entstehung positiver Ladungsträger hat jedoch den Vorteil, daß der Bewegung der Elektronen die Bremswirkung genommen ist, die sich in der Raumladung auswirkt. Wenn die ersten

Elektronen die Anode erreichen, fließt der Betriebsstrom, und zwar hauptsächlich mit Hilfe der Elektronen, weil sie schneller sind als die Ionen.

Die während dieses Prozesses erzeugten Ionen haben positives Potential und fließen umgekehrt wie die Elektronen, also nach der Kathode. Sie prallen mit hoher Geschwindigkeit auf diese auf und geben ihr auch eine zusätzliche Erwärmung. Hierdurch werden zusätzlich Elektronen emittiert, so daß die Ionisation während der Zeit des Stromflusses durch einen doppelten Einfluß ständig aufrechterhalten bleibt. Gleichzeitig wirken die aufprallenden Ladungsträger aber auch zerstörend auf das Kathodenmaterial (nicht bei der flüssigen Hg-Kathode), was sich besonders bei höheren Spannungen auf die Lebensdauer geheizter Kathoden auswirkt, daher muß diese der Anodenspannung entsprechend bemessen werden. Von großem Vorteil ist ein

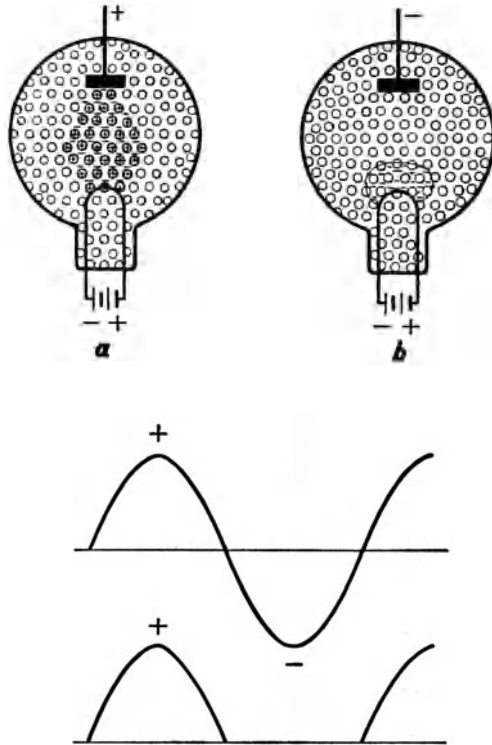


Bild 3. a - ionisierter Lichtbogenweg, b -- neutralisierter Lichtbogenweg. Wechselstromkurve, Gleichstromkurve

möglichst kurzer Weg von Anode nach Kathode, was bei den mit Hg-Dampf gefüllten Röhren (Abschnitt 4) erreicht werden konnte.

Der einmal eingeleitete Stromfluß wird solange aufrechterhalten, bis die Spannung, im Bild 3 die positive Wechselstromhalbwelle, auf Null abklingt. Dann hört auch der Zufluß neuer Elektronen nach der Anode auf und die restlichen Elektronen wandern an benachbarte Armteile oder Wände. Auch der größte Teil der Ionen nimmt den gleichen Weg, so daß sich beide vereinigen und rekombinieren. Teilweise findet auch in der Entladungsbahn eine Anlagerung von Ionen an nichtionisierte Atome statt. Dieser komplette Vorgang erfolgt nach verschiedenen Angaben in der Zeit von 1^{-3} und 1^{-5} sec und wird mit Entionisieren bezeichnet. Die bei Eisenstromrichtern (Bild 17) bekannten Entionisierungsgitter fördern die Entionisierung außerordentlich, um durch rasche Beendigung dieses Prozesses das Auftreten von Rückzündungen zu vermeiden. Nach der Entionisierung entsteht ein vollkommen neutraler Raum, erst wenn die Spannung bei der nächsten Halbwelle wieder positiv wird, beginnt das beschriebene Spiel von neuem.

Durch die Vermeidung der Raumladung entsteht die im Bild 2 gezeigte niedrige Brennspannung, die unabhängig von der Höhe der Anodenspannung den gezeigten Wert behält. Durch die annähernd gleichbleibende Brennspannung entsteht der günstige Wirkungsgrad der Gleichrichter, besonders bei höheren Gleichspannungen. Für den eigentlichen Sperrvorgang, und für den Vorgang in der Entladungsbahn, bestehen im Prinzip keine Unterschiede, ob man Gas, Metaldampf, Glühkathoden oder flüssige Kathoden betrachtet.

d) Die Ventilwirkung der Hg-Stromrichtergefäße mit flüssiger Kathode

Die Hg-Stromrichter haben evakuierte Glas- oder Eisengefäße mit einem untensitzenden Kathodenbecken, das mit Quecksilber gefüllt wird. Im oberen Teil ist ein Kondensationsraum (Kühlkammer) vorgesehen, in den der größere Teil des beim Arbeitsvorgang verdampften Quecksilbers hineinströmen soll, um an den von außen gekühlten Wänden zu kondensieren. Das kondensierte Quecksilber läuft in Tropfenform an den Wänden der Kühlkammer und teilweise auch aus den seitlich angeordneten Anodenarmen, oder bei den Eisengleichrichtern von den in der Nähe der Anoden sitzenden Wänden, in das Kathodenbecken zurück. Das Hg macht somit während des Betriebes einen ununterbrochenen Kreislauf. Im Innern der Gefäße befindet sich demnach eine Elektrode aus Quecksilber (Kathode), der Anoden aus Graphit oder Metall gegenüberstehen. Der Entladungsvorgang findet zwischen den Anoden und der Kathode statt. Bild 4 zeigt ein Gleichrichtergefäß mit drei Anoden und eine entsprechende Schaltung. In dieser ist neben den Hauptstromkreisen noch ein zweiter, kurzgeschlossener Gleichrichterkreis $H-Z A$ zu erkennen, der nach der erfolgten Zündung sofort in Betrieb geht und mit Fremd- oder Hilfsrerregung bezeichnet wird.

Die Hilferregung hat die Aufgabe, den Kathodenfleck unabhängig von jeder Belastung aufrechtzuerhalten. Um den Stromrichter in Betrieb zu setzen bzw. um die Entladung einzuleiten, ist eine Zündanode vorgesehen, die äußerst betriebssicher hergestellt sein muß, denn die Hg-Stromrichter können ohne fremde Zündung nicht in Betrieb genommen werden. Von jeher haben die Herstellerfirmen ihr Augenmerk auf eine jederzeit sichere Zündanode gerichtet.

Der Erregerstromkreis arbeitet als kleiner Gleichrichter parallel zu dem Hauptstromkreis, daher sind in ihm auch die Entladungsvorgänge die gleichen; doch soll zum besseren Verständnis der Vorgänge im Lichtbogen der eingeschaltete Erregerkreis vorausgesetzt werden. Auf die Funktion der Erregung wird noch an verschiedenen Stellen hingewiesen. Es sei demnach angenommen, daß die Erregung im Betrieb ist. Der Kathodenfleck tanzt hierbei unruhig auf dem Hg-Spiegel hin und her und bildet für den Hauptstromkreis den Pluspol; d. h. der erzeugte Gleichstrom fließt von hier in das Gleichstromnetz.

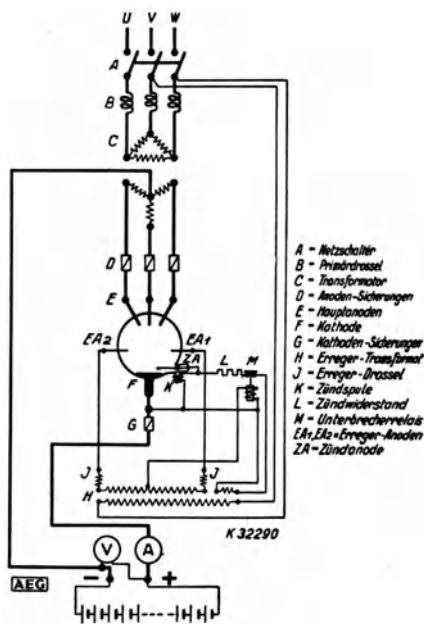


Bild 4. Normalschaltbild eines Quecksilberdampfgleichrichters

Die Vorgänge in der Entladungsbahn sind die gleichen wie beim Glühkathodengleichrichter, doch wesentlich anders ist nach der neuesten Auffassung die von der Kathode und dem Kathodenfleck ausgehende Elektronenemission ¹⁾. Der heiße Kathodenfleck verdampft soviel Hg, daß unmittelbar vor ihm eine große Dampfdichte und infolgedessen sehr viel positive Ionen entstehen. Diese werden mit „positive Raumladung“ bezeichnet, die mit der gegenüberstehenden Oberfläche der Hg-Kathode ein starkes Feld bildet. Dieses Feld erst reißt die Elektronen aus dem Metall (Quecksilber) heraus. Das Metall emittiert also die Elektronen nicht infolge der Hitze im Kathodenfleck wie bei der Glühkathode, sondern infolge der hohen Feldstärke. Jetzt fliegen die Elektronen in die Entladungsbahn, weiter auf die positiven Anoden zu und ionisieren die Hg-Dampfteilchen der gesamten Weglänge. Der weitere Vorgang entspricht dem der Glühkathodengleichrichter, d. h.

¹⁾ Engel u. Steenbeck, Elektrische Gasentladungen. Berlin, Jul. Springer, 1932.

nach erfolgter Ionisation der Entladungsbahn erfolgt die Entladung, und der Betriebsstrom fließt. Die Anoden haben nur eine kaum merkliche Elektronenemission, daher erfolgt eine Ionisierung im umgekehrten Sinne nicht. Trotzdem besteht eine Glimmentladung in der Sperrwirkung, deren Größe für den inneren Zustand des Entladungsgefäßes ein guter Maßstab ist (Abschnitt 5).

Da mit wachsender Stromstärke auch mehr Hg verdampft, wächst die Feldstärke und somit die Elektronenemission, wodurch mehr Ionen gebildet werden. Demnach stehen einer stärkeren Entladung, also einem größeren Betriebsstrom, selbsttätig mehr Elektronen zur Verfügung. Die Brennspannung des Entladungsvorganges, die als Verlustspannung im Bild 2 in Kurvenform aufgetragen ist, beträgt je nach der Größe der Gefäße 15--30 V, sie schwankt bei den verschiedenen Belastungen um einige Volt.

e) Der Stromverlauf im zweianodigen Wechselstromgleichrichter

Den Stromverlauf des Hauptstromkreises eines zweianodigen Gleichrichters zeigt Bild 5. Es sei angenommen, daß der Kathodenfleck durch die Zünd-

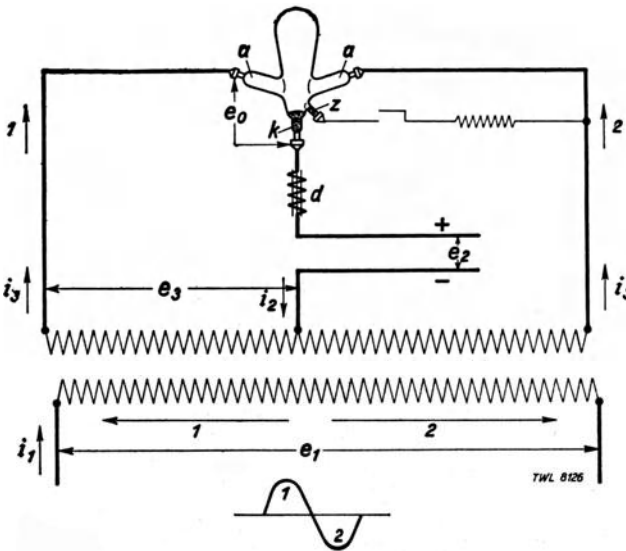


Bild 5. Prinzipschaltung des Einphasen-(Zweianoden-) Gleichrichters

anode eingeleitet ist, dann fließt in der Richtung Pfeil 1 der Sekundärstrom i_3 über die linke Anode, sodann durch das Gleichstromnetz bis zum Mittelpunkt der Sekundärwicklung des Transformators. In der rechten Wicklungshälfte fließt während dieser Zeit kein Strom, denn ein Stromfluß könnte nur in der umgekehrten Richtung durch die Kathode stattfinden. Dies verhindert jedoch die Ventilwirkung des Gleichrichters. Es ist also

dasselbe, als wäre die rechte Hälfte mittels Schalter getrennt. Nach dem Verlöschen der linken Anode fließt der Strom in der Richtung Pfeil 2 durch das Gleichrichtergefäß und den Gleichstromkreis zum Mittelpunkt des Transformators. Währenddessen ist der Strom in der linken Transformatorhälfte gesperrt. Hieran schließt sich wieder der Stromfluß der linken Transformatorhälfte usw. Bei dieser Betrachtung sei angenommen, daß die Drosselspule d nicht vorhanden ist.

Es ist vielfach die Ansicht verbreitet, daß der Wirkungsgrad schlechter wird, wenn die eine Transformatorhälfte keine Nutzarbeit leistet. In obiger

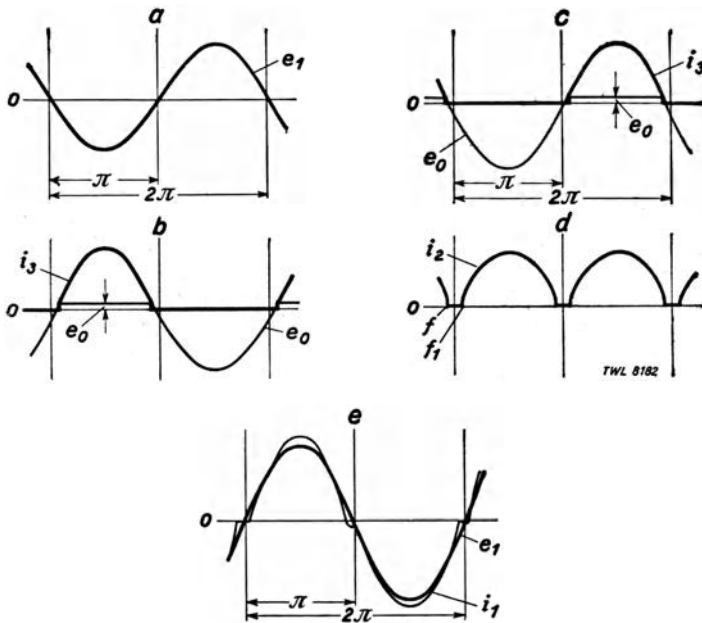


Bild 6. Strom- und Spannungskurven eines Einphasengleichrichters ohne Glättungsdrosselspule. a = Netzspannung des Wechselstroms, b = Anodenstrom und Gefäßspannung von Anode bis Kathode, c = wie b , d = Gleichstrom, e = Primärstrom und Primärspannung

Erklärung ist aber der Beweis erbracht, daß der Wirkungsgrad nicht beeinflußt werden kann, denn in der nicht arbeitenden Transformatorhälfte fließt infolge der Ventilwirkung kein Strom. Diese einseitige Belastung macht jedoch einen größeren Transformator zur Bedingung. In Bild 6 sind die Zusammenhänge obiger Erklärung durch Wechselstromhalbwellen schematisch dargestellt. An der Primärseite des Transformators ist eine sinusförmige Spannung a vorhanden. Beim Fließen des Anodenstromes entsteht bei rein ohmscher Belastung ein Gleichstrom in der Form einer Halbwelle i_3 (b), hieran setzt sich die Halbwelle i_3 (c) dann wieder b usw. Auf diese Weise entsteht ein Gleichstrom der Kurvenform d . Der Gleichrichter ist

demnach in seiner Wirkung durchaus mit einer Schaltvorrichtung vergleichbar, die bald die eine, bald die andere Halbwelle einschaltet, wie das bei den mechanischen Gleichrichtern auch tatsächlich geschieht, indem eine mit den Wechselstromperioden hin und her schwingende Feder die eine oder die andere Stromhalbwelle einschaltet.

An die Aufrechterhaltung dieses wechselnden Vorganges im Gleichrichter sind bestimmte Bedingungen geknüpft. Wenn nämlich der Gleichrichter nach Bild 5 keine Erregung hat, so erlischt der Gleichrichter nach jeder Halbwelle, sobald sie sich dem Nullwert nähert und kleiner wird als die Lichtbogenbrennspannung. Den Verlauf dieser Spannung e_0 zeigt Bild 6b während zweier Halbwellen. Sie ist klein, wenn der Anodenstrom fließt und steigt während der Sperrzeit stark an. Das Bild 6b zeigt von $0-\pi$ den Lichtbogenfall von 20 V und von $\pi-2\pi$ die hohe leerstehende Spannung, wenn die Anode nicht arbeitet. In dem Punkt f reißt der Lichtbogen ab, weil die Spannung unter 20 V fällt, erst bei f_1 kann der Strom wieder fließen.

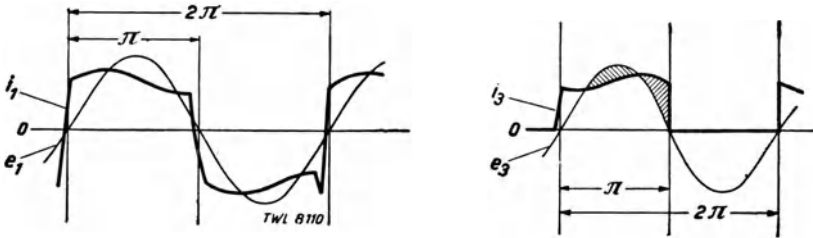


Bild 7. Strom- und Spannungskurven an Einphasengleichrichtern mit Glättungsdrosselspule. e_1 - Transformatorspannung primär, e_3 - dieselbe sekundär, i_1 - Primärstrom, i_3 - Anodenstrom

Ein solcher Gleichrichter ist für die Praxis unbrauchbar, denn er müßte bei 50 Perioden Wechselstrom in jeder Sekunde hundertmal gezündet werden. (Eine Ausnahme macht der Gleichrichter mit Ignitronzündung, Abschnitt 3,m und der Glühkathodengleichrichter.)

Es gibt in der heutigen Gleichrichtertechnik zwei Mittel, den Lichtbogen beim Übergang von f nach f_1 aufrechtzuerhalten, damit eine einmalige Zündung genügt, um den Gleichrichter in Betrieb zu halten. Erstens, man schaltet in den Gleichstromkreis die Glättungsdrosselspule d , dann besteht eine Anodenspannung, die stets höher als 20 V ist. Die Stromhalbwellen erzeugen in der Drosselspule eine nachteilige Spannung, die den Stromfluß von Anode nach Kathode aufrechterhält, wenn die Netzspannung ihren Nullwert erreicht hat. Hierdurch entsteht je nach der Größe der Glättungsdrosselspule ein Gleichstrom mit geringerer Welligkeit. Diese Abflachung der Halbwellen ist für einphasige Gleichrichter größerer Stromstärken erforderlich. In Bild 8 ist der Stromverlauf im Gleichstromkreis bei verschiedenen großen Drosselspulen dargestellt.

Das zweite Mittel, den Lichtbogen im Nullwert des Wechselstromes aufrechtzuerhalten, ist die Verwendung der Hilfs- oder Fremderregung. Durch die

Hilfserregung erreicht man ferner, daß der Strom vom Leerlauf an in jeder beliebigen Stärke entnommen werden kann, wogegen jeder Quecksilberdampfgleichrichter ohne Hilfserregung unbeachtet der Phasen bzw. Anodenzahl bei einem bestimmten Minimalstrom erlischt, auch wenn eine Drosselspule in den Hauptgleichstromkreis geschaltet wird. Dies ist auf die geringe Temperatur und auf den geringen Dampfdruck im Gleichrichtergefäß bei niederen Belastungen und auf die Abwanderung von Ladungsträgern auf die bei kleiner Belastung kalten Gefäßwände zurückzuführen. Bild 7 zeigt die Stromkurve des Primärstromes und Anodenstromes

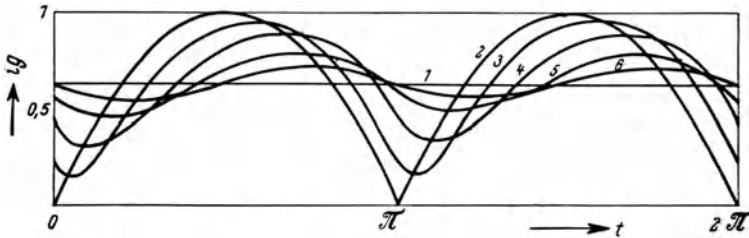


Bild 8. Die Darstellung des Gleichstroms bei verschiedenen großen Glättungsdrosselspulen. (Aus K. E. Müller-Lübeck, Quecksilberdampfgleichrichter, II. Bd., J. Springer, 1929.) 1 = idealer Gleichstrom, 2 = Nicht geglätteter Gleichstrom, 3—6 = Glättung bei verschiedenen großen Spulen

bei eingeschalteter Glättungsdrosselspule. Der Übergang des Stromes von einer Anode auf die andere erfolgt etwa beim Nullwert der Anodenspannung. Dies ist an der fast steil ansteigenden rechten Linie zu erkennen. Die Überlappung beider Anodenströme durch Induktivitäten im Transformator und Drosselspulen ist im Abschnitt 12 erläutert. Es besteht demnach der erwähnte fortdauernde Stromwechsel von einer Anode niederer Spannung auf die Anode höherer Spannung, und zwar an den Anoden, die eine positive Stromrichtung zur Kathode haben. Dieser Stromübergang wird auch mit Kommutierung bezeichnet.

Die Stromkurven Bild 7 sind oszillographische Aufnahmen eines zwei-anodigen Gleichrichters mit einer Glättungsdrosselspule. Bei unendlich großen Drosselspulen fließt durch jede Anode ein Strom rechteckiger Form, so daß ein geradliniger Gleichstrom entsteht, wie ihn eine Batterie liefert. Im Bild 7 ist auch zu erkennen, daß sich der Anodenstrom der Rechteckform nähert.

f) Der Stromverlauf im Dreiphasengleichrichter

Der Drehstrom- oder Dreiphasengleichrichter gelangt häufig zur Anwendung. Im Bild 9 ist die Prinzipschaltung dargestellt. Die Funktion ist dieselbe wie beim Einphasengleichrichter, doch fließen während einer Wechselstromperiode nicht zwei, sondern drei Pulsationen in den Gleichstromkreis. Die einzelnen Pulsationen sind somit um 120° zeitlich verschoben. Bei einem 50periodigen Drehstrom fließt der Strom in einer Anode während $1/150$ Se-

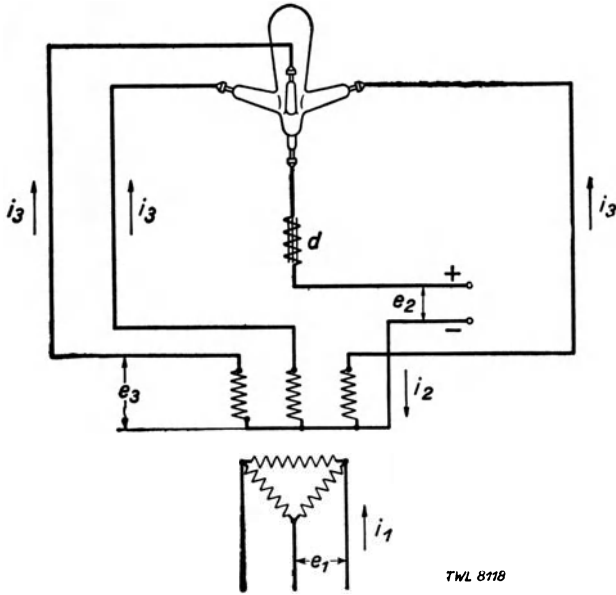


Bild 9. Prinzipschaltbild des Dreiphasengleichrichters

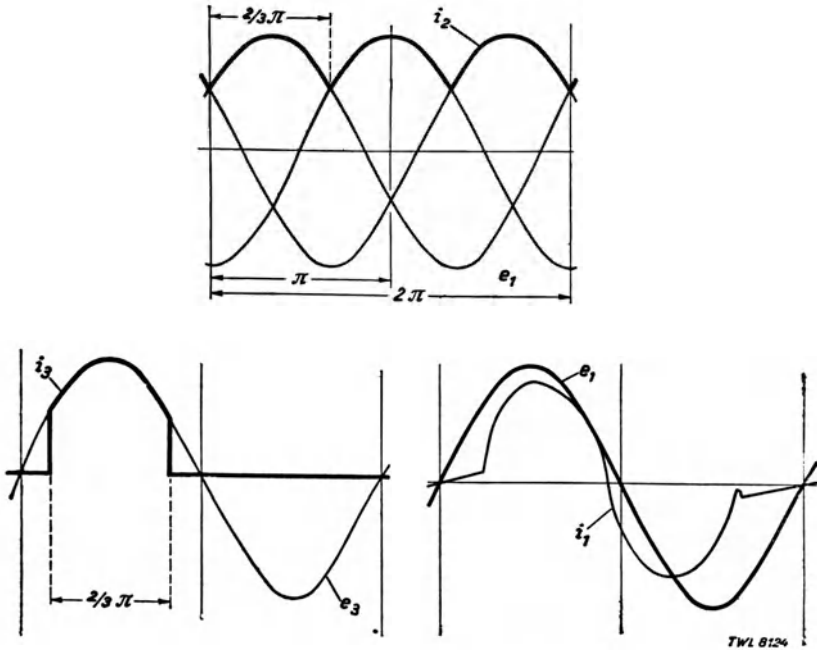


Bild 10. Strom- und Spannungskurven des Dreiphasengleichrichters. i_1 = Primärstrom, i_2 = Gleichstrom, i_3 = Anodenstrom ($i_2 - i_3$ gilt ohne Glättungsdrosselspule)

kunde, daran schließt sich die zweite Anode, die dritte und dann wieder die erste Anode usw. Dagegen dauert ein Stromimpuls beim Einphasengleichrichter $\frac{1}{100}$ sec. Aus dieser Zusammenstellung geht aber hervor, daß die wirksamen Anodenspannungen Bild 10 nie auf den Nullwert abfallen, denn der Kreuzungspunkt zweier Halbwellen liegt über der Nulllinie, also besteht stets eine Spannung, die höher als die Brennspannung ist. Somit kann der Drehstromgleichrichter über der Minimalstromgrenze nicht verlöschen, auch wenn keine Drosselspule im Gleichstromkreis oder eine Erregung verwendet ist. Bei Verwendung einer Gleichstromdrosselspule entsteht analog zur Kurvenform Bild 8 ein geglätteter Gleichstrom. Der Strom der Primärseite ist je nach der Wicklungsart des Transformators verschieden. Man unterscheidet die im Abschnitt 12 erläuterten Wicklungsarten. In jedem Falle muß die Sekundärseite einen zugänglichen Nullpunkt für den Minuspol des Gleichstromes haben, denn der aus der Kathode ankommende Strom fließt durch den Verbraucher und von hier in den Nullpunkt. Im Bild 10 ist der Primärstrom i_1 der Schaltung Dreieck Stern gezeigt. Die von der Sinusform abweichende Stromkurve tritt beim Leistungsfaktor in Erscheinung. Die Schaltung Stern/Stern wird wegen der großen Streuung nur für besondere Zwecke verwendet.

g) Der Stromverlauf in Sechs- und Zwölfphasengleichrichtern

Eine hohe Bedeutung hat der Sechsfasengleichrichter, er ist in den letzten Jahren für mittlere und größere Anlagen am häufigsten verwendet worden. Das Schaltprinzip ist in Bild 11 ersichtlich. Beim Drehstrom entstehen in drei Wicklungen drei Stromimpulse, die um 120° voneinander phasenverschoben sind, und beim Sechsfasestrom in sechs Wicklungen sechs

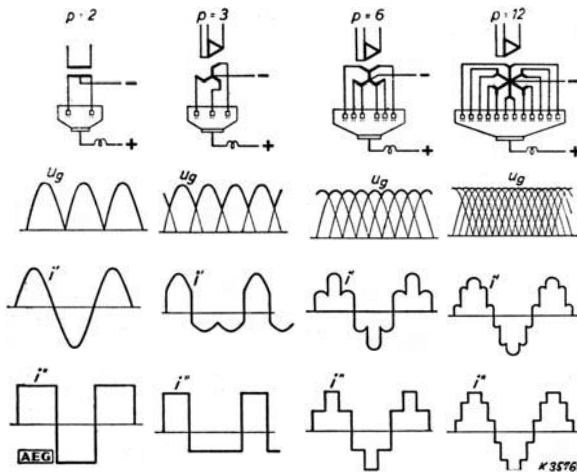


Bild 11. Zusammenstellung der Strom- und Spannungskurven an 2-12 anodigen Gleichrichtern
 U_g - Gleichspannung, i' - Primärstrom ohne Drosselspule, i'' - Primärstrom mit Drosselspule

um 60° verschobene Stromimpulse. Schaltet man einen Sechspanstransformator an ein Gleichrichtergeräť mit sechs Anoden, so entsteht ein Gleichstrom, wie ihn Bild 12 (a) zeigt. Die Gleichstromkurven der einzelnen beschriebenen Gleichrichterarten lassen im Bild 11 erkennen, dať wärend einer vollen Wechselstromperiode von $0-2\pi$ bei 50 Perioden Wechselstrom beim Einphasengleichrichter 100 Pulsationen bestehen, beim Dreiphasengleichrichter 150, beim Sechspansgleichrichter 300 Pulsationen und beim Zwölfspansgleichrichter 600 Pulsationen.

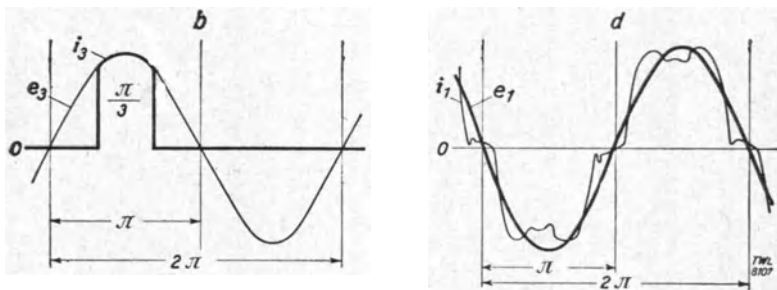
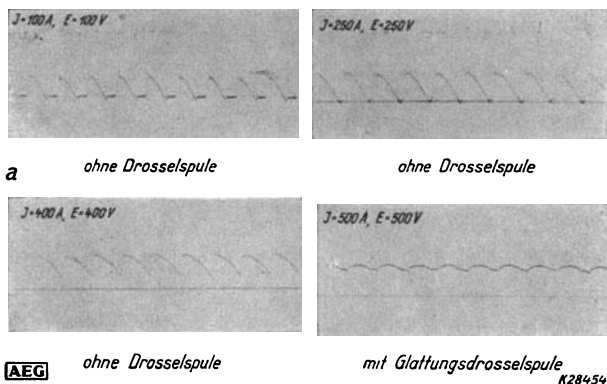


Bild 12. a - oszillographische Aufnahmen des Gleichstroms an Sechspansgleichrichtern, b - Anodenstrom (ohne Drosselspule), d - Primärstrom in der Schaltung Dreieck, Doppelstern

Das Bild 12a zeigt einen geglätteten Gleichstrom, der nur wenig vom Gleichstrom einer Maschine abweicht. Die Form des Primärstromes ist auch bei Sechspansgleichrichtern von der Wicklungsart abhängig. Beim Sechspansgleichrichter wird die Schaltung Stern/Doppelstern in Verbindung mit einer Saugdrosselspule oft verwendet. Den Verlauf des Primärstromes bei der Wicklung Dreieck Doppelstern zeigt Bild 12 (d). Dieser Strom weicht weniger stark von der Form der reinen Sinusform ab, hierdurch entsteht auch der günstigere Leistungsfaktor gegenüber Dreiphasengleichrichtern.

Für sehr große Stromrichteranlagen (Gleichrichter für Elektrolyse) hat der Zwölfspansgleichrichter in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen und

zwar in der Hauptsache wegen des geringen Oberwellengehalts auf der Primärseite des Transformators. Zwölfphasenschaltungen werden im allgemeinen nicht in der einfachen Schaltung ähnlich Bild 11 ausgeführt, denn die nur kurzzeitig fließenden Anodenströme erfordern bereits beim Sechshephasengleichrichter größerer Stromstärken Kunstsaltungen, um die sogenannte Brennweite der Anodenströme zu vergrößern. Die größere Brennweite hat eine höhere Belastungsfähigkeit der Anoden und somit der Gleichrichtergefäße im Gefolge. In der Praxis ausgeführte Sechshe- und Zwölfphasenschaltungen sind im Abschnitt 12 erläutert. Für den Gleichstrom ist es an sich gleich, welche Zwölfphasentransformatorschaltung gewählt wird, denn dieser ist durch die kurzen Stromimpulse in jeder Schaltung praktisch geradlinig.

2. Die Konstruktion und Herstellung der Stromrichtergefäße

Um die einzelnen Bauteile und Hilfseinrichtungen einer Stromrichteranlage in ihrer Zusammenarbeit mit den Stromrichtergefäßen besser verstehen zu können, werden deren Funktionen gleichzeitig mit der Konstruktionsbeschreibung erläutert. Zu den Hilfseinrichtungen gehören die unmittelbar zum Betriebe der Gefäße nötigen Betriebsmittel wie Glühkathodenheizrichtungen, Zündung, Erregung und Kühlvorrichtungen. Die wichtigsten Baustoffe für die Herstellung von Stromrichtergefäßen sind Glas oder Eisen für den Hauptkörper, ferner Quecksilber für die flüssige Kathode, Graphit für die Anode, Metall für die luftdichte Stromeinführung, keramische Baustoffe und Gummi für die Dichtung und Stromdurchführung an Eisengleichrichtern, Oxide für die Glühkathode und andere Materialien. Da die Gefäße nach ihrer Fertigstellung während einer sehr langen Zeit den stärksten Beanspruchungen ausgesetzt sind, müssen sämtliche Materialien gut ausgesucht und geprüft sein, ehe sie für Stromrichtergefäße verwendet werden können. Dies gilt besonders für die Baustoffe vakuumdichter Verbindungen von Glas und anderen Isolierstoffen mit Eisen oder Metall.

a) Glas als Baustoff für Röhren und Entladungsgefäße

Es ist durchaus verständlich, wenn hin und wieder Mißtrauen gegen die Haltbarkeit von Glasgefäßen geäußert wird, doch sei darauf hingewiesen, daß der Stromrichter kein Umformer ist, der eine bestimmte Energie aufnimmt, um sie in einer neuen Form wieder abzugeben. Der Stromrichter ist mit einer Schalteinrichtung vergleichbar, die dem Strom eines Netzes oder Transformators eine neue Richtung gibt.

Die Energie wird von dem Transformator Bild 4 geliefert. Durch die Kommutierung fließt der Strom im Rhythmus der Netzfrequenz abwechselnd von den Anoden 1-2-3 nach der Kathode. Das Gefäß wird thermisch nur

mit dem geringen Verlustbetrag von 20 V im Lichtbogenweg beansprucht. Dies sind bei 500 V Gleichspannung etwa 4% der gesamten Energie. Ferner ist zu beachten, daß die Lichtbögen in der Entladungsbahn keine mechanischen Kräfte auslösen. Es ist aus der Schalttechnik bekannt, daß nur geringe Kräfte nötig sind, um einen Lichtbogen aus seiner Bahn abzulenken und daß beispielsweise Druckluft den stärksten Kurzschlußlichtbogen zu löschen vermag. Dies ist ein Beweis dafür, daß ein Stromrichtergefäß im Betriebe mechanisch gering beansprucht wird.

Um die Haltbarkeit des Glases richtig einzuschätzen, ist es zweckmäßig, die Eigenschaften des Glases mit Metall oder Eisen zu vergleichen. Die Gläser verhalten sich nicht wie Metalle, welche erst, dem *Hook'schen Gesetz*¹⁾ entsprechend, dem Zug elastisch folgen, dann bei gesteigertem Zug fließen und schließlich abreißen, sondern bei den meisten Glassorten fällt die Etappe des Fließens weg. Der glasharte Stahl hat zwar eine ähnliche Sprödigkeit, jedoch ist er vermöge seiner hohen Zugfestigkeit den Gläsern überlegen. Die Zerbrechlichkeit von Glas und keramischen Baustoffen ist nach Tabelle 1 durch die geringe Zugfestigkeit begründet. Um die Haltbarkeit der

Tabelle 1. Allgemeine Baustoffe

Material	E	W	Z	Dr
Hartporzellan	1410—1550	25—55	3—5	30—55
Naturspeckstein	1500	90—100		40—80
Steatit	1440	76—85	5,5—8,5	85—95
Calit	1310	78	6,5—9,5	85—10
Calan	1250	76	4—5	50—600
Korund	1730	46—80	3,5	51—60
Frequenta	1440	70—80	5,5—8,5	90—95
Sipa	1300	10—12		
Quarzglas	1300	5,5—6	20	200
Glas	500—800	30—96	3—15	60—120
Eisen	1500	125	33—50	45—80
Stahl	1600	125	70—170	45—80
Kupfer	1080	165	16—45	

E Erweichungstemperatur (Schmelztemperatur für Metalle), W — Wärmeausdehnung ($W \cdot 10^{-7}$ cm), Z — Zugfestigkeit kg/qmm, Dr — Druckfestigkeit kg/qmm²)

Gefäße zu erhöhen, werden sie heute so hergestellt, daß bei den verschiedenen Betriebstemperaturen keine Zugbeanspruchung entsteht. Eine besondere Aufgabe bildet die Metall-Glasverschmelzung. Nach *Schönborn*³⁾ wächst der

¹⁾ F. Lauster, Glas als Werkstoff, 31 S. Leipzig, Hachmeister & Thal, 1930.

²⁾ W. Espe u. M. Knoll, Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik. Berlin, Jul. Springer, 1936. 383 Seiten.

³⁾ Zeitschr. f. Phys. 1924, H. 22, S. 305 (von Lauster zitiert).

Ausdehnungskoeffizient des Glases zunächst linear mit der Temperatur und verhält sich erst etwa 40° unterhalb des Erweichungspunktes anormal. Daher wird von *Lauster* empfohlen, bei Vergleichen zwischen Metall und Glas die mittleren Ausdehnungskoeffizienten für den in Frage kommenden Temperaturbereich in Rechnung zu setzen. Die Tatsache, daß die Druckfestigkeit des Glases weit höher als seine Zugfestigkeit liegt, führt dazu, daß Glas eher starke Temperatursteigungen als Temperaturabnahmen aushält. Um Spannungen im Glase zu vermeiden, werden die fertigen Einzelteile und Gefäße in Wärmeöfen langsam abgekühlt.

Es bestehen auch Untersuchungsverfahren, mit deren Hilfe man die Spannungen in Metalleinschmelzungen ermitteln kann. Bekanntlich ist die Doppelbrechung des Lichtes um so größer, je stärker gespannt ein Glas ist. Die Doppelbrechung, die sonst nur in Kristallen beobachtet werden kann, tritt somit auch in gespannten isotropen Körpern auf. Geeignete Polariskope, die besonders von Zeiss in Jena hergestellt werden, gestatten die Doppelbrechung auch an sperrigen Objekten wie an Gleichrichtergefäßen im polarisierten Licht zu untersuchen¹⁾.

Das mit dem Polariskop beobachtete Glas zeigt an Stellen, die inneren Glasspannungen ausgesetzt sind, eine gut ausgeprägte Farbe. Spannungslose Glasteile dagegen bleiben farblos.

b) Die metallische Stromeinführung in Glasgefäße

Die Verschmelzung von Glas mit Metall ist wohl das wichtigste Konstruktionselement an den Stromrichtergefäßen, denn sie muß neben einer langen

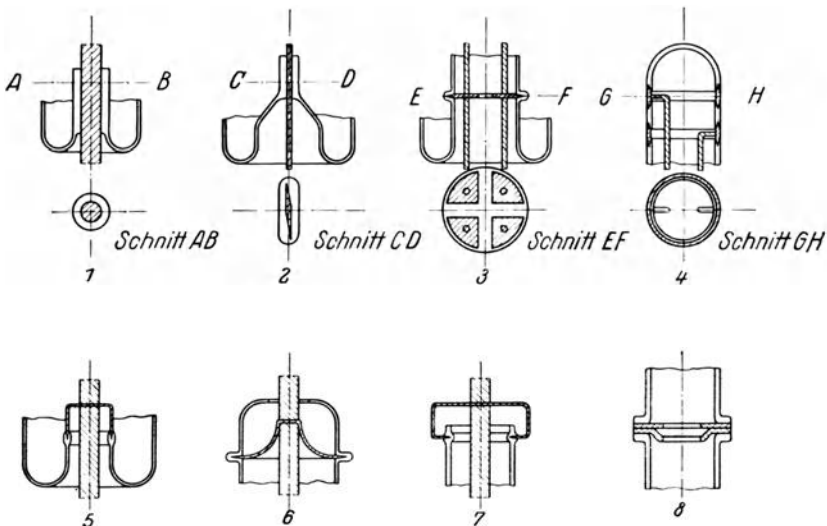


Bild 13. 1 4 Stifteinschmelzungen, 5 - 7 Kappenverschmelzungen, 8 · Preßdichtung

¹⁾ *Späte*, Glastechnische Berichte 1926, 27 (von *Lauster* zitiert).

Tabelle 2. Verschiedene gangbare Glassorten

Bezeichnung	T	E	A
Platinglas	530	600	89—93
Apparateglas F	515	550 700	84
Apparateglas G		595	92
Magnesiaglas	495	595	92
Natriumfestes Glas ..	508		55
Nonex	486	521	36
Pyrex	517	561	33
Molybdänglas	550	585	47—48
Wolframglas	540	750	40
Supremax	720	800 -900	30

T = Transformationstemperatur, E = Erweichungstemperatur
in °C, A = Ausdehnungskoeffizienten $\cdot 10^{-7}$)

Tabelle 3. Verschiedene Einschmelzmetalle

Metall	A	W	S	Bemerkungen
Platin	90,7	0,167	0,108	chemisch rein
Nickel Eisen	89	0,038	0,45	Ni 47,5%
Cu-Manteldraht	radial 80—100			Kern
(Cu-Mantel 20·30% des Gesamtgewichtes)	axial 61—65	0,4	0,04—0,06	Ni 42% Fe 58%
Chrom Eisen	95—100	0,05	0,5	25—30% Chrom
Fernichrom	92			Fe 37% Ni 30% Co 25% Cr 8%
Wolfram	40—45	0,38	0,06	
Molybdän	53—55	0,35	0,06	
Fernico	47—56	0,09	0,27	Ni 28—29% Co 17—18% Fe 54%
Kupfer	165	0,92	0,017	Elektrolyt
Chromnickel	145	0,03	1,09	Cr 21% Ni 76,5% Fe 2,3
Eisen	125—145		0,14	
Silber	190		0,016	
Aluminium	240		0,03	
Blei	290		0,21	

A = Ausdehnungskoeffizient ($A \cdot 10^{-7}$), W = Wärmeleitfähigkeit,
S = spezifischer elektrischer Widerstand bei 20°C¹⁾)

Haltbarkeit auch mechanisch fest sein und den betriebsmäßigen Erschütterungen standhalten. Früher wurde Platin als Einschmelzmetall verwendet und ein hierzu passendes Glas mit der gleichen Ausdehnung, doch der hohe

¹⁾ W. Eitel, M. Pirani u. K. Scheel, Glastechnische Tabellen. Berlin, Jul. Springer, 1932; Espe u. Knoll, a. a. O., S. 163 u. 331.

Anschaffungspreis zwang, nach anderen Glas-Metallverbindungen zu suchen. Die Tabellen 2 und 3 zeigen, daß auf dem interessanten Gebiete der Metall-Glasverschmelzungen wichtige Fortschritte erzielt wurden, so sind auch im Laufe der Jahre zahlreiche Einschmelzmethoden erprobt, die teils verwendet, teils wieder verlassen sind. Bild 13 zeigt einige Beispiele ¹⁾, die aus der Literatur und Patentschriften zusammengestellt wurden. Grundlegend werden unterschieden:

Stifteinschmelzungen, Pos. 1, 2, 3 und 4.

Kappeneinschmelzungen, Pos. 5, 6 und 7.

Preßdichtungen, Pos. 8.

In neuerer Zeit kommt noch die Verschmelzung von keramischen Stoffen hinzu, die eine metallische Einführung in metallischen Gefäßen dichten müssen (pumpenlose Eisengleichrichter). Die Stifteinschmelzung setzt angenähert den gleichen Ausdehnungskoeffizienten von Metall und Glas voraus. Dagegen haben sich Kappeneinschmelzungen auch bei nicht gleichen Ausdehnungskoeffizienten bewährt.

Die Preßdichtungen finden bei Glasgefäßen kaum praktische Verwendung, wohl aber bei Eisengleichrichtern in Verbindung mit Porzellan. Jede Dichtung hat ihre Vor- und Nachteile, immerhin hat die Praxis bewiesen, daß Gleichrichtergefäße bei günstiger Beanspruchung bis zu 100000 Betriebsstunden ihr Vakuum behielten. Jedoch ist dies nicht der Durchschnitt, dieser dürfte nach den Angaben der einzelnen Herstellerfirmen etwa 20000 bis 30000 Stunden betragen. Nach *W. Espe* und *M. Knoll* sind Abweichungen der Ausdehnungskoeffizienten zwischen Glas und Metall von etwa 10% zulässig, ohne daß ein frühzeitiges Eindringen von Luft und Gasen zu erwarten ist.

Im Bild 14 sind einige Vergleichskurven verschiedener Metalle und Glasarten dargestellt. Sie lassen erkennen, daß es praktisch unmöglich ist, ein Metall zu finden, das bis zu etwa 300° in jedem Temperaturzustand die gleiche Ausdehnung wie das umgebende Glas hat. Bild 15 zeigt noch genauere Vergleichskurven von dem Verlauf der Ausdehnung bis zu 550° bei der Erhitzung von Molybdän und entsprechenden Glassorten. Die Ausdehnungen sind bis zu 150—200° gleich, darüber hinaus weichen die Werte mehr oder weniger ab. Die Kurven lassen erkennen, daß Molybdän in Verbindung mit dem Jenaer Glas bis etwa 300° eine praktisch gute Dichtung darstellt.

Die Ausdehnung der Gläser steigt im ersten Teil der Kurven ungefähr linear mit dem Metall an. Bei der Erreichung des sogenannten Transformationspunktes ändern sich die Gläser stärker, doch werden Temperaturen von

¹⁾ Von *F. Lauster* zusammengestellt.

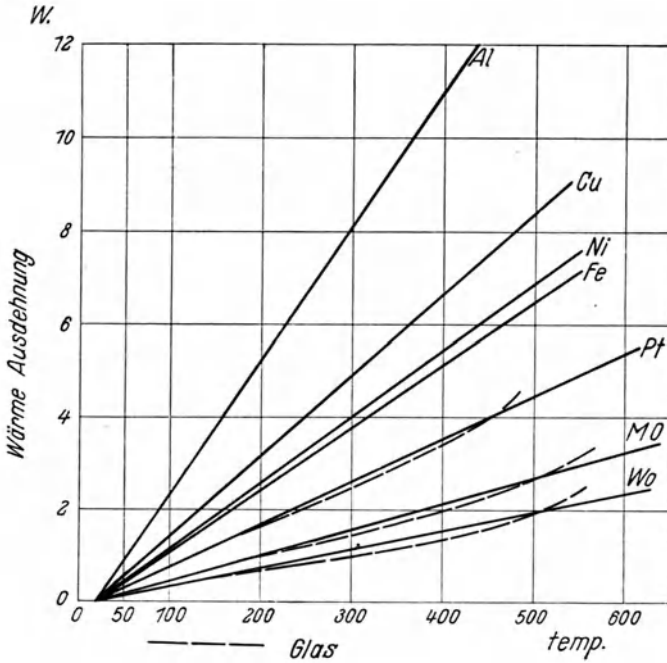


Bild 14. Verlauf der Wärmeausdehnung einiger Metalle und Gläser.
(Aus Fr. Hellmuth, „Der Argonal-Gleichrichter“, Leipzig 1933)

400 bis 500° im Betriebe nicht erreicht, so daß sie nur für die Herstellung im Glaswerk von Interesse sind. Bild 16 ¹⁾ zeigt in einigen Phasen die Herstellung einer Verschmelzung, die durch Aufwickeln eines nahezu flüssig gehaltenen Glasstabes auf den Metallstift erfolgt. Nur bei kleinen Stiften

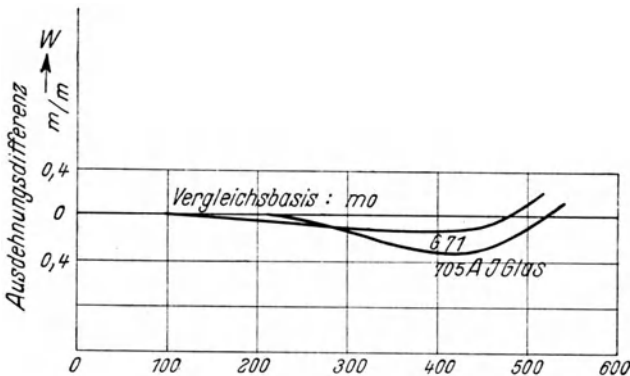


Bild 15. Verlauf der Wärmeausdehnung zweier Glassorten im Verhältnis zu Molybdän.
(Aus Espe u. Knoll, Berlin, Jul. Springer, 1936)

¹⁾ Fr. Hellmuth, Der Argonal-Gleichrichter, 88 S. Leipzig, Hachmeister & Thal, 1933.

für Glühlampen und Rundfunkröhren wird die Dichtung durch Pressen oder Quetschen (Quetschfuß) erreicht. Die senkrechte Glasscheibe Bild 16 c wird mit dem Glasarm des Gleichrichtergefäßes verschmolzen. Es wird nicht immer die gleiche Glassorte für die Verschmelzungsstelle und den eigentlichen Glaskörper verwendet, sondern man benutzt häufig sogenannte Zwischengläser, die zwar eine gute Metallverbindung eingehen, aber weniger gut zum Herstellen großer Gefäße geeignet sind. In diesem Falle wird der Glasring mit einer anderen Glassorte verschmolzen, die den Anodenarm bildet.

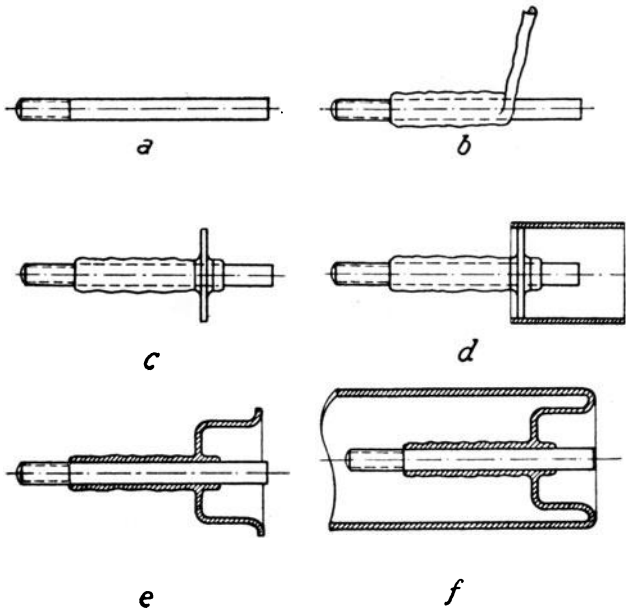


Bild 16. Herstellung einer gewickelten Einschmelzung (Hellmuth)

Mehrere Herstellerfirmen verwenden eine Stifteinschmelzung nach Bild 13 1, bekannt ist die von Schott¹⁾ verwendete Molybdän-Glasverschmelzung. Gut bewährt hat sich auch die Topf- oder Kappeneinschmelzung²⁾. Diese wird nach Bild 13 '5 so hergestellt, daß die Kappe an ihrem oberen Rand sehr dünn gehalten ist. Das Glas wird nur mit diesem dünnen Rand verschmolzen. Mit dem wesentlich stärkeren Boden verbindet man durch Schweißen oder Löten die Stromzu- und -ableitung.

Die Stifteinschmelzungen müssen so hergestellt sein, daß im Betrieb beim Ausdehnen und Schrumpfen keine Zug- oder Druckspannungen entstehen können, denn es ist einleuchtend, daß der Stift beim Ausdehnen oder Schrumpfen in der Längsrichtung (Axialdruck) stärker arbeitet

¹⁾ G. W. Müller, AEG.-Mitt. 1922, H. 5/6.

²⁾ BBC., G. G. B. 3, S. 930, 5000, S. 13.

als in der Querrichtung (Radialdruck). Hinzu kommt noch, daß der Metallstift beim Inbetriebnehmen kalter Gefäße durch die Stromwärme früher erwärmt wird, als das den Stift umgebende Glas. Daher wählt man oft trotz sorgfältiger Kühlverfahren die Ausdehnung des Glases etwas kleiner als die des Metalls, damit sich das Glas beim Abkühlen nach dem Ver-

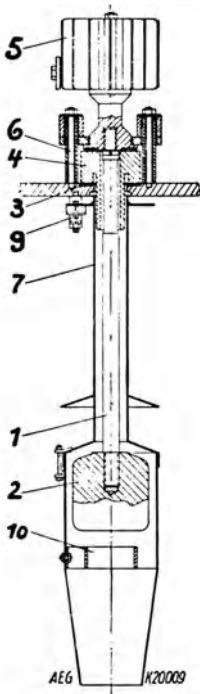


Bild 17. Anode.

- 1 Anodenhalter, 2 : Graphitanode,
- 3 - Rippenkühler, 4 Anodenisolator,
- 5 - Ribbenkühler, 6 - isolierte Befestigungsbolzen, 7 Anodenschutzrohr,
- 9 - Porzellanisolatoren, 10 - Graphit- oder Eisenkörper zur Beseitigung der positiven Raumladung

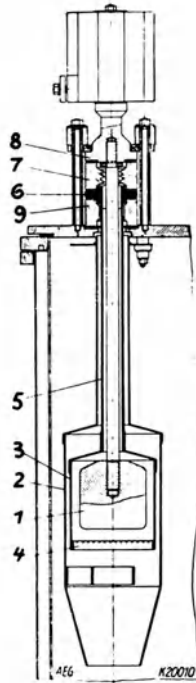


Bild 18. Anode mit Steuergitter.

- 1 Graphitanode, 2 : äußeres Anodenschutzrohr, 3 inneres Anodenschutzrohr, 4 - Steuergitter, 5 : rohrförmige Stromzuführung zum Steuergitter, 6 Anschlußring für die Stromzuführung zum Steuergitter, 7 oberer Isolator, 8 Anoden-Stromzuführung, 9 unterer Isolator

schmelzen weniger zusammenzieht als das Metall¹⁾. Nach einer anderen Auffassung sollen bestimmte Glassorten elastisch genug sein²⁾, um für das Glas einen etwas größeren Ausdehnungskoeffizienten wählen zu können als ihn der Metallstift hat.

Im Gegensatz hierzu kann der Ausdehnungskoeffizient des Metalls der Kappeneinschmelzung stärker von der des Glases abweichen, wenn die Wand der Metallkappe so dünn gewählt ist, daß unter dem von der

¹⁾ Lauster, a. a. O.

²⁾ TWA. Osram 1936, S. 147.

Kappe ausgeübten Druck bei der Ausdehnung oder Schrumpfung das umgebende Glas nicht zerspringen kann. So ist Kupfer mit der Ausdehnung 165×10^{-7} mit Glas 90×10^{-7} verschmolzen worden. Diese sogenannten Anschmelzungen werden seit Jahren mit Erfolg für größere Senderöhren verwendet. Da hierbei in der Nähe des Schmelzrandes Kühlwasser fließt, wird dieser thermisch nur gering beansprucht, im Gegensatz zu den Anodenverschmelzungen der Glaskörper, die im Betrieb mehr als 1000° erhitzt werden. Daher verwendet man für Gleichrichtergefäße Kappen aus Nickeleisen, da dieses der Ausdehnung der Glassorte besser angepaßt ist, um das allzu große Arbeiten des Kappenmaterials während der Dehnung und Schrumpfung zu vermeiden.

c) Die metallische Stromeinführung in metallische Stromrichtergefäße mit einem Isolierstoff als Zwischenglied

Für Eisengleichrichter, die mit einer Vakuumpumpe ausgerüstet sind, werden im allgemeinen Preßdichtungen verwendet.

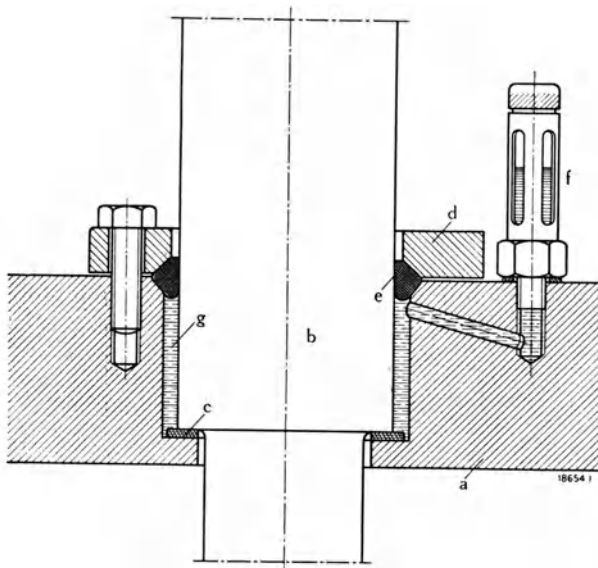


Bild 19. Quecksilberdichtung. *a* Gefäßdeckelanodenplatte, *b* Durchführungsisolator, *c* - Asbestring, *d* - Flansch, *e* Gummiring, *f* Quecksilberstandanzeiger, *g* Quecksilber (BBC.)

In den Bildern 17 bis 19 sind Querschnitte einiger Eisengleichrichterdichtungen verschiedener Firmen ¹⁾ gezeigt. Viel verwendet wird Gummi, der mit Hilfe von vorgelagerten Eisenringen gegen die schädliche Einwirkung

¹⁾ *L. Lebrecht*, AEG.-Mitt. 1934, H. 1 u. 2.

von Hg-Dämpfen geschützt ist. Auch verwendet man (Bild 19) Asbestringe, die an der Außenseite von einem mit Hg gefüllten Becken umgeben sind, wobei das Hg die Aufgabe hat, die noch im Asbest vorhandenen feinen Poren zu

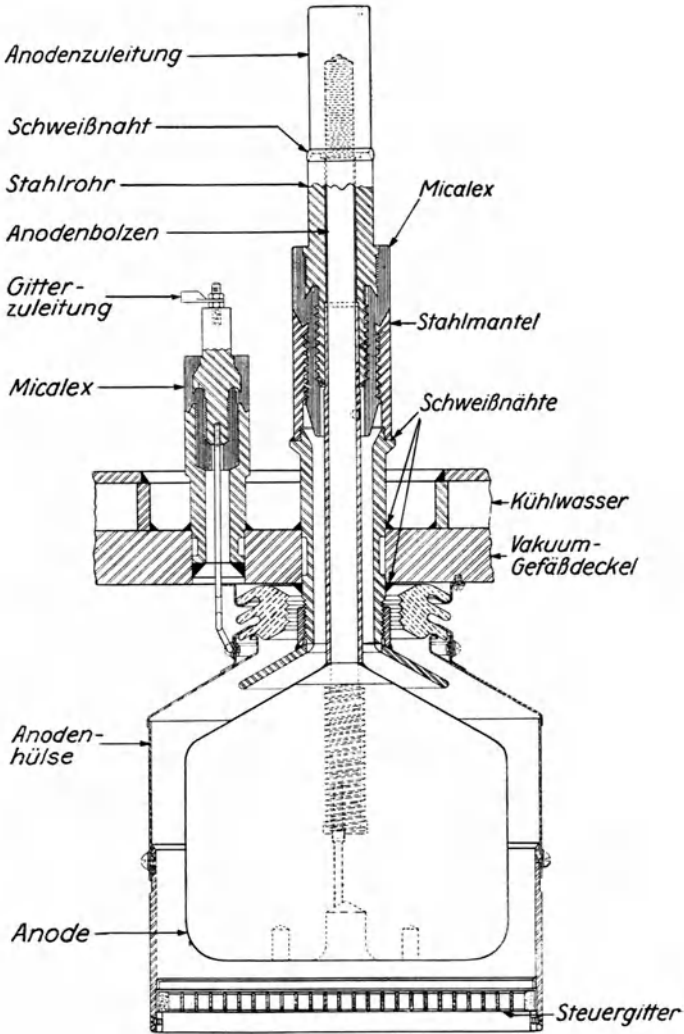
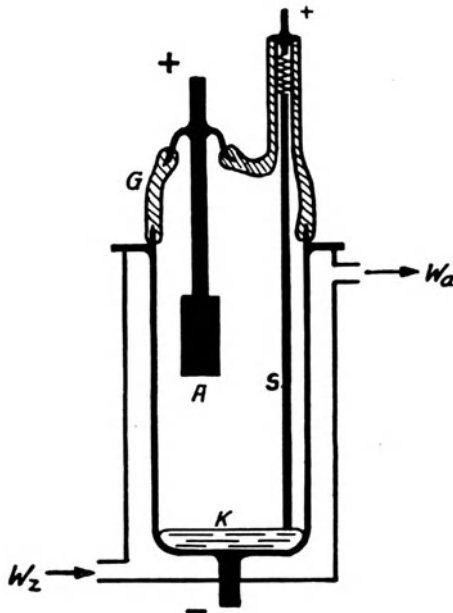


Bild 20. Schnittzeichnung Mikalexichtung. (GEC. — USA.)

schließen. Ein an der Seite des Gefäßes sichtbares Rohr, ähnlich einem Wasserstandsglas, gestattet eine Kontrolle der Dichtung. Wenn sich der Hg-Spiegel senkt, ist dies ein Anzeichen für ein Undichtsein der Asbestscheibe. Dann wird entweder neues Hg nachgefüllt oder die Asbestscheibe

erneuert. Die verwendeten Gummisorten sind bis etwa 80°C für die Vakuumtechnik brauchbar.

Eine Dichtung eigener Art ist die Mikalexichtung, sie besteht (Bild 20) aus eisernen Formstücken. Zwischen diese wird der aus 50% Glimmermehl und 50% Bleiborat bestehende Isolierstoff mit hohem Druck, bei einer Temperatur von 700 bis 800°, gepreßt. Durch die Erhitzung entsteht eine breiige Masse, welche sich bei dem hohen Druck innig mit den Eisenteilen verbindet. Das



A = Anode, *K* = Kathode, *G* Glasisolierung,
S Zündnadel, *W_z* Wasserzufluß,
W_a Wasserabfluß

Bild 21. Eisengleichrichter mit Glasverschmelzung
 und Wasserkühlung (Philips)

Eisen und der Isolierstoff haben etwa die gleiche Ausdehnung. Die in einem besonderen Fabrikationsprozeß hergestellte Verbindung Eisen – Isolierstoff (Mikalex) Eisen wird mit den Eisenteilen des Gleichrichtergefäßes verschweißt oder durch Flanschen auswechselbar verschraubt.

Im Laufe der Jahre sind Versuche mit den verschiedensten Materialien ausgeführt, unter anderem mit Bleiringen, auch wurden aufgeschliffene Flächen mit Aluminiumringen als Zwischenlage benutzt. Doch eine ideale Dichtung, wie die einer Verschmelzung, ist mit der Preßdichtung kaum erreichbar und auch nicht erforderlich, weil die Vakuumpumpe geringe eindringende

Luftmengen neben anderen im Betriebe frei werdenden und eindringenden Gasen absaugt.

Die pumpenlosen Eisengleichrichter dagegen werden wie Glasgefäße nur einmal im Fabrikationsprozeß gründlich evakuiert und müssen dann

Jahre hindurch ihr Vakuum halten, wobei Voraussetzung ist, daß durch die Eisenwände keine Gase eindringen. Eine Glas-Eisenverschmelzung¹⁾ zeigt Bild 21. Die in diesem erkennbare Verbindung Eisen—Glas—Eisen erfordert eine Verschmelzung des Glasrohres *G* an beiden Rohrenden. Der Glasrohrstutzen hat demnach die Aufgabe, den Anodenstutzen zu tragen und den Stromübergang zu isolieren.

Für größere Eisengefäße sind mechanisch fester gefügte Verschmelzungen am Platze, weil sich harte Stöße beim Transport nicht vermeiden lassen. Man wählt

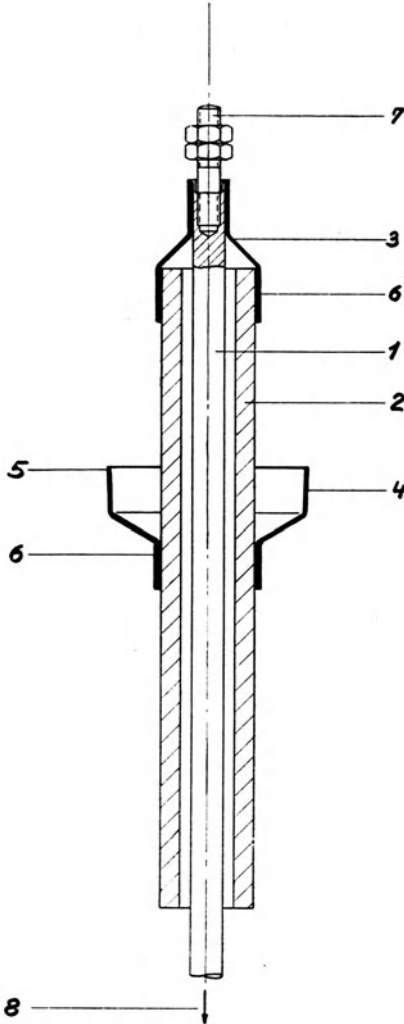


Bild 22.

Eine Eisen-Keramikverschmelzung einer Hilfs-elektrode (J. Pintsch).

- 1 - Stromzuführungsleiter, 2 Steatitrohr,
- 3 Anschlußkappe, 4 Schweißkragen,
- 5 Schweißrand, 6 Verschmelzungsstelle
- 7 Stromanschluß, 8 - zur Anode

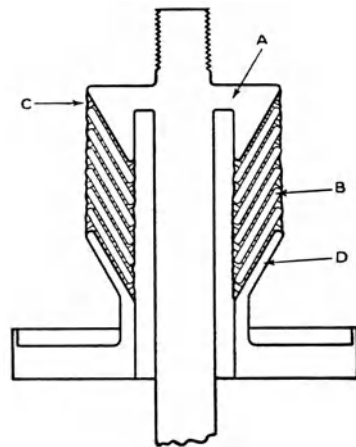


Bild 23.

Querschnitt einer gepreßten Verschmelzung an Eisengleichrichtern (GEC. London).
A Anodenanschluß, *B* Zwischen-scheiben, *C* Emaillie, *D* untere Eisenkappe

¹⁾ Philips T. R. 1936, März.

hierzu meistens vakuumdichte keramische Isolierkörper. Die in den Tabellen 1 bis 3 angegebenen Zahlen lassen erkennen, daß sich Steatite für Verschmelzungen mit Eisen gut eignen. Die beiden zu verbindenden Teile werden beispielsweise galvanisch oder thermisch mit einer Metallschicht überzogen, dann werden diese aneinandergesetzt und der Zwischenraum mit flüssigem Metall oder anderen Schmelzen angefüllt¹⁾. Das Galvanisieren geschieht beispielsweise in der Weise, daß der Isolierstoff zuerst mit einer Platinchlorwasserstoffsäure bestrichen wird. Die so entstehende dünne leitende Schicht wird später elektrolytisch verstärkt²⁾. Es wurden auch bestimmte Lötverfahren vorgeschlagen, um den Isolierstoff zu metallisieren. Die Technik kennt heute Mittel genug, um Steatit mit einem Metall vakuumdicht zu verbinden.

Bild 22 zeigt eine Dichtung, bei der die keramischen Bauteile lediglich auf Axialdruck beansprucht werden. Die Verschmelzung des Eisens mit dem im Bilde erkenntlichen Steatitrohr erfolgt mit Emaille oder Glas bei hohen Temperaturen. Im Bild 23 ist eine Ausführung einer stark auf Flächen- druck beanspruchten Dichtung gezeigt. Es werden mehrere Eisenplatten *c* mit Emaillezwischenschichten im erhitzten Zustand aufeinandergepreßt, wobei auch eine Gitterzuleitung isoliert von den anderen Eisenscheiben eingeführt werden kann. Die fertiggestellten Verschmelzungen werden mit dem Eisengefäß verschweißt. Die Alstohm-Paris³⁾ verwendet ähnliche Verschmelzungen. Um die Anoden gelegentlich herausnehmen zu können, wird von ihr der Schweißbrand als Flansch ausgebildet und mit dem Vakuumgefäß verschraubt.

d) Die Stromrichtergefäße aus Glas mit flüssiger Kathode (Quecksilberdampf-Glasgleichrichtergefäße)

Ein Gleichrichterglaskörper besteht aus mehreren Einzelteilen, Bild 24, die nach bestimmten Richtlinien aneinandergesetzt werden müssen. In der Glasbläserei erfolgt die Zusammensetzung sämtlicher Einzelteile. Dieses Zusammensetzen geschieht durch Verschmelzen der zusammengehörenden Glasteile und ist mit einem Schweißprozeß vergleichbar. Es erfordert eine große Erfahrung und Geschicklichkeit der Glasbläser. Das Erhitzen der Glasteile wird bei Schmelztemperaturen bis 500⁰ mit einfachen Leuchtgasflammen ausgeführt und bei höheren Temperaturen mit Wasserstoff-Sauerstoffgebläsen. Es ist selbstverständlich, daß in der Glashütte beim Mengen der Einzelbestandteile des Gemisches äußerste Vorsicht angewendet wird, damit das Glas für eine gute vakuumdichte Verbindung mit dem Metall den richtigen Ausdehnungskoeffizienten erhält. Bei der Herstellung der

¹⁾ VDE.-Fachbericht 1935, S. 82- 84; A. Siemens, ETZ. 1939, H. 9.

²⁾ Espe u. Knoll, S. 353.

³⁾ Bulletin de la S. A. d. C. M. 1928, H. 21 '22 und ETZ. 1929, H. 25.

Gefäße muß vermieden werden, daß Handschweiß an die Innenflächen gelangt. Um die bei der Herstellung entstandenen Glasspannungen infolge nicht ganz gleichmäßiger Abkühlung der einzelnen Wandflächen zu beseitigen, müssen die Einzelteile und der fertige Körper im Glühofen erhitzt und langsam abgekühlt werden. Für den Anschluß der Vakuumpumpe erhält das von der Außenluft abgeschlossene Gefäß den sogenannten Pumpstutzen. Dieser wird am Kondensraum oder an einem der Anodenarme vorgesehen.

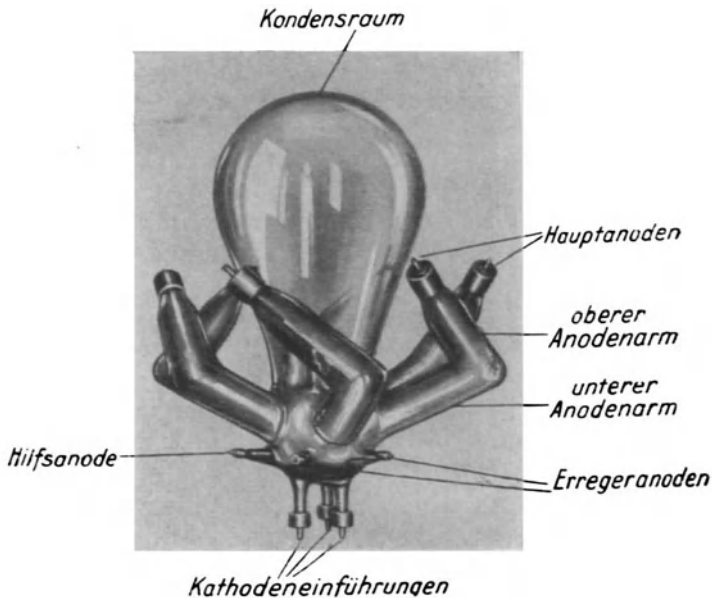


Bild 24. Ein Glasgefäß für Quecksilberdampfgleichrichter

e) Das Evakuieren oder Entgasen

Nach der Fertigstellung in der Glasbläserei gelangt der Körper in den Pumpraum und wird durch ein vakuumdichtes Rohr oder Schlauch mit der Hochvakuumpumpe in Verbindung gebracht. Diese arbeitet in gleicher Weise wie beim Eisengleichrichter gegen ein Zwischenvorvakuum von etwa 15 Torr, das durch eine rotierende Vorvakuumpumpe aufrechterhalten wird. Die Füllung mit Hg erfolgt durch Destillation, um möglichst viel Fremdkörper aus dem Hg zu entfernen. Die Hg-Menge liegt durch Erfahrungswerte fest. Sodann wird das Gefäß an einen Transformator in einer üblichen Gleichrichterschaltung angeschlossen und mit großem Strom belastet. Der Transformator erhält eine niedrige Spannung, um Stromkosten während des Auspumpens zu sparen. Der Pumpprozeß muß über viele Stunden ausgedehnt werden, um

die Restgase aus dem Quecksilber, den Anoden und die haftenden Luftblasen von den Glaswänden möglichst vollständig abzupumpen. Würde beispielsweise das Innere des Gefäßes in nur kurzer Zeit entleert und der Pumphahn geschlossen, so entsteht bald wieder ein Gasdruck, weil die Gasreste von den Wänden und aus den Elektroden noch nicht genügend entfernt sind. Dieser Prozeß wird auch mit Entgasen, Ausheizen oder Reinigen bezeichnet. Nach genügend erfolgter Evakuierung wird der Pumpstutzen am Gefäß abgeschmolzen, wobei gleichzeitig eine Verschmelzung der Pumpöffnung stattfindet. Während des Pumpens entsteht ein ständiges Druckgefälle von den gasabgebenden Teilen nach dem Pumpstutzen, bis die Gasreste weitgehendst ausgetrieben sind.

Zur Unterstützung der Gasabgabe und des Reinigungsprozesses wird das Gefäß in einen Heizkasten gesetzt, der auf mehrere hundert Grad Innentemperatur erhitzt werden kann.

Der untere Teil des Gefäßes wird zweckmäßig noch durch Gasflammen erwärmt, um die Restgase im Hg freizumachen. Die Belastung wird allmählich bis auf etwa 50°, Überstrom eingestellt, wobei auch die Anoden übermäßig erhitzt werden. Sodann bleibt der Gleichrichter mit dieser Belastung und ständiger zusätzlicher Heizung bis zu 24 Stunden und mehr in Betrieb, wobei die Pumpen ununterbrochen arbeiten.

Das Ausheiz- und Pumpverfahren wird auch bei den mit Pumpen ausgerüsteten Eisengleichrichtern verwendet, denn es ist für Vakuumgefäße unerlässlich. Bei Eisengefäßen mit temperaturempfindlichen Dichtungen (Gummi-Blei) wird die Ausheiztemperatur nicht so hoch getrieben, doch die am Gefäß fest angebauten Vakuumpumpen gestatten auch die Entfernung später im Betriebe frei werdender Fremdgase. Zum Ausheizen der Steuergerichte, die in der Nähe der Anoden sitzen und nur mit geringen Strömen belastet werden können, wird ein außen am Gefäß in Form einer Wicklung angebrachter Hochfrequenzkreis benutzt, durch den innen befindliche Metallteile glühend werden. Ähnlich verfährt man bei den Glühkathodengefäßen mit oder ohne Gas- bzw. Dampffüllung.

Nach der Evakuierung und Verschmelzung des Pumpstutzens erfolgt die Prüfung der Gefäße bei den üblichen Netzspannungen auf ihre Brauchbarkeit für den praktischen Betrieb. Gefäße, die nicht genügend ausgeheizt und evakuiert sind, zeigen nach einiger Zeit eine Verschlechterung des

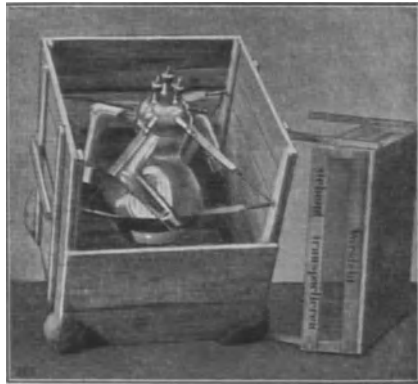


Bild 25. Verpackung in Spezialverschlägen mit allseitig federnder Aufhängung (AEG.)

Vakuums und neigen zu Rückzündungen. Bei dem Reinigungsprozeß muß die peinlichste Sauberkeit beachtet werden. So dürfen beispielsweise keine fremden Gase oder Öle in das Innere gelangen. Die kleinsten Spuren von Öl oder Wasser stören die Ventilwirkung. Um die an den Glaswänden haftende Luft während des Evakuierens besser losreißen zu können, wurde versucht, die Gefäße mit Wasserstoff auszuspülen, wodurch unter Umständen eine Erleichterung des Pumpprozesses erreichbar ist. Doch ist auch die unmittelbare Evakuierung sicher, wenn sie lange genug durchgeführt wird. Eine lange Pumpzeit ist in jedem Falle von Vorteil für die Reinigung der Anoden und des Quecksilbers, denn bestimmte Fremdkörper scheiden erst nach langer Zeit aus, bei entsprechend hohen Temperaturen. Hierbei ist zu beachten, daß Graphit bei Zimmertemperatur den Sauerstoff der Luft und andere Gase gierig aufsaugt. Diese lassen sich nur durch vielständiges Glühen bei hohen Temperaturen aus den feinen Poren des Graphits entfernen. Restlos lassen sich die Fremdgase wohl nie entfernen, doch je höher die Temperatur beim Ausheizen gehalten wird, desto mehr werden die Fremdgase ausgetrieben.

f) Die Vakuumprüfung der Glasgefäße

Eine Vakuumkontrolle ermöglicht die Hochspannungsdurchschlagsprüfung mit einem Funkeninduktor (Teslatransformator) und die Rückstrommessung. Die bei Eisengefäßen üblichen Meßanordnungen wurden bisher für Glasgefäße nicht benutzt. Vielfach werden die Gefäße auch durch Inbetriebnahme in Betriebsschaltung geprüft, doch diese Methode ist bei größeren Lagerbeständen zeitraubend.

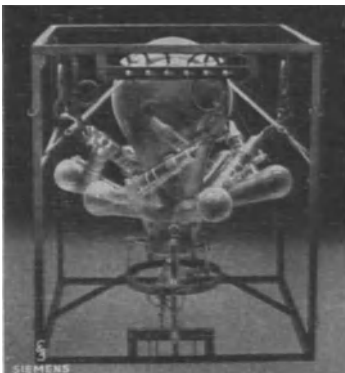


Bild 26. Stromrichtergefäß im Einbaukäfig (SSW.)

Die Schlagweitenprüfung läßt sich noch unmittelbar vor dem Versand in den Transportbehältern durchführen. Es werden in einfacher Weise zwei Leitungen der Hochspannung an die Anoden des Glaskörpers gelegt. Beim Einschalten des Teslatransformators, der bei hoher Periodenzahl Spannungen von einigen 100000 V erzeugt, entsteht eine charakteristische Schlagweite der Funkenstrecke, die als Maß für die Güte des Körpers zugrunde gelegt wird. Doch nicht allein die Schlagweite, sondern auch die Farbe des durch die Entladung

im Gefäßinnern erzeugten Lichtes ist maßgebend. Dieses soll eine bläulichweiße Färbung haben, wie ein Gleichrichter sie im normalen Betrieb zeigt.

g) Fertige Glasgefäße mit Hg-Kathode

Um die verhältnismäßig großen Glasgefäße, die bei 500 A eine Höhe von über 1 m haben, auch sicher an den Gebrauchsort transportieren zu können, sind besondere Transportbehälter mit einer innen sitzenden, allseitig federnden Aufhängung konstruiert worden. Bild 25 zeigt einen geöffneten Holzbehälter und läßt die federnden Haltegeräte erkennen. Eine andere

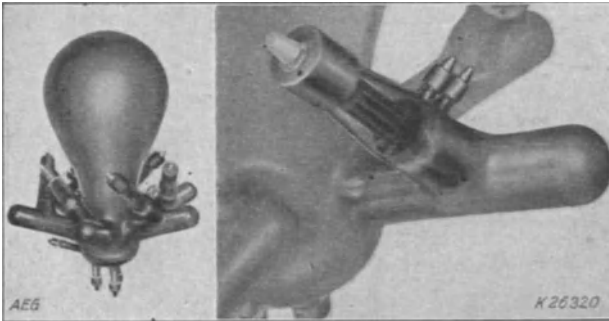


Bild 27. Ein sechsarmiger Glaskörper mit Steuergittern 500 A.
(Rechts eine Vergrößerung eines Anodenarmes mit dem Steuergitter und Gitteranschluß)

Art ist die Befestigung der größeren Glaskörper in Eisenrahmen, Bild 26. Diese werden am Erstellungsort mit dem festsitzenden Glaskörper in die Gleichrichtergerüste gesetzt. Die Glasgefäße sind auch in den Eisenrahmen federnd aufgehängt.

Einige gebrauchsfertige Stromrichterglaskörper mit eingebauten Steuergittern verschiedener Herstellerfirmen sind in den Bildern 27 bis 34 dargestellt.

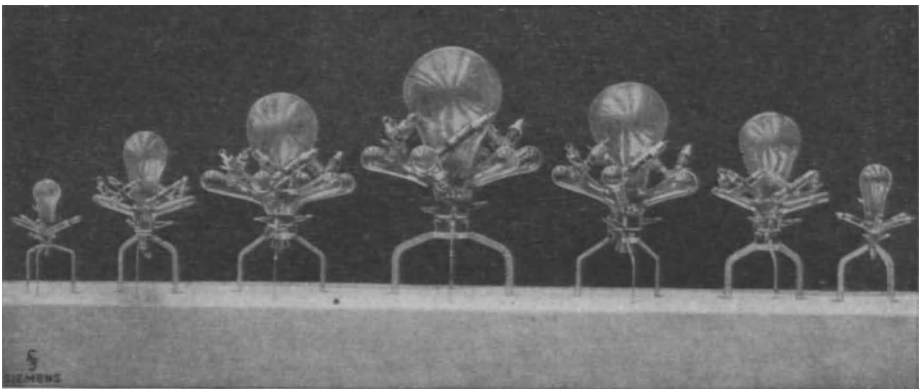


Bild 28. Verschiedene Größen sechsarmiger Glasstromrichtergefäße

Auf den ersten Blick sehen sich die Glaskörper aller Firmen mehr oder weniger wohl ähnlich, doch bei genauer Betrachtung bestehen Unterschiede in der äußeren Form, die teils durch die Art der Anodeneinführung, teils

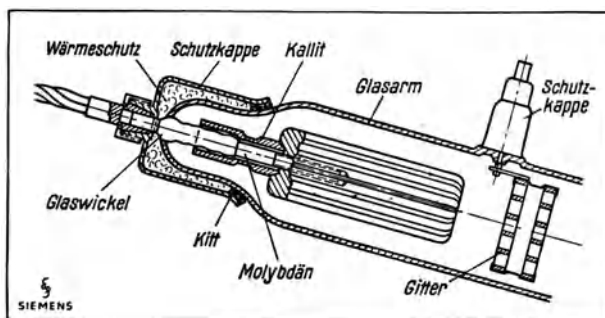


Bild 29. Schnitt durch einen Anodenarm mit Steuergitter



Bild 30. Ein Glaskörper für 500 A mit keulenartigen Unterarmen (BBC.)

auch durch die Kühlung und Anodenarmausführung begründet ist. Auffallend sind auch die keulenartigen Erweiterungen der Anodenarme der Bilder 30 bis 33. Die Einwirkung der Anodenarmformen auf den Gleichrichter-vorgang ist im Abschnitt 5 erläutert.

3. Die Zündung und Erregung der Stromrichter

Die flüssige Kathode dient nicht nur zur Lieferung der Elektronen, sondern sie erzeugt gleichzeitig und zwangsläufig den für die Ventilwirkung erforder-

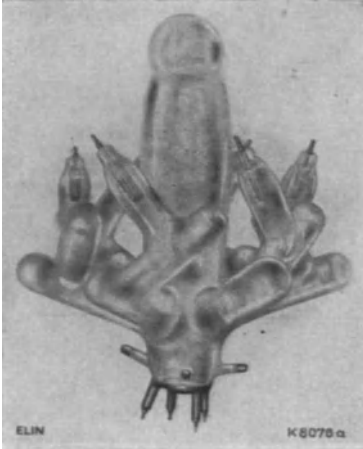


Bild 31.
Ein Glasgefäß mit zweifach geknickten Anodenarmen und zweifachen Armverlängerungen, für höhere Spannungen

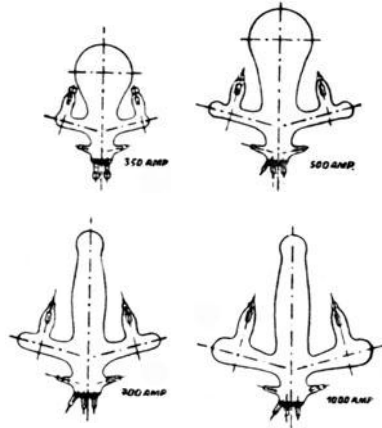


Bild 32.
Querschnitt von Glaskörpern in den Größen von 350—1000 A (ELIN., Wien) ¹⁾



Bild 33. Ein Glasgefäß. (Von ELIN. mit 1000 A angegeben)

¹⁾ Im Schrifttum sind keine einheitlichen Angaben über den Begriff der Belastung (Dauerlast oder Spitzenlast) zu erkennen. Vgl. Bild 80.

lichen Quecksilberdampf, der sich während des Betriebes ständig erneuert. Dieser Vorgang muß durch eine Zündung eingeleitet werden. Zu diesem Zwecke wurden Glas- und Eisengleichrichter von jeher mit einer Zündanode ausgerüstet. Eine jederzeit betriebssichere Zündung ist für den Gleichrichter unerlässlich, daher wurden auch im Laufe der Jahre immer wieder neue Zündverfahren eingeführt, die eine alte, nicht bewährte Zündung ersetzen oder verbessern sollten. Es erscheint daher notwendig, die verschiedenen Zündverfahren zu erläutern.

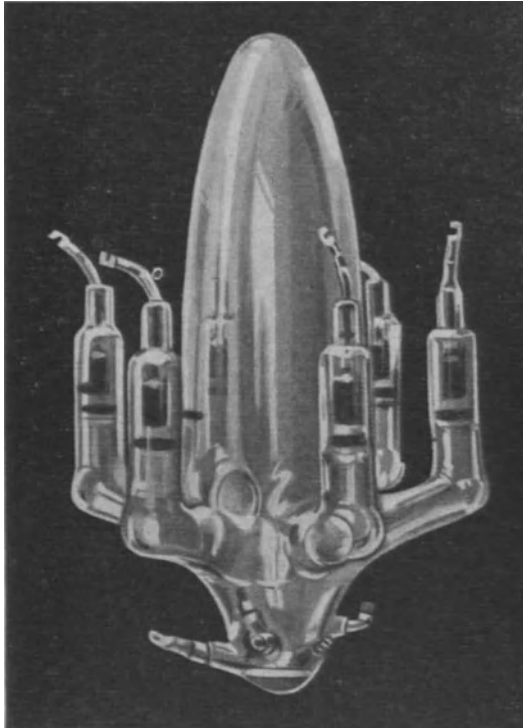


Bild 34. Ein Glaskörper mit senkrecht nach oben führenden Armen und erkennbaren Steuergittern (Hewittie, Paris)

a) Die Erregung der Stromrichtergefäße

Im engsten Zusammenhang mit der Zündung steht die Fremd- oder Hilfs-erregung. Dies ist ein kleiner, in sich über Drosselpulen oder Widerstände kurzgeschlossener Gleichrichterkreis, dessen Stromverlauf dem der normalen Gleichrichter entspricht. Durch die Verwendung der Erregerdrossel-spulen d , Bild 35, wird ein wattloser Stromverbraucher in den Kurzschluß-kreis geschaltet, um den Stromverbrauch zu verringern. Bei in Betrieb

befindlichen Gleichrichtern vereinigt sich der Kathodenfleck der Erregung mit dem des Hauptstromes.

Mit Ausnahme einiger Spezialausführungen werden die Hg-Stromrichter heute mit einer solchen Erregung ausgerüstet, die vom betriebstechnischen Standpunkt aus betrachtet mit der Glühkathode an Glühkathodenstromrichtern vergleichbar ist, denn beide Stromrichterarten sind betriebsbereit, wenn die Glühkathode erhitzt oder wenn der Erregerstromkreis mit Hilfe

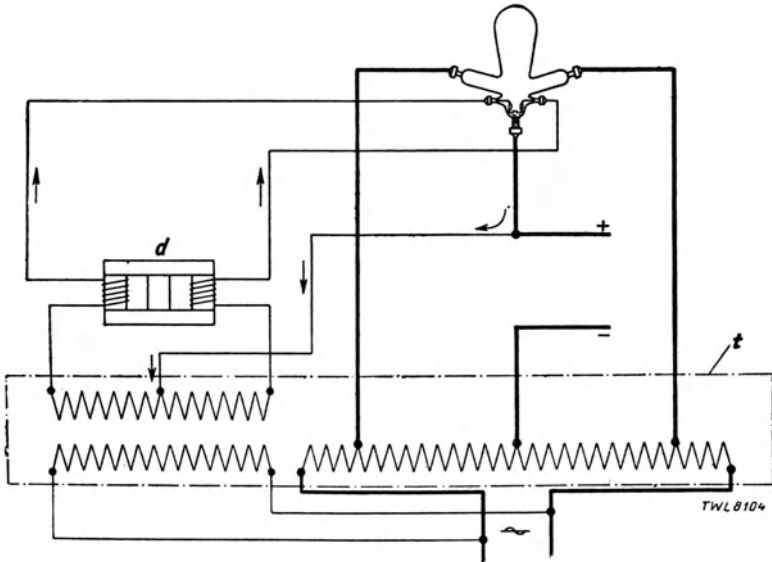


Bild 35. Prinzipschaltung der Hilfs- oder Fremderregung
t = Transformatoren, *d* = Erregerdrosselspulen

der Zündanode eingeschaltet ist. Vor der Einführung der Erregung erfolgte die Inbetriebsetzung der Hg-Gleichrichter in der Weise, daß zuerst ein Hilfsbelastungskreis eingeschaltet wurde, der für einen größeren Gleichstrom bemessen war als der Minimalstrom des Gefäßes. Dieser beträgt bei Raumtemperatur und ohne künstliche Kühlung etwa:

für 5 A Gefäße	3 A
10 A „	3,5 A
25 A „	4 A
40- 60 A „	6 A

und darüber hinaus 4 bis 8% der Nennstromstärke. Der Minimalstrom ist in seiner Größe von der Dampfdichte und somit von den Kühlverhältnissen der Gefäße abhängig. Durch künstliche Kühlung wird der Minimalstrom größer und bei ausgeschalteter Kühlung kleiner. Aus den Zahlen geht hervor, daß bei kleineren Belastungen durch den Widerstand wohl ein beträchtlicher Stromverlust mit in Kauf genommen werden muß, doch läßt sich der Hilfs-widerstand bei größeren Belastungen ausschalten, wodurch der Wirkungs-

grad verbessert wird. Aus diesem Grunde werden heute noch einige Kleingleichrichter nach dieser Schaltung ausgeführt, wobei zu berücksichtigen ist, daß die Hg-Gefäße weniger Elektroden erhalten und in der Herstellung billiger werden können. Im Bild 36 ist eine Gleichrichterschaltung ohne

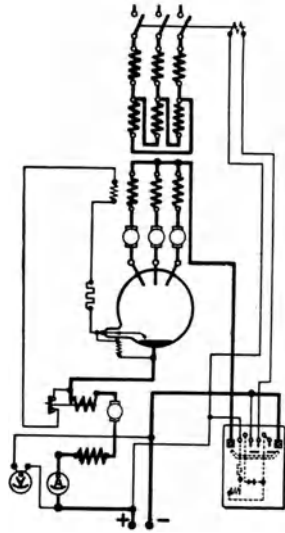


Bild 36. Gleichrichteraufbau ohne Erregung für selbsttätige Batterie-ladung mit rechts unten gezeichnetem Ladeschalter (S. 244)

Erregung gezeigt und im Bild 4 eine Schaltung mit Erregung und selbsttätiger Federzündung.

Auch der Erregerstrom erlischt unterhalb der Minimalstromgrenze. Die Werte für diesen sind jedoch wesentlich niedriger als bei den Stromkreisen der Hauptanoden, weil der Lichtbogenweg von den Erregeranoden nach der Kathode kürzer ist. Der Erregerstrom muß demnach so bemessen sein, daß der Minimalstrom des Erregerkreises um einen bestimmten Betrag überschritten wird, damit das Gefäß auch bei Raumtemperaturen unter 0°C noch sicher im Betrieb bleibt. In der Tabelle 4 sind die üblichen Erregerströme und Erregerleistungen angeführt.

Der Erregerstrom wird mit einem Gleichstrominstrument in der Erregerkathodenleitung Bild 35 gemessen. Während der Messung, die bei unbelastetem Gleichrichter erfolgen muß, schwankt der Instrumentenzeiger infolge der Unruhe des Kathodenflecks

um etwa $\pm 10\%$ hin und her, daher muß der mittlere Ausschlag zugrunde gelegt werden. Sobald die Belastung des Hauptstromkreises eingeschaltet wird, steigt der Erregerstrom an. Dieser Stromanstieg beträgt bei der Nennstromstärke etwa 10% und muß bei der Bemessung der Bauteile des Erregerkreises berücksichtigt werden. Der Stromanstieg entsteht durch den stärkeren Hg-Dampfdruck und die wachsende Ionisation bei größerem Strom, wodurch der Widerstand des Erregerlichtbogens geringer wird. Hin und wieder wird eine Gleichstromerregung und eine besondere Gleichstromquelle für den Erreger und Zündkreis verwendet. Die Zündanode

Tabelle 4

Gefäß A	Watt	E.-Strom A	Gefäß A	Watt	E.-Strom A
5	80	3,5	1000	300-350	10
10	90	4	2000	400-450	12
25	110	5	3000	500-600	15
40-60	120	5,5	4000	700-800	18
200-300	170	7	5000	800-900	20
100-150	140	6	6000	1000-1100	22
350-500	250-300	8	7000	1200-1400	25

besteht aus einem von außen mit Hilfe eines Magneten beweglichen Metallstift, der Zündnadel genannt wird. Der Magnet zieht beim Einschalten des Gleichrichters die Nadel aus dem Kathoden-Hg nach oben, wobei ein Lichtbogen entsteht, der zugleich den Erregerlichtbogen bildet. In dieser Anordnung können besondere Erregeranoden erspart werden. Der Gleichstromerregerkreis kann außerdem noch zum Speisen von Hilfseinrichtungen verwendet werden, beispielsweise zum Heizen der Hochvakuumpumpe.

Die Wechselstromzündung und Erregung besteht nach Bild 4 und 35 aus dem Erreger- und Zündtransformator, den Erregerdrosselspulen, Erregeranoden und dem Zündstromkreis mit Zündanode. Eisengleichrichter erhalten oft 3 Erregeranoden in einer Dreiphasenschaltung. Für einige Ausführungen werden auch 6 Erregeranoden verwendet, um die Phasenzündung zu erleichtern.

Bei gittergesteuerten Stromrichtern, die einen Gleichstrommotor speisen, wird der Erregergleichstrom hin und wieder für die Felderregung eines Motors verwendet. Eine Schaltung dieser Art erhöht die Betriebssicherheit eines Motorbetriebes, denn der Anker- und Feldstromkreis können von einem gemeinsamen Stromrichtergefäß gespeist werden.

b) Die Ausführung der Erregerdrosselspulen

Um an der Größe der Erregerdrosselspule zu sparen, werden für kleinere Glasgleichrichter verkettete Drosselspulenpaare verwendet, die in der Mitte, wie in Bild 35 angedeutet ist, ein Streujoch erhalten, damit gleichzeitig eine starke Überlappung der Erregeranodenströme entsteht. Auch werden für größere Gefäße zusätzliche Kathodenspulen im Erregerkreis verwendet¹⁾. Eine betriebssichere Erregung ist besonders wichtig, wenn Gleichrichter in Elektrizitätswerken des Nachts mit geringer Belastung arbeiten. Bei größeren Belastungen kann die Erregung ausgeschaltet werden, was auch mit Hilfe von stromabhängigen Schaltrelais ausgeführt ist. Die Handabschaltung der Erregung führte oft zu Störungen, wenn bei Stromabsenkungen im Hauptstromkreis die Erregung nicht rechtzeitig wieder eingeschaltet wird. Bild 114 zeigt eine Erregereinrichtung mit drei getrennten Drosselspulen. Die Spulen sind in die Anodenkreise und in den Kathodenkreis geschaltet. Im Gegensatz hierzu hat die Erregung von BBC. nach Bild 37 nur eine Kathodenspule 10 und für die Strombegrenzung einen Belastungswiderstand 9.

c) Die Erregerspannung und Erregerverluste

Um auch bei Spannungsschwankungen eine jederzeit betriebssichere Erregung zu erhalten, wird nach Erfahrungswerten für Gleichrichter bis 500 A im allgemeinen eine Erregeranodenwechselspannung von 50 bis 60 V, vom

¹⁾ Bild 244 zeigt eine Kombination von Anoden und Kathodenspulen auf einem gemeinsamen Eisenkern.

Nullpunkt des Erregertransformators an gemessen, zugrunde gelegt. Bei Gleichrichtern größerer Stromstärken bis zu 6000 A und mehr werden Erregeranodenspannungen bis zu 120 V verwendet. Der Lichtbogenverlust der Erregung ist bei den kleinsten Gefäßen 10 V und bei den größten etwa 20 V. Nach erfolgter Zündung bricht die Spannung der mit Anodendrosselspulen ausgerüsteten Erregerkreise auf diesen Betrag zusammen. Der

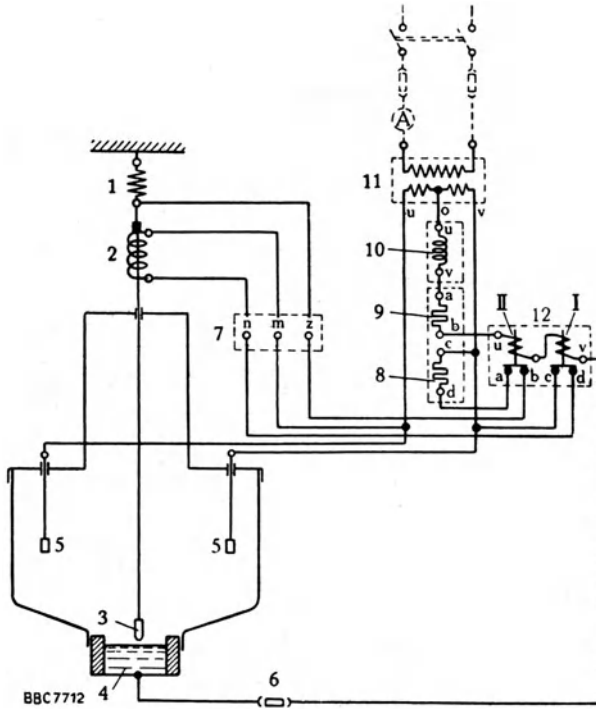


Bild 37. Schaltung der selbsttätigen Zünd- und Erregereinrichtung

1 = Feder, 2 = Zündspule, 3 = Zündanode, 4 = Kathode, 5 = Erregeranoden, 6 = Sicherung, 7 = Klemmbrett am Gleichrichter, 8 = Zündwiderstand, 9 = Erregerwiderstand, 10 = Erregerdrosselspule, 11 = Erregertransformator, 12 = Relaiskasten, I, II = Relais (S. 45)

Strom wird durch die Induktivität der Drosselspulen begrenzt. Die Spannung des Erregerkreises setzt sich demnach aus der Lichtbogenspannung und dem Scheinwiderstand der Drosselspulen zusammen. Der Verlust von beispielsweise 90 W einer einphasigen Wechselstromerregung eines 10-A-Gleichrichters besteht aus dem Lichtbogenverlust gleich 40 W und 50 W Verlust in den Drosselspulen. Der Aufwand an VA ist dagegen:

$$VA = \frac{2 \cdot U_e \cdot i_e}{\sqrt{2}} \dots \dots \dots (2)$$

gleich etwa 280 VA.

Die geringe Blindleistung von 190 W kann für die Bewertung der Gesamtleistung vernachlässigt werden. Für eine dreiphasige Erregung ist der Aufwand an

$$VA = \frac{3 \cdot U_e \cdot I_e}{\sqrt{3}} \dots \dots \dots (3)$$

und für die reine Gleichstromerregung mit Hilfe einer zusätzlichen Gleichstromquelle entspricht der Verlust dem Erregergleichstrom multipliziert mit der aufgewendeten Gleichspannung.

Die Erregerdrosselspulen erhalten im allgemeinen Wicklungsanzapfungen oder einen mit Hilfe eines Werkzeuges verstellbaren Eisenkernluftspalt. Der Erregerstrom kann mit diesen Einrichtungen nachträglich, den Betriebsverhältnissen entsprechend, verstellt werden.

d) Die Zündeinrichtungen

Die Zündeinrichtungen dienen zum Inbetriebnehmen der Stromrichter und sind nur kurze Zeit eingeschaltet. Daher kann der Stromverbrauch der Zündkreise bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit vernachlässigt werden. Aus der Fülle der im Laufe der Jahrzehnte entwickelten Zündeinrichtungen sollen nur die wichtigsten herausgenommen werden, denn nicht alle Ideen konnten in die Praxis eingeführt werden. Es werden in der Gleichrichtertechnik bewegliche Zündanoden verwendet bei feststehenden Gleichrichtergeräten oder feststehende Zündanoden, bei beweglichen Geräten die sogenannte Kippzündung. Die schweren Eisengefäße wurden von jeher mit beweglichen Zündanoden ausgerüstet, in neuerer Zeit haben auch Glasgefäße bewegliche Zündanoden. Eine dritte Ausführungsart bilden Zündungen bei feststehendem Gefäß und feststehender Zündanode mit Hochspannung, Kondensatorstoßzündung, Ignitronzündung, Zündungen durch Hg Verdrängung, Bimetallzündung usw.

Es ist Aufgabe einer jeden Zündung, so schnell wie möglich eine bestimmte Menge Hg zu verdampfen und Elektronen im Zündlichtbogenansatz auf dem Hg zu erzeugen, damit die Dampfstrecke nach den Erregeranoden ionisiert werden kann. Der Erregerkreis wird gleichzeitig mit dem Zündkreis eingeschaltet. Es muß nach Möglichkeit vermieden werden, nur mit Hg gefüllte Gefäße zu kalt einzuschalten¹⁾. Bei niederen Gefäßtemperaturen reißt die Erregung und Zündung einige Male ab, und die Zündanode muß längere Zeit arbeiten, ehe genügend Hg verdampft ist. Dies Abreißen der Lichtbögen hat bekanntlich Überspannungen im Gefolge, denn Hg-Elektroden haben eine außerordentlich kurze Schaltzeit. Nach dem Induktionsgesetz entsteht eine hohe Abreißspannung, die elektrisch isolierten Bauteilen gefährlich werden kann. So bestehen Hochspannungsstoßzündungen (Bild 47), die mit Hilfe eines Hg-Unterbrecherkontaktes aus 110 V Gleichspannung einen Spannungsstoß bis zu 20000 V erzeugen.

¹⁾ Vgl. S. 116.

Diese Spannung ist nach der Formel

$$e = L \frac{di}{dt} \dots \dots \dots (4)$$

um so höher, je kürzer die Schaltzeit ist. In dieser Formel bedeutet i den unterbrochenen Strom und t die Schaltzeit. Die gleichen Überspannungen entstehen bei zu kalten Gefäßen im Hauptstromkreis, wenn sie nicht vorgewärmt sind und zu früh eingeschaltet werden. Um zu vermeiden, daß der Hauptstrom beim Zünden durch den Zündkreis fließt, soll die Belastung erst nach erfolgter Zündung eingeschaltet werden. Der Zündlichtbogen hat nicht immer eine ausgeprägte Gleichrichterwirkung, so daß bei einer Fehl-

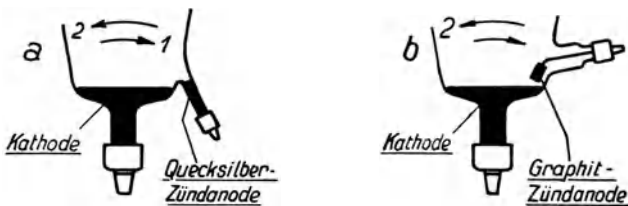


Bild 38. Kippzündungen

zündung die großen Betriebsströme Zerstörungen im Zündkreis verursachen können. Einige Firmen haben daher kleine Trockengleichrichter in den Zündstromkreis geschaltet, um Fehlzündungen zu vermeiden.

e) Die Kippzündung bei feststehender Zündanode

Ältere Glasgleichrichter wurden durch Kippen des Gefäßes gezündet. Im Bild 38 sind Ausführungsformen gezeigt. Das Gefäß *a* hat eine mit Hg gefüllte Zündanode und das Gefäß *b* einen von oben zugeführten Graphit- oder Wolframstift. Beim Kippen in der Pfeilrichtung 1 entsteht eine Berührung des Kathodenquecksilbers mit der Zündanode und beim Kippen in Richtung 2 wird der Zündlichtbogen gezogen. Die Kippbewegung läßt sich durch Handbetätigung oder durch einen Kippmagneten mit einem Gegengewicht selbsttätig ausführen. Es sind heute noch Gefäße dieser Art in Betrieb. Die Graphitanode Pos. *b* hat gegenüber der Hg-Elektrode den Vorteil, daß der Zündstrom sehr hoch eingestellt werden kann, wodurch die Zündung wesentlich sicherer wurde als bei der älteren Hg-Elektrode.

f) Die beweglichen Zündanoden

Diese werden für Glas- und Eisengleichrichter verwendet und zünden schneller als Kippzündungen. Sämtliche selbsttätigen Zündungen mit beweglichen Zündanoden sind so ausgeführt, daß die bewegliche Zündanode solange in das Hg ein- und wieder austaucht, bis der Erregerlichtbogen sicher brennt. Im Bild 39 ist die selbsttätige Zündeinrichtung eines Glaskörpers mit dem außen am Zündarm sitzenden Zündmagneten dargestellt.

Dieser zieht (Bild 4) beim Einschalten des Stromes den Eisenanker nach unten. Hierdurch taucht die Graphitzzündanode in das Hg ein, und die Zündspule K wird kurzgeschlossen. Der Strom ist durch den Widerstand L begrenzt. Jetzt zieht die Molybdämfeder den Zündstift wieder nach oben, wobei der Zündlichtbogen gezogen wird, so daß der Erregerstrom einsetzen kann. Der Erregergleichstrom wird durch die Spule des Unterbrecher-

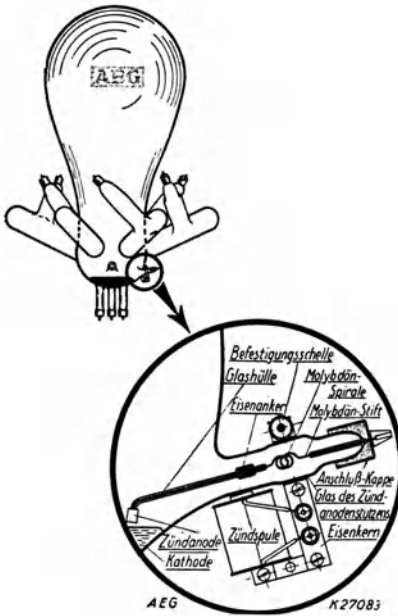


Bild 39.
Glasgefäß mit Federzündung

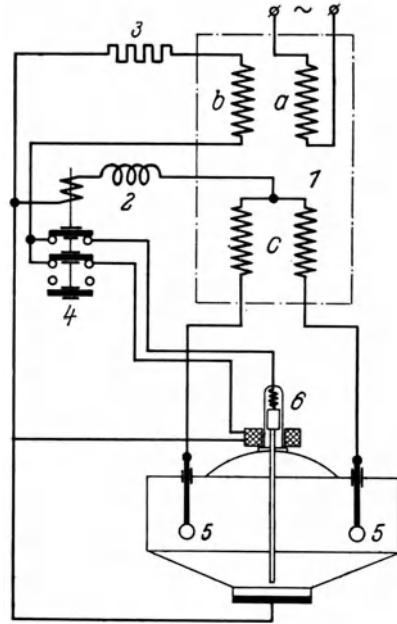


Bild 40. Eisengleichrichterzündung mit Streutransformator zur Vermeidung von Drosselspulen und Widerständen (ASEA., Schweden). 1. Einphasentransformator mit Primärwicklung a , Sekundärwicklung zur Zündung b , Sekundärwicklung zur Erregung c mit großer Streuwirkung gegen a . 2. Gleichstromdrossel für den Erregergleichstrom. 3. Widerstand im Zündstromkreis. 4. Zündrelais. 5. Erregeranoden. 6. Zündanode mit Magnetspule

relais M geleitet. Dessen Kontakte schalten bei angezogenem Relaisanker den Zündmagneten und die Zündanode aus. Die Wicklungen H deuten den Erregertransformator an und die Wicklungen J die Erregerdrosselspulen. Wenn der erste Zündlichtbogen nicht ausreichend ist, genügend Hg-Dampf zu erzeugen, zieht der Magnet K die Zündanode nach dem Austausch sofort wieder nach unten, um noch einen weiteren oder mehrere schnell aufeinanderfolgende Zündlichtbogen zu erzeugen, bis die Erregerlichtbogen zünden können.

Bild 40 zeigt von einem Eisengleichrichter die Zünd- und Erregerschaltung mit einem Streutransformator. Im Gegensatz zum Bild 4 hat die Zündspule 6

eine besondere, von dem Erregerkreis getrennte Spannungsquelle. Der Zündstromschalter 4 unterbricht diesen nach erfolgter Zündung. Der im Schnitt erkennbare Zündstift wird in seinen Bewegungen nach unten durch eine Feder gedämpft, diese hat außerdem die Aufgabe, den Stift nach dem Eintauchen in das Hg, also nach dem Kurzschließen der Zündspule, wieder nach oben zu ziehen, wodurch der Zündlichtbogen entsteht. Bei der Zünd- und Erregerschaltung

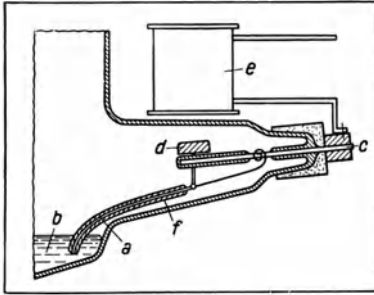


Bild 41. Schnitt durch den Zündstutzen (SSW.)
a = Zündfinger, *b* = Kathodenquecksilber,
c = Zündstromdurchführung, *d* = Anker,
e = Zündspule, *f* = Glashülle des Zündfingers

der Glasgleichrichter Bild 41 sitzt der Zündmagnet *e* über dem Zündanodenstutzen und zieht mit Hilfe des Eisenkerns *d* beim Einschalten die im stromlosen Zustande in das Kathoden-Hg eintauchende Zündanode *a* nach oben. Die Zündanodenspitze erzeugt hierbei den Zündlichtbogen. Wie die Schaltung Bild 42 erkennen läßt, ist dem Zündkreis in einer ähnlichen Anordnung noch ein kleiner Trockengleichrichter *T* vorgeschaltet, damit beim Zünden auf einen eingeschalteten Belastungsstromkreis der Hauptstromfluß

in den Zündkreis gesperrt wird. Das Relais *ER* wird vom Erregerstrom durchflossen und schaltet den Zündkreis nach erfolgter Zündung ab. Die Zündspule *Z Sp* bleibt jedoch eingeschaltet, so daß die Zündanode während des Betriebes ständig aus dem Hg austaucht.

Die Glasgleichrichter haben nach Bild 43 auch einen Zündmagnet, der in seiner Längsrichtung auf dem Zündanodenansatz befestigt ist. Beim Ein-

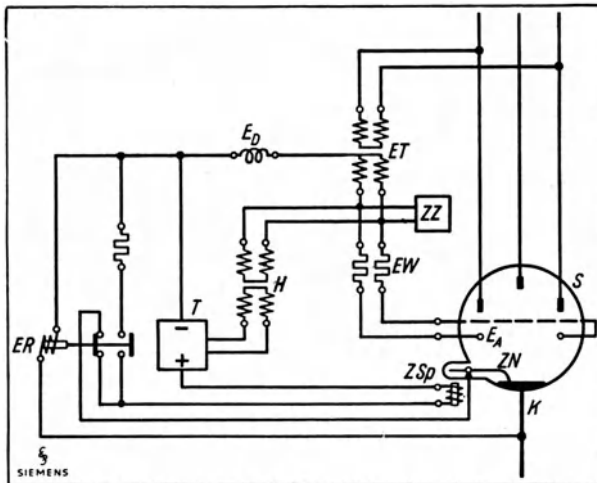


Bild 42. Tauchzündung. *ET* = Erregertransformator, *ZN* = Zündanode,
EW = Erregerwiderstände, *HT* = Zündgleichrichter, *ER* = Unterbrecherrelais

schalten wird von diesem Magnet ein Eisenanker *c* angezogen. Mit Unterstützung der Hebelarme *d—e* taucht die aus Wolfram bestehende Zündspitze in das Hg ein. Hierdurch wird die Magnetspule kurzgeschlossen, der zugleich als Gegengewicht ausgebildete Anker *c* fällt zurück und zieht mit Hilfe der Zündspitze den Zündlichtbogen. Die Schaltung ist so ausgeführt,

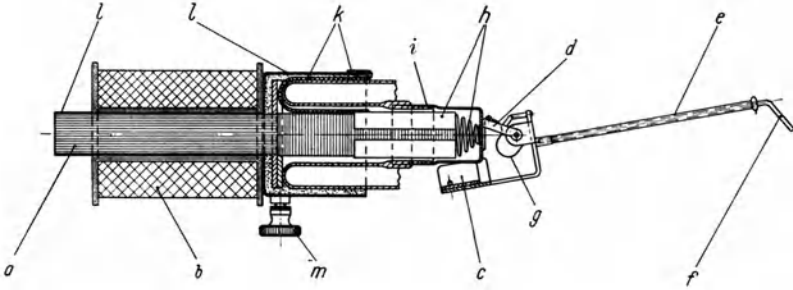


Bild 43. Bewegliche Zündanode (BBC). *a* Magnetkern, *b* Magnetspule, *c* Klappanker, *d* Lager, *e* Zündstange, *f* Zündstift, *g* Stromverbindung, *h* Kontaktfeder mit Hülseinsatz, *i* Metallkappe für Vakuumdichtung, *k* Stromzuleitung, *l* Messingkappen, *m* Stromanschluß

daß der Kühlventilatormotor erst nach erfolgter Zündung mit Hilfe des Zündrelais eingeschaltet wird. Durch diese Maßnahme soll erreicht werden, daß in kalten Räumen, bei länger andauernder Zündung, die Hg-Dampfbildung durch zu früh eingeschaltete Kühlluft nicht verzögert wird. Bei der Zündung der Eisengleichrichter, Bild 37, zieht die Zündspule 2 die Zündstange 3 nach unten, hierdurch wird ein Stromkreis vom Erregertransformator 11 über Widerstand 8 und den Kontakten *a—b* geschlossen. Sodann zieht die rechte Spule den Anker 12/1 nach oben und schaltet die Spule 2 stromlos. Jetzt kann die Feder 1 die Zündstange nach oben ziehen, wobei der Zündlichtbogen erzeugt wird und der Erregerstrom beginnt zu fließen. Falls die Erregung nicht sofort anspringt, beginnt der gleiche Zündvorgang von neuem. Der fließende Erregerstrom

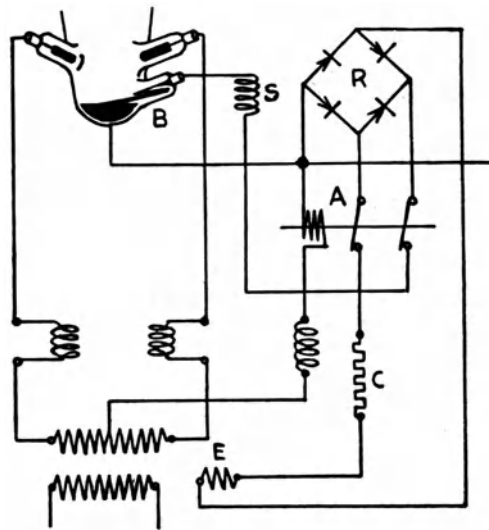


Bild 44. Bimetallzündung (Hewitt, Paris)
A = Zündkreisunterbrecher, *B* = Bimetallzündanode,
C = Zündwiderstand, *E* = Hilfstransformator für den
 Zündkreis, *R* = Zündkreisgleichrichter, *S* = Zündkreis-
 drosselspule

bewirkt das Anziehen beider Relaisanker 12, so daß die Spule 2 und der Zündstift 3 gleichzeitig stromlos werden.

g) Die Bimetallzündung

wurde in Frankreich entwickelt. Beim Stromdurchgang (Bild 44) erwärmt sich der Bimetallstreifen. Da die Wärmeausdehnung des unten sitzenden Metallbandes größer ist als das obere Band, wird der Zündstift allmählich nach oben gehoben, bis er den Hg-Spiegel verläßt, wobei sich der Zündlichtbogen bildet. Die Anordnung hat in dieser einfachen Ausführung den Nachteil, daß beim Zünden auf Belastung der Betriebsstrom durch den Bimetallstreifen fließen kann und diesen gelegentlich ausglüht. Hierdurch wird die Zündanode unbrauchbar. Die Hewittic hat daher mit gutem Erfolg als Verbesserung in Reihe mit der Zündanode einen Trockengleichrichter R geschaltet, um Fehlzündungen zu vermeiden.

h) Die Kontraktionszündung

ist stark stromintensiv durchgebildet. Der Zündlichtbogen entsteht beim Verdrängen von Hg durch magnetische Kraftlinien nach dem Pincheffekt. Bild 45 läßt die Anordnung erkennen¹⁾. Die Hg-Brücke zwischen Zünd-

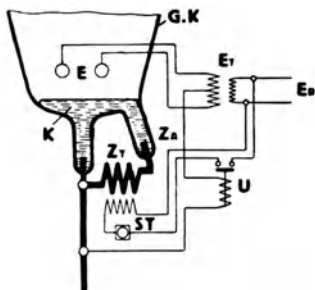


Bild 45.

Schema der Kontraktionszündung
GK - Gleichrichterkolben, *Za*
 Zündstutzen, *U* - Unterbrecherrelais,
E - Erregeranoden, *ER* Erreger-
 kreis, *ZT* - Zündtransformator,
ST Thermischer Automat, *ET*
 Erregetransformator, *K* Queck-
 silberkathode (ELIN.)

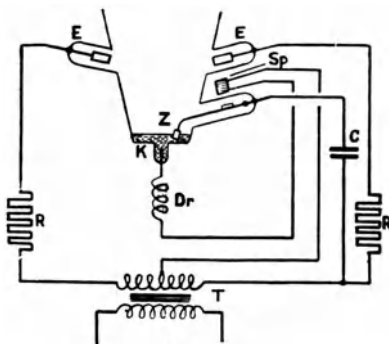


Bild 46.

Resonanzzündung (Signum Wallisellen)
ET - R Erregerstromkreis, *Z* Bewegliche
 Zündanode, *Sp* Zündspule, *C* Zündkreis-
 kondensator, *Dr* Zünd- und Erregerkreis-
 drosselspule, *K* Kathode

anode Za und Kathode K wird von einem niedergespannten großen Strom durchflossen. Der Magnetismus der Stromwindung verdrängt das Hg zwischen Kathodenstutzen und Zündstutzen so stark, daß die Hg-Brücke auseinandergerissen wird, wodurch eine gewisse Menge Hg verdampft und ein Lichtbogen entsteht, der dem Erregerlichtbogen die Zündung ermöglicht. Die Stromstärke der Magnetwicklung muß so bemessen sein, daß die Abdrängung auch

¹⁾ A. Micza, E. u. M. 1934, H. 40. ELIN., DRP. 622 836.

beim höchsten Hg-Stand noch sicher erfolgt. Dagegen muß die Hg-Höhe so gewählt werden, daß beim niedrigsten Hg-Stand noch genügend Hg für die Brückenverbindung vorhanden ist.

i) Die Resonanzzündung

von der Signum Wallisellen¹⁾ ist im Bild 46 in der Schaltung gezeigt. Der Magnet Sp hebt die Zündanode Z beim Einschalten nach oben. In Reihe mit der Zündanode ist ein Kondensator C geschaltet, um zu verhindern, daß im Zündmoment ein Rückstrom in den Zündkreis fließen kann. Der Kondensator erhöht die Zündsicherheit durch einen Schwingungskreis, der in Verbindung mit der Drosselspule gebildet wird. Die Zündspule bleibt im Betriebe eingeschaltet und zieht die Zündanode ständig nach oben. Durch den Kondensator C erübrigt sich ein Unterbrecherrelais.

k) Die Hochspannungzündung

wurde als Stoßzündung bereits von Cooper Hewitt ausgebildet. Es ist eine Initialzündung und wird bis in die neueste Zeit für die Zündung von Hg-Dampflampen benutzt.

Nach Bild 47 fließt der Strom vor dem Zünden der Röhre L vom Pluspol über den Zündwiderstand ZW , Unterbrecher U , Drosselspule D und Begrenzungswiderstand W . Der Magnetismus der Drosselspule D kippt den Hg-Unterbrecher U , der den Spulenstrom beim Trennen der Hg-Kontakte in einer äußerst kurzen Schaltzeit unterbricht, so daß eine hohe Überspannung von 20000 V und mehr entsteht. Mit Hilfe des außen an der Kathode sitzenden Kondensatorbelags C ist diese

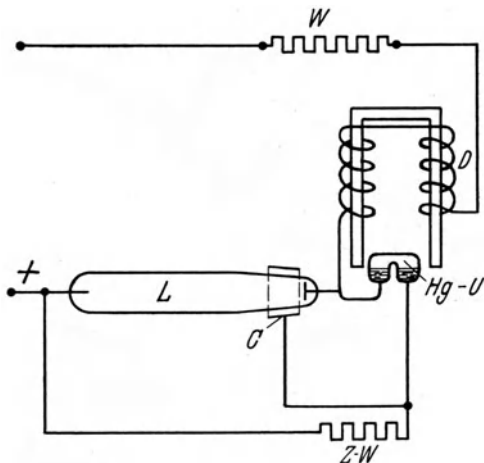


Bild 47.

Schema einer Hochspannungsstoßzündung (Westinghouse)
 L Hg-Dampfrohr, C Kondensatorbelag, $Hg-U$ Quecksilberkippschalter, D Drosselspule, ZW Zündwiderstand

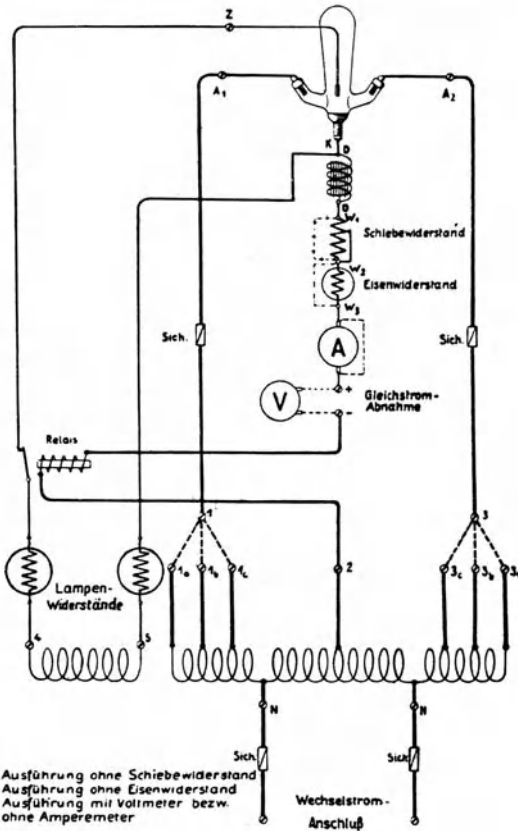
Spannung imstande, zwischen Anode und Kathode einen Überschlag zu erzeugen, dem die Lichtbogenzündung folgt. Während des Betriebes bleiben die Kontakte geöffnet. Die Drosselspule und der Widerstand W dienen gleichzeitig zur Beruhigung des Lichtbogens. Die hohe Spannung ionisiert die bei Raumtemperatur in jedem evakuierten Hg-Gefäß als Teildruck vorhandene geringe Hg-Dampfmenge. Durch die kurzzeitig ein-

¹⁾ H. Loosli, S. E. V. Zürich, 1936, H. 24. Signum Wallisellen.

tretende Glimmentladung verdampft zusätzlich Hg und die Bogenentladung setzt ein.

Ähnlich wirken auch Zündungen mit hochfrequenten Schwingungskreisen und Teslatransformatoren, nur entsteht hier eine Reihe schnell aufeinanderfolgender Spannungsspitzen, die zum Überschlag führen.

Cooper Hewitt wollte bereits 1903¹⁾ mit dieser Stoßzündung und einer Phasenverschiebung des Zündensatzes die Spannung und den Strom regeln, wie noch aufgewiesen wird. Im Gegensatz zu den Hochspannungszündungen sind die Niederspannungszündeinrichtungen so hergestellt, daß sie beim Zündprozeß gleichzeitig die erforderliche Hg-Menge verdampfen.



- Ausführung ohne Schleibewiderstand
- Ausführung ohne Eisenwiderstand
- Ausführung mit Voltmeter bzw. ohne Amperemeter

Bild 48. Die Schaltung einer Zündung eines mit Edelgas (Argon) gefüllten Glasgleichrichters (DTW.)

geleitete Zündlichtbogen verdampft auch eine bestimmte Menge des Kathodengemisches, hierauf erfolgt die Ionisation und Einleitung des Lichtbogens. Bei kleineren Belastungen werden aber wegen der geringen, durch den kleinen Stromfluß bedingten Hg-Dampfmenge, vorwiegend Argonionen erzeugt. Jedoch mit wachsendem Strom wird die Hg-Ionisation ständig stärker, so daß Argongas wie ein Zusatz³⁾ von Fremdgasen wirkt, der im Normalbetrieb ohne Einfluß ist.

¹⁾ DRP. 169041.

²⁾ Fr. Hellmuth, Helios 1924, H. 28; auch „Der Argonalggleichrichter“, Leipzig 1933.

³⁾ Güntherschulze, Elektrische Gleichrichter u. Ventile. Berlin, Jul. Springer, 1929.

m) Die Ignitronzündung

Sie wird von amerikanischen Firmen (GEC. und Westinghouse) mit Erfolg verwendet. Der Name ist von der Initialzündung abgeleitet. Wie aus Bild 49 hervorgeht, taucht eine Zündanode ständig einige Millimeter tief in das Hg ein. Die Zündspitze besteht aus einem Halbleiter,

beispielsweise Karborundum. Beim kurzzeitigen Einschalten eines Stromstoßes von etwa 40 A bei 100 V entsteht zwischen der Zündspitze und dem Hg durch starke Feldkonzentration eine punktartige Entladung, die den Zündvorgang der Erregeranoden oder Hauptanoden einleitet. Diese Zündung ist nach Berichten in Fachzeitschriften so präzise, daß die alte Spannungsregelschaltung von Cooper Hewitt heute mit Erfolg ausgeführt wird. Zu diesem Zwecke erhält jede Wechselstromwicklung ein einzelnes Gefäß mit Hg-Kathode *f*, Graphit-

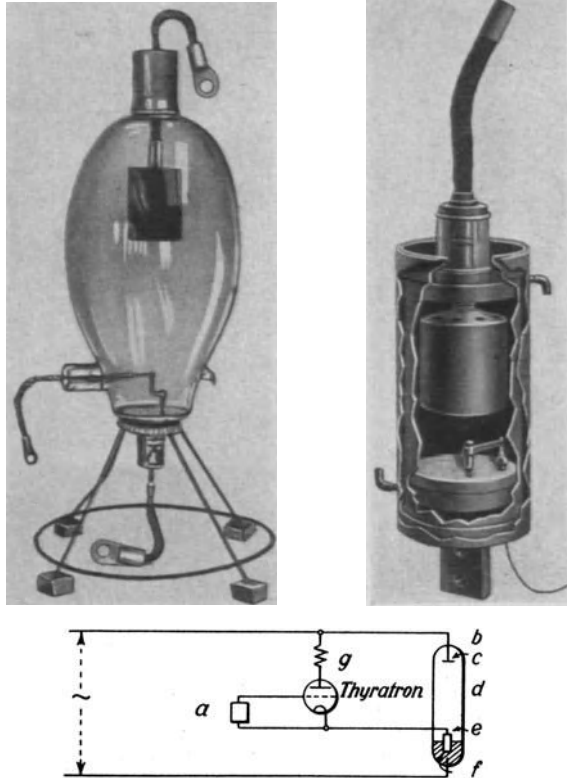


Bild 49. Ignitron-Gleichrichtergefäße aus Glas und Eisen sowie eine Zündschaltung der Ignitronzündung (aus Engineering, 25. August 1939, Seite 239, The British Thomson-Houston Company, Limited, Rugby).

anode *bc* und der Ignitronzündanordnung *a-e-g*. Durch eine Verschiebung der Phasenlage der Zündwechselspannung mit Hilfe des Phasendrehers *a* kann jeder beliebige Zündensatz der Anodenstromhalbwellen eingestellt werden, um auf diese Weise eine Spannungsregelung analog der Gitterregelung (Abschnitt 11) ausführen zu können. Der Stromstoß kann auch an Stelle der gesteuerten Röhre durch aufgeladene Zündkondensatoren erzeugt werden. Da dieser Stoß während jeder Halbwelle nur kurze Zeit andauert, ist der Energieverbrauch im Zündkreis vernachlässigbar.

n) Die Spritzzündung

Bild 50 zeigt den Schnitt einer Spritzzündung¹⁾. Beim Einschalten der Spule *c* wird der Eisenkolben *d* nach unten gezogen, wodurch Hg aus der

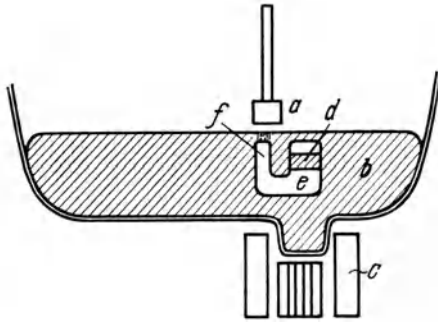


Bild 50. Spritzzündung an Eisengleichrichtern (GEC., London)

a feststehende Zündanode, *b* Hg-Becken,
c Zündspule mit Kern, *d* beweglicher Kolben,
e - Zylinder mit Hg-Füllung, *f* - Spritzdüse

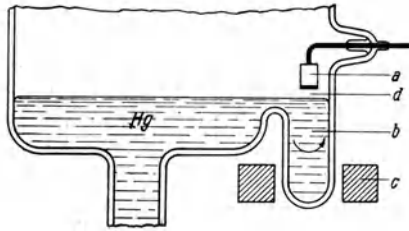


Bild 51. Rotationszündung

a Zündanode, *b* mit Hg gefüllter Zündstutze,
c eine mehrphasig erregte Magnetspule zur Drehfelderzeugung, *d* - Bewegungsraum für hochgetriebenes und zurückfallendes Hg

Düse *f* gegen die feststehende Zündanode *a* spritzt. Beim Zurückfallen des Hg entsteht ein Lichtbogen, gleichzeitig verdampft Quecksilber und die Erregerlichtbogen zünden. Die beschriebenen Zündeinrichtungen arbeiten teils mit, teils ohne Federkraft. Es sind in beiden Richtungen Abarten bekanntgeworden. Erwähnenswert ist noch die Zündung, bei der das Hg von außen mittels eines Drehfeldes bewegt wird. Bild 51. Dieses wird unter dem Hg-Becken, oder um einen Zündstutzen angeordnet, wodurch das Hg in Rotation versetzt und nach oben gegen eine feststehende Zündanode getrieben wird. Der Stromschluß bewirkt eine Unterbrechung des Drehfeldes mit bekannten Schaltmitteln. Beim Zurückfallen des Hg wird der Zündlichtbogen gezogen.

4. Die Glühkathodenstromrichtergefäße

Eine Glühkathodenröhre besteht nach Bild 52 aus dem Glaskolben²⁾, der Glühkathode, der Anode, die wohl immer aus Graphit hergestellt wird, und dem Befestigungssockel bzw. Anodenanschluß im oberen Teil des Glaskolbens. Die reinen Elektronenröhren werden nur evakuiert, doch die für Stromrichterzwecke bevorzugt verwendeten Entladungsgefäße erhalten nach der Evakuierung eine Gasfüllung oder einen Zusatz von Quecksilber, der im Betriebe verdampft.

Aus den zahlreichen Veröffentlichungen der letzten Jahre ist erkenntlich, daß die Elektroindustrie für die Entwicklung der Glühkathodengefäße

¹⁾ Vgl. auch *A. Siemens*, ETZ. 1939, H. 9, S. 261.

²⁾ *A. Glaser*, ETZ. 1931, H. 26; *W. Kluge*, ETZ. 1936, S. 301 u. 333.

Außerordentliches geleistet hat. Obwohl ein Glühkathodengefäß unkompliziert erscheint, bestehen doch interessante Konstruktionsüberlegungen, um für den Glühkathodenstromrichter ein weitgehendes Anwendungsgebiet zu schaffen. In Deutschland erfand Professor Wehnelt etwa 1904 die erste Oxydkathode. Die Akkumulatorenfabrik A.-G. (AFA.) stellte später nach den Wehnelt-Patenten und eigenen Verbesserungen¹⁾ den bekannten AFA.-Gleichrichter her, der bis heute für Stromstärken von 1 bis 120 A und Spannungen bis 250 V einen recht beträchtlichen Absatz fand. Dieser Entwicklung schloß sich auch Philips in Holland und Rectron-Berlin an.

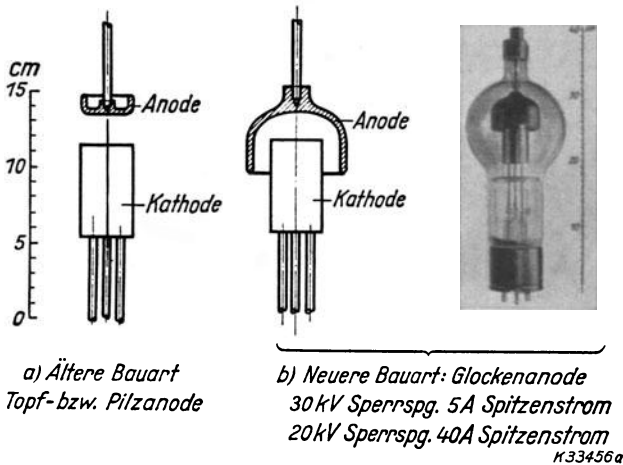


Bild 52. Aufbau ungesteuerter Glühkathodenhochspannungsrohren mit Quecksilberdampfzuführung

Parallel hierzu lief die Entwicklung der Glühkathodengleichrichter mit und ohne Gasfüllung und einer Metallkathode, die anfänglich aus reinem Wolframdraht bestand und später thoriiert wurde, um durch den Thoriumzusatz eine erhöhte Elektronenemission zu erreichen. Nach einer wichtigen Erkenntnis läßt sich die Lebensdauer der Kathoden wesentlich erhöhen, wenn der Aufprall der Ladungsträger aus der Strombahn auf die Kathode durch eine Edelgasfüllung mit einem vorbestimmten Druck gedämpft wird²⁾. Der Gasdruck soll mindestens 4 bis 15 Torr betragen.

Für die Anoden ist wohl die Form von Bedeutung, schwierig ist jedoch die Herstellung von guten Kathoden mit einer hohen Lebensdauer.

a) Die verschiedenen Glühkathoden

Eine betriebssichere Kathode muß imstande sein, den Nennstrom, die begrenzten Überlastungen und kurzzeitig auch Kurzschlußbelastungen von

¹⁾ W. Germershausen, ETZ. 1930, H. 36.

²⁾ DRP. 440044, 1914, AEG., GEC.

der Entladungsbahn in den Kathodenstromkreis (Plusleitung des Gleichstromnetzes) zu übertragen. Im Laufe der Jahre sind verschiedene Kathoden entwickelt worden, um die Lebensdauer und die Belastungsfähigkeit zu erhöhen.

1. *Die direkt geheizte Kathode.* Diese besteht aus einer reinen Wolfram- oder Molybdändrahtspirale analog den ältesten Verstärkerröhren. Der Draht muß im Betriebe auf etwa 2800° erhitzt werden, um eine genügend große Elektronenemission zu erhalten. Diese Glühkathoden erreichten jedoch keine hohe Lebensdauer, denn einmal werden sie durch die hohe Temperatur stark beansprucht, zum anderen erleiden sie bei Überstrom durch den verstärkten Ionenaufprall leicht punktartige Verbrennungen. Auch die Thorierung dieser Metallkathoden brachte keine wesentlichen Verbesserungen. Das Thorium wird mit etwa 1% dem pulverförmigen Wolfram vor der Herstellung der Wolframdrähte beigemischt. Die thorierten Kathoden brachten bei einer Erhitzung bis zu 2800° wohl eine Verbesserung gegenüber den

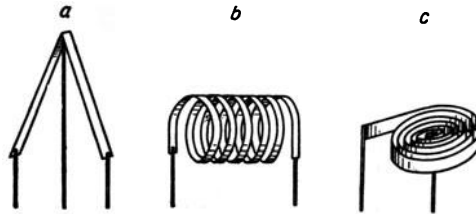


Bild 53. Direkt geheizte Kathoden

reinen Metalldrähten, doch bestanden noch andere Schwierigkeiten. Es wurde daher nach neuen Wegen gesucht.

Der nächste Schritt war die Pastierung der Wolframdrähte mit einem geeigneten Oxyd, wozu Bariumoxyd am besten erscheint. Hierdurch konnte bei starker Elektronenemission die Heiztemperatur auf etwa 1200° erniedrigt werden, gleichzeitig erhöhte sich die Lebensdauer von etwa 1000 Stunden beim reinen Wolfram- oder Molybdändraht auf über 5000 Stunden. Einige Ausführungsformen zeigt Bild 53¹⁾.

2. *Die indirekt geheizte Kathode.* Eine weitere Verbesserung entstand durch die indirekt geheizte Kathode. Bei dieser dient ein Wolframdraht nur zum Heizen einer Kammer oder eines Rohres. Dieses hat an einer dazu bestimmten Oberfläche eine Pastierung aus Bariumoxyd. Von dieser Oxydschicht aus erfolgt die Elektronenemission. Der Betriebsstrom fließt nur nach den oxydierten Flächen und nicht durch die Heizspirale. Für die indirekt geheizten Kathoden der Verstärkerröhren werden häufig keramische Rohre mit einer innersitzenden Heizspirale verwendet. An der zylindrischen Außenwand wird die Bariumoxydschicht aufgetragen. Die in der Mitte im Bild 54 sichtbaren Heizspiralen erhitzen die ringsum gelagerten taschen-

¹⁾ A. Glaser, a. a. O.; W. Kluge, a. a. O., auch Espe u. Knoll, a. a. O. S. 255, die noch wenig bekannte, sich selbstaufheizende Kathode.

artigen Gebilde, auf deren Flächen die Oxydschicht aufgetragen ist. Die im Betriebe abgestoßenen Oxydteilchen werden auf gegenüberstehende Wandflächen geschleudert, wodurch die Kathode teilweise selbsttätig regeneriert und ihre Lebensdauer erhöht wird. Die reinen Metallkathoden mußten bis zu 2800° erhitzt werden, um eine genügende Glühelktronenemission zu erreichen. Durch die Oxydkathoden wurde die Kathodentemperatur auf 1200° ¹⁾ ermäßigt und die indirekt geheizte Kathode wird nur auf etwa 1000° erhitzt, ihre Lebensdauer beträgt bis zu 10000 Stunden, ohne daß sich die Emission nachteilig verändert. Die Entladung bedeckt im normalen Betriebe büschelartig die Kathode. Gut konstruierte Kathoden haben eine derart ausgeprägte Emission, daß auch bei kurzschlußähnlichen

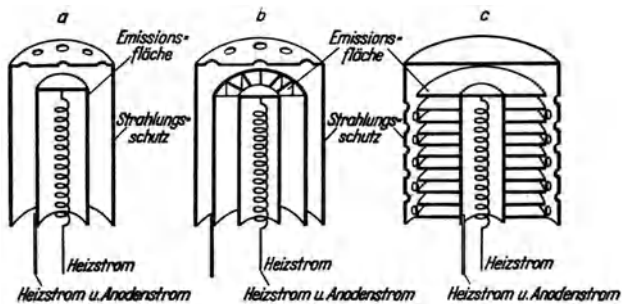


Bild 54. Indirekt geheizte Kathoden

Überlastungen eine büschelartige Entladung sichergestellt ist. Wenn auf der Kathodenoberfläche ein lichtpunktartiger Bogenansatz entsteht, sind Anfressungen und eine frühzeitige Alterung zu erwarten.

Der in Bild 54 gezeigte Strahlungsschutz dient lediglich dazu, die Abstrahlung der Wärme von der Kathode nach den Rohrwänden zu verringern. Die Lichtbogenentladung erfolgt durch die im Strahlungsschutz vorhandenen und im Bilde sichtbaren Öffnungen. Bei der Bemessung der Heizwicklung ist darauf zu achten, daß das magnetische Feld der Heizwicklung bei den Röhren größerer Leistung nicht stärker wird, als das Feld zwischen Anode—Kathode, sonst findet eine Anziehung der Elektronen nach der Kathode statt und die Elektronenemission wird unter Umständen unmöglich.

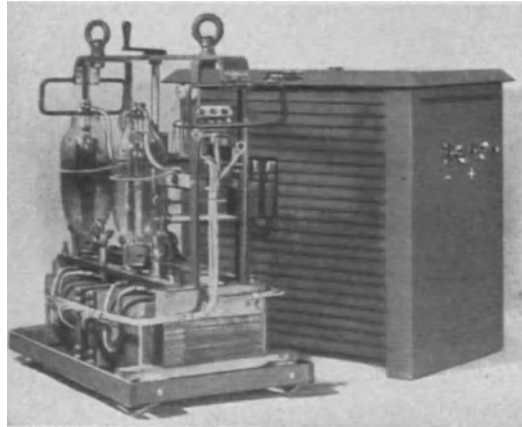
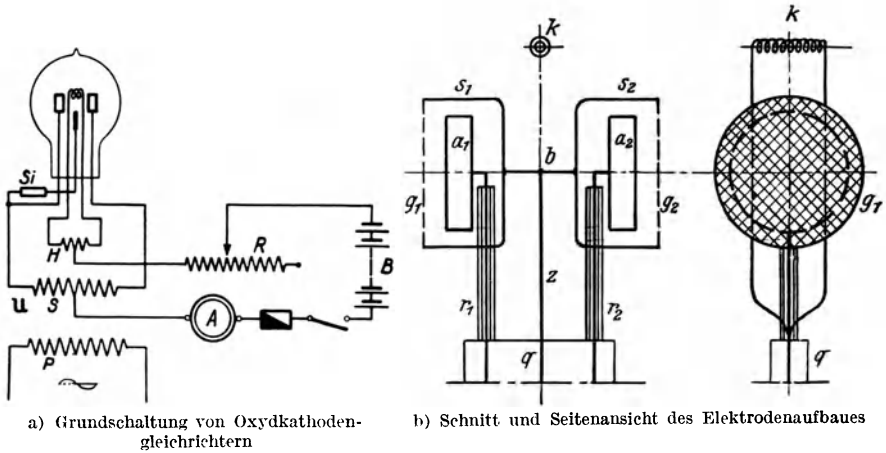
b) Die Herstellung der Glühkathodenröhren

Im Bild 55 ist der Schnitt durch eine der im Handel bekannten AFA.-Röhren²⁾ dargestellt. Diese sind mit Edelgas, vorzugsweise Argon, bis zu

¹⁾ Zeitschr. f. techn. Physik 1938, H. 6. *Heinze u. Hass*, Osram, geben hier besondere Meßmethoden an und ermittelten eine ähnliche Temperatur.

²⁾ *W. Germershausen*, ETZ. 1930, H. 36.

einem Druck von mehreren Millimeter Hg-Säule gefüllt und haben zwei Anoden $a_1 - a_2$. Diese sind durch Abschirmungen S voneinander getrennt, damit der Lichtbogenweg von Anode nach Anode verlängert wird, um innere Kurzschlüsse zu vermeiden. Man erkennt an der Zeichnung, daß



c) Ein größerer Glühkathodengleichrichter mit Edelgasfüllung als Schweißaggregat (Rectron)

Bild 55. Glühkathodengleichrichter mit Edelgasfüllung
[Bild a) und b) von W. Germershausen, AEG.-Mittl. 1939, H. 2].

der Weg von den Anoden nach der Glühkathode K kürzer ist als von Anode nach Anode. Die Abschirmungen bestehen aus Metall und werden mit der Kathode in elektrische Verbindung gebracht, um den Zündensatz bei jeder Halbwelle zu erleichtern. Der Hilfsstromkreis wird durch einen hochohmigen Widerstand Si von etwa 10000 Ohm begrenzt, er hat eine den Steuergittern verwandte Funktion. Die Glühkathode besteht aus einer pastierten

Metalldrahtwendel ähnlich Bild 53b. Die fertigen Röhren haben im unteren Teil einen Steckersockel *q*, wie Bild 55 erkennen läßt.

Eine andere Ausführungsform zeigt die im Bild 52 dargestellte Glühkathodenröhre mit indirekt geheizter Kathode und einer geringen Quecksilberfüllung, die beim Inbetriebgehen verdampfen muß. Diese Röhre ist einanodig hergestellt und für Gleichspannungen bis zu 20000 V und mehr geeignet. In den Bildern 56 bis 57 sind einige Gefäße mit Glas- und Eisenkolben zu erkennen. Wegen der Wichtigkeit dieser Glühkathoden - Quecksilberdampf-Stromrichtergefäße soll auf die inneren Vorgänge näher eingegangen werden.

Bei den Hg-Gleichrichtern mit flüssiger Hg - Kathode wird eine dem Betriebsstrom entsprechende Menge Hg verdampft, wodurch die Vorgänge im Innern der Gefäße bestimmt werden. Der hell leuchtende Kathodenfleck erfüllt eine Doppelaufgabe, er sorgt nicht nur für den nötigen Hg-Dampf-vorrat, sondern von ihm aus erfolgt auch die Elektronenemission. Bei den mit Hg gefüllten Glühkathodengleichrichtern dagegen dient die Glühkathode nur zur Erzeugung der erforderlichen Elektronen. Der im unteren

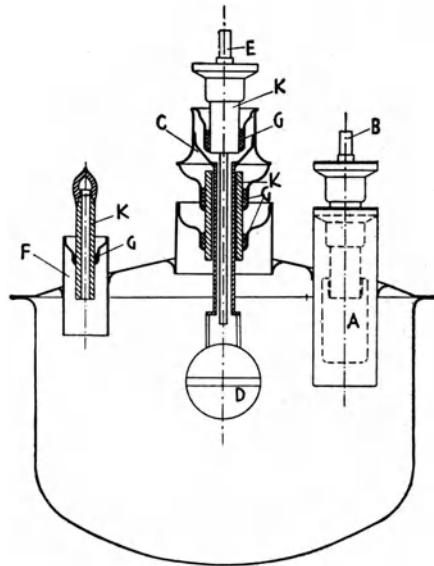


Bild 56. Eisen-Glühkathodengleichrichter (ELIN.)
A - B Anode, *C - D* = Kathode, *E* - Heiz-
 anschluß, *F* = Pumpstutzen, *G* - dichtender
 Glasfluß, *K* = Keramikrohr

Teil der Röhre lagernde Hg-Vorrat verdampft durch Wärmestrahlung und der auf diese Weise erzeugte Hg-Dampf, der sich in der luftleeren Röhre schnell verteilt, wird in der Entladungsbahn ionisiert. Für die inneren Vorgänge in diesen Röhren sind die Versuche von *A. Glaser* und *W. Kluge*¹⁾ sehr aufschlußreich. Wie Bild 52 zeigt, ist der Abstand von Anode nach Kathode im Vergleich zu den Abständen der Hg-Gleichrichter verhältnismäßig klein. Dieser geringe Abstand muß angestrebt werden, um die Lebensdauer der Kathode zu erhöhen, denn Versuche von *Hull*²⁾ haben ergeben, daß die Zerstörung der Kathoden durch Ionenaufprall nur dann eintreten kann, wenn die kinetische Energie, mit der die Ionen auf die

¹⁾ *A. Glaser* u. *W. Kluge*, a. a. O. (Die Bilder 58 bis 63 sind diesen Veröffentlichungen entlehnt und von der AEG. zur Verfügung gestellt.)

²⁾ *Hull*, Trans. Amer. Inst. El. Eng. 47, 1928.

Kathode geschleudert werden, einen bestimmten Minimalwert übersteigt. Diesem Mittelwert entspricht eine kritische Größe des Spannungsabfalles zwischen Anode und Kathode.

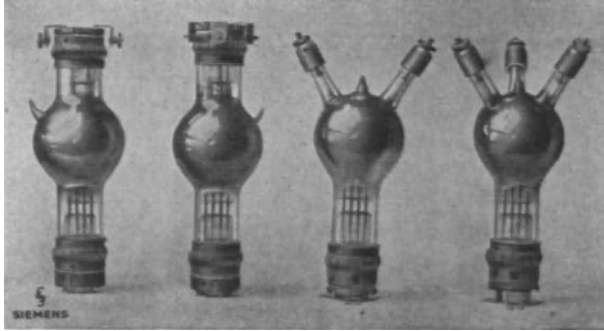


Bild 57. Glühkathodengleichrichterröhren 20 und 30 A, mit 2 bzw. 3 Anoden

Die kritischen Spannungen sind für

Helium	27 V
Neon	27 V
Argon	25 V
Quecksilber	22 V

Dagegen sind die Ionisationsspannungen nach Tabelle 5¹⁾ für Hg mit einem Wert von 10,4 V wesentlich niedriger gegenüber anderen Gasen wie Neon und Argon.

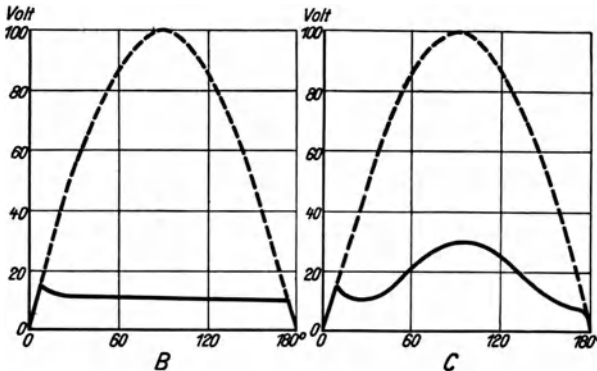


Bild 58. Spannungsabfalloszillogramme während einer Brennhalbperiode bei verschiedenen Belastungen. B - Spannungsabfall im Normalbetrieb, C = Spannungsabfall bei Überlast oder bei Hg-Dampfverarmung

Die Messungen an einem mit Hg-Dampf gefüllten Rohr zeigten, daß die Brennspannung von 10,4 V während einer Halbperiode, Bild 58b, nur im Augenblick des Zündens überschritten wird. Der wirkliche Lichtbogen-

¹⁾ Seite 76.

verlust kann nach Bild 59 noch kleiner als 10,4 V sein, wenn Hg-Dampf in genügender Menge vorhanden und die Röhre genügend geheizt ist. Andererseits darf der Dampfdruck nicht zu hoch sein, sonst entstehen in den Röhren Rückzündungen. Um den Einfluß der Dampfdrücke kennenzulernen, ist die Rückzündungsgrenze für ein bestimmtes Rohr bei verschiedenen Hg-Temperaturen (Bild 60) ermittelt worden. Diese wurden im unteren Teil der Röhre, in dem das Füllquecksilber gelagert ist, gemessen. Ferner zeigt Bild 61 den Verlauf des Spannungsabfalls bei verschiedenen Dampfdrücken bzw. Hg-Temperaturen. Bild 60 läßt erkennen, daß der Dampfdruck wegen der Rückzündungsgefahr nicht zu hoch sein soll. Während nach Bild 60 der hohe Dampfdruck die Spannungsfestigkeit der Röhren herabsetzt, wird der Wirkungsgrad durch die geringere Brennspannung nach Bild 61 erhöht. Nach Bild 58 c entsteht andererseits eine erhöhte Brennspannung während der Brennhalbperiode, wenn der Dampfdruck zu niedrig ist, weil durch die Armut an Hg-Dampf zu wenig Ionen nachgeliefert werden können. Durch diese Ionenarmut wird das Raumladungsgleichgewicht zwischen positiven und negativen Ladungsträgern gestört

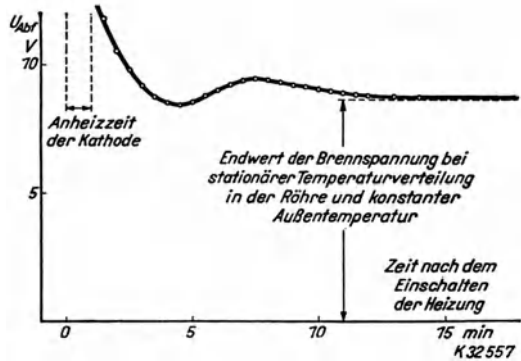


Bild 59. Zeitlicher Verlauf der Brennspannung nach Ablauf der Kathodenanheizzeit an der Röhre für 5 A und 20000 V

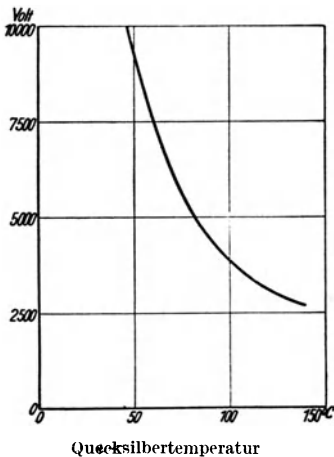


Bild 60. Abhängigkeit der Rückzündungsgrenze von der Quecksilbertemperatur

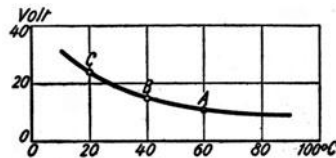


Bild 61. Mittlerer Spannungsabfall in Abhängigkeit von der Temperatur des Quecksilbers

und der Lichtbogenverlust wächst. Einen ähnlichen Verlauf nimmt die Brennspannung auch bei starken Überlastungen, wenn der Hg-Dampfdruck zu klein ist.

Auf Grund dieser ineinandergreifenden Beobachtungen mußten die Röhren in der Weise entwickelt werden, daß die Brennspannung bei allen Belastungen 10 V nicht merklich übersteigt, und daß die Hg-Temperatur sowie Dampfmenge mit der Rückzündungsgrenze in einen richtigen Einklang gebracht ist. Ferner muß die Anodenform gut durchgebildet sein, um die Beeinflussung der Entladungsvorgänge durch äußere Felder zu vermeiden. Im Bild 52 ist links eine ältere Bauart und rechts die sogenannte Glockenanode zu erkennen. Diese umschließt die Anode hauben- oder glockenmäßig, so daß die Entladung eng eingefäßt wird. Bild 62 zeigt den offenen Lichtbogen bei älteren Anoden und den geführten Lichtbogen bei Verwendung von Glockenanoden¹⁾.

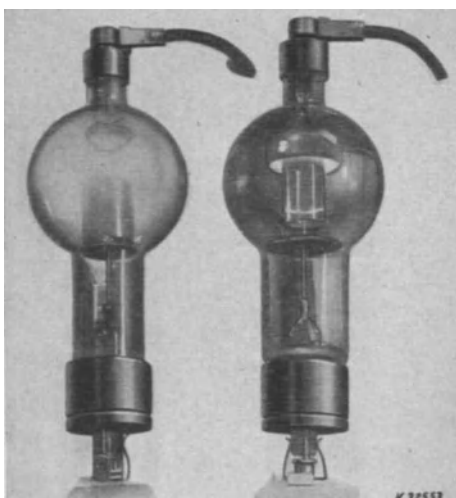


Bild 62. Vergleichende Gegenüberstellung zweier verschiedener Röhrenbauarten bei gleicher Strombelastung. Linke Röhre mit „offenem“, rechte Röhre mit „geführten“ Lichtbogen

Ein weiterer Fortschritt ist die Herstellung der Glühkathodenröhren mit Steuergittern. Wie Bild 63 erkennen läßt, werden die Gitter soweit wie möglich in Anodennähe gesetzt. Für diese Maßnahme sprechen physikalische Gründe, auf deren Erläuterung verzichtet werden kann. Die Verwendung gittergesteuerter Stromrichter ist in Abschnitt 11 beschrieben. Die Steuergitterröhren werden mit Thyatron oder Stromtor bezeichnet, weil mit Hilfe der Gitter und unter Aufwand geringer Steuerenergien der Betriebsstrom teilweise oder ganz gesperrt werden kann. Sie

haben allerdings nicht die ideale Steuerfähigkeit der reinen Elektronenröhren (Rundfunkröhren), wie in dem genannten Abschnitt nachgewiesen wird. In gleicher Weise wie bei Hg-Gleichrichtern werden die Steuergitter aus Metall oder Graphit hergestellt. Die Materialfrage ist im Prinzip von der Funktion der Steuerung unabhängig, doch mit Rücksicht auf die Gitterzerstäubung und Lebensdauer sind verschiedene Baustoffe untersucht worden. Gut bewährt haben sich Steuergitter aus Nickelblech.

In der äußeren Form sind sich die Röhren ähnlich. Aus fabrikatorischen Gründen wird die Kugelform bevorzugt. Bei einigen Röhren sind sämtliche Stromzuführungen im Sockel vereinigt; im Bild 62 und 63 befindet sich die

¹⁾ Glaser u. Kluge, a. a. O.

Anodenzuführung oben auf der Röhre. Die Steuergitterzuführung wird oft durch den Sockel geführt.

c) Die Anheizzeit der Glühkathodenstromrichtergefäße

Die Beschreibung der Glühkathodengefäße läßt erkennen, daß die Kathode nach dem Aufheizen der Metallspirale bei den direkt geheizten Kathoden oder nach dem Erhitzen der taschenartigen, mit Oxyden pastierten Kathodenkörper bei den indirekt geheizten Kathoden emissionsbereit ist. Demnach kann die Belastung des Gleichstromkreises unmittelbar nach dem Anheizen der Kathode erfolgen. Die Anheizzeit der direkt geheizten Kathoden be-

trägt etwa 30 sec. Eine indirekt geheizte Kathode erfordert je nach der Größe der Röhre 30 sec bis zu einigen Minuten Zeit, ehe der Kathodenkörper gleichmäßig erwärmt ist. Bei Anodenströmen von 100 bis 200 mA wird der Anodenstromkreis zuweilen gleichzeitig mit dem Heizstromkreis eingeschaltet. Die größeren Anodenströme dagegen können einer nicht genügend durchwärmten Kathode schaden, wenn beide Stromkreise gleichzeitig geschlossen werden, weil einzelne Stellen der Kathode im Übergangsstadium vom kalten zum erwärmten Zustand vorübergehend eine höhere Temperatur annehmen als die benachbarten Teilchen. Der Betriebsstrom fließt zuerst durch die heißeren Stellen, die hierdurch zusätzlich erhitzt und übermäßig beansprucht werden. Man erkennt dies an hell aufleuchtenden Punkten während der Anheizzeit. Durch eine häufige Wiederholung wird die Kathode frühzeitig zerstört und die Lebensdauer der Röhre herabgesetzt. Diese Erkenntnis führte vor Jahren zum Einbau von Zeitelementen in den Glühkathodenheizstromkreis. Diese sollen das Fließen der Anodenströme um die Anheizzeit verzögern. Durch solche Einrichtung konnte die Lebensdauer der Röhren erhöht werden. Bild 59 zeigt den zeitlichen Verlauf der Brennspannung mit zunehmender Anheizzeit an einer 5-A-Glühkathodenröhre. Sie läßt erkennen, daß es nicht ratsam ist, den Anodenstrom vor Ablauf einer Minute einzuschalten. Diese Zeit entspricht den beiden senkrecht schraffierten Linien. Erst nach 15 min ist das Rohr gleichmäßig durchwärmt. In der Zwischenzeit entstehen einige Veränderungen in der Brennspannung, die wahrscheinlich von dem anfangs

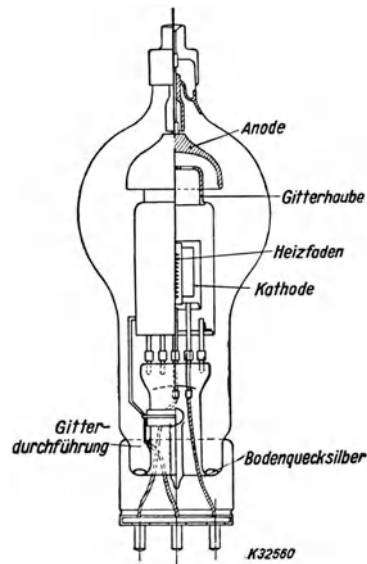


Bild 63. Innerer Aufbau der gittergesteuerten Gleichrichterröhre

Punkten während der Anheizzeit. Durch eine häufige Wiederholung wird die Kathode frühzeitig zerstört und die Lebensdauer der Röhre herabgesetzt. Diese Erkenntnis führte vor Jahren zum Einbau von Zeitelementen in den Glühkathodenheizstromkreis. Diese sollen das Fließen der Anodenströme um die Anheizzeit verzögern. Durch solche Einrichtung konnte die Lebensdauer der Röhren erhöht werden. Bild 59 zeigt den zeitlichen Verlauf der Brennspannung mit zunehmender Anheizzeit an einer 5-A-Glühkathodenröhre. Sie läßt erkennen, daß es nicht ratsam ist, den Anodenstrom vor Ablauf einer Minute einzuschalten. Diese Zeit entspricht den beiden senkrecht schraffierten Linien. Erst nach 15 min ist das Rohr gleichmäßig durchwärmt. In der Zwischenzeit entstehen einige Veränderungen in der Brennspannung, die wahrscheinlich von dem anfangs

nicht gleichmäßigen Verdampfen des Hg herrühren. Die Verzögerungseinrichtungen für den Anodenstromkreis während der Anheizzeit sind heute Allgemeingut der Gleichrichtertechnik geworden. Sie werden für Glühkathodengleichrichter jeder Art zweckentsprechend verwendet; so wurde vom Verfasser¹⁾ vorgeschlagen, in den Anodenkreis der Röhren einen Widerstand mit negativen Temperaturkoeffizienten (Urandioxydstäbe) zu setzen. Diese haben beim Einschalten einen hohen und nach einigen Minuten betriebsmäßiger Erwärmung einen niederen Widerstand. Im allgemeinen weisen die Bedienungsvorschriften der Gleichrichterfabriken darauf hin, daß Röhren eine längere Lebensdauer erhalten, wenn die Anodenstromkreise erst nach dem völligen Erhitzen der Kathoden eingeschaltet werden. Diese Bedingungen gelten für Relais- und Glühkathodenröhren mit und ohne Steuergitter, für jeden beliebigen Verwendungszweck.

5. Die Belastungsgrenzen, Rückzündungen, die technischen Eigenschaften und Form der Stromrichtergefäße mit Quecksilberkathode, die Vorgänge im Lichtbogen

Wie bei jedem elektrischen Apparat und jeder Maschine ist auch die Belastungsgrenze der Stromrichtergefäße durch die im Betrieb entstehende höchst zulässige Temperatur bestimmt, doch sind die Vorgänge im Lichtbogenweg wesentlich anders als in elektrischen Maschinen, daher müssen auch andere Maßstäbe zugrunde gelegt werden.

a) Die Rückzündungen, Rückströme und Rückzündungsgrenzen

Als vor Jahren Gleichrichter höherer Leistungen zur Anwendung gelangten, entstanden durch die noch völlig ungeklärten Rückzündungen erhebliche Schwierigkeiten. Eine Rückzündung erfolgt beim Versagen der Ventilwirkung, es fließt also nicht mehr der zwangsläufige Strom von den Anoden zur Kathode, sondern der Strom fließt willkürlich von Anode nach Anode, oder, Bild 64, von der Kathode nach Anode. Hierdurch entsteht eine direkte Stromleitung von einer Anode zur anderen, die kurzschlußartig in Erscheinung tritt, denn durch diesen Stromfluß wird der Transformator auf der Sekundärseite über den Lichtbogen kurzgeschlossen. Sobald ein Kurzschluß zwischen den Anoden besteht, wird nicht nur der Gleichstromkreis unterbrochen, sondern die Belastungsbegrenzer (Sicherungen, Überstromschalter) schalten auch den Transformator aus, so daß eine Rückzündung das betreffende Gleichrichtergefäß vorübergehend stört, wie im Bild 64 durch Pfeilrichtung angedeutet ist.

¹⁾ G. W. Müller, DRP. 642483, AEG.

Erst in den letzten Jahren hat man die Ursache soweit erkannt, daß Rückzündungen gänzlich vermieden werden oder durch eine sinngemäße Strombegrenzung und frühzeitige Abschaltung praktisch unwirksam gemacht werden können. Es wurde festgestellt, daß die Rückzündungen von der Form des Lichtbogenweges, von der Beschaffenheit des Vakuums und der Anoden sowie der Temperatur des Gleichrichtergefäßes abhängig sind. Hierzu

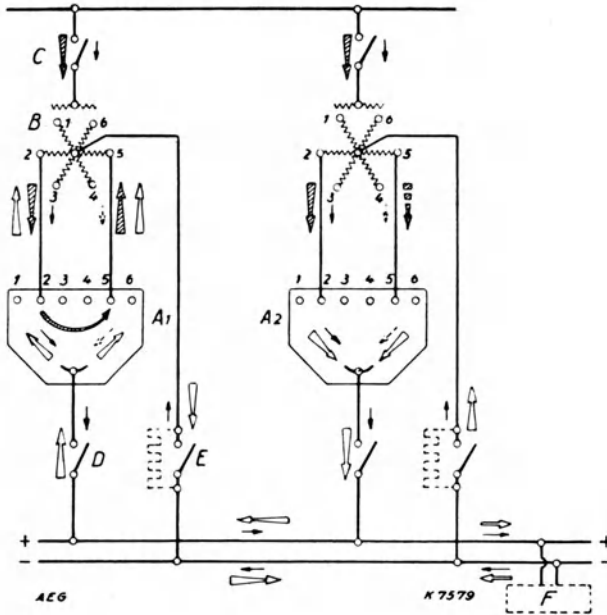


Bild 64. Stromverlauf bei einer Rückzündung (schwarze Pfeile Normalbetrieb, weiße Pfeile gestörter Betrieb, Schumacher, ETZ. 1926, H. 21). 1, 2, 3, 4, 5, 6 - Gleichrichteranoden bzw. Transformatorphasen, A₁ Gleichrichter 1, A₂ - Gleichrichter 2, B Transformator, C - Ölwechsler, D - normaler Automat, E - Rückstromschnellschalter, F - Stromverbraucher

gehört ferner die Dimensionierung sowie entsprechende Formgebung der Gleichrichtergefäße und Lichtbogenwege. Die höchste rückzündungsfreie Grenzbelastung ist von der Gleichspannung abhängig und durch die Temperatur gegeben. Auf diese Weise wurden für Glasgefäße bestimmte Ströme festgelegt, bis zu deren Grenze eine dauernde Belastung stattfinden kann, ohne daß Rückzündungen entstehen. Bild 65 zeigt beispielsweise eine gemessene Rückzündungskurve eines handelsüblichen 300-A-Glaskörpers¹⁾. Im Bild ist noch eine zweite Linie zu erkennen, die den zulässigen Belastungswert anzeigt, so daß die Rückzündungsgrenze praktisch nie erreicht wird. Auf diese Weise

¹⁾ Vom Verfasser 1923 ermittelt (G. W. Müller, Quecksilberdampfglasgleichrichter, Berlin 1924/1927) und im Schrifttum häufig wiedergegeben, z. B. Güntherschulze, a. a. O., S. 207, und K. Müller-Lübeck, Quecksilberdampfgleichrichter, Berlin, Jul. Springer, 1929.

wurden für die verschiedenen Gefäße Rückzündungsgrenzen festgelegt. Die Zahlen in Bild 65 sind ein Beweis dafür, daß die Gleichrichterfabrikanten mit einem großen Sicherheitsfaktor rechnen, um das Entstehen der Rückzündungen im praktischen Betriebe zu vermeiden. Auch sind Messungen bis zu einigen tausend Volt ausgeführt worden, denn Gleichrichter sind vielfach für Spannungen bis zu 3000 V für elektrische Bahnen ¹⁾ verwendet worden. Durch die Verminderung der Stromstärke bei den höheren Spannungen ergibt sich bei diesen die Wahl größerer Gefäße gegenüber den niederen Spannungen.

b) Die Rückströme und die Ursache der Rückzündungen

Es ist naheliegend, daß die Rückströme und Rückzündungen bei den Untersuchungen über ihre Ursachen in Zusammenhang gebracht werden, denn

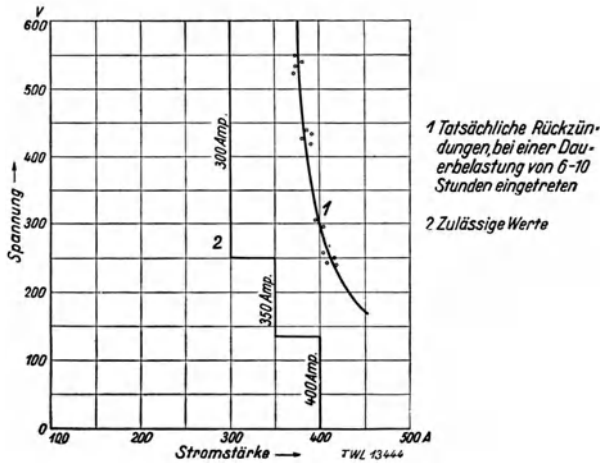


Bild 65. Rückzündungsgrenze eines 300-A-Glaskörpers

beide haben die gleiche umgekehrte Stromrichtung in den Gleichrichtergefäßen, also dem Arbeitsstrom entgegengesetzt gerichtet. Offenbar ist die Annahme auch nicht falsch, daß die nach Bild 65 ermittelten Höchstbelastungen dem Übergang einer Glimmentladung zur Bogenentladung entsprechen. Der mit Rückstrom bezeichnete Glimmstrom hat je nach der Dampfdichte, den Fremdgasen, Temperaturen und Belastungsverhältnissen Werte bis zu 20 mA, doch der Strom einer Bogenentladung bei der Rückzündung steigt kurzschlußartig bis auf den 20fachen oder noch höheren Wert des Nennstromes an, wenn er durch entsprechende Schaltmittel nicht schnell genug unterbrochen wird.

Obwohl bis heute genauere Versuchsergebnisse über diese Zusammenhänge nicht vorliegen und auch schwer durchzuführen sind, wurden trotzdem

¹⁾ BBC., Sonderdruck 1938, Bahngleichrichter. Nach BBC. (Marti u. Winograd a. a. O., S. 245) wird ein Eisengefäß bis 300 V, bis 4000 A und bei 4000 V bis 2000 A verwendet.

einige Messungen und Schaltungen bekannt, die der näheren Erkenntnis nützlich sind. *Güntherschulze* hat zuerst in der ETZ. 1910, S. 28 eine Versuchsanordnung veröffentlicht, die 1927 von *Prince* und *Vogdes* in dem Buch „Principles of Mercury Arc Rectifiers and their Circuits“, Graw-Hill Book Co., New York¹⁾, in annähernd der gleichen Ausführung bei einigen aufklärenden Messungen zugrunde gelegt ist. Zu diesem Zwecke wurde ein Hilfsgleichrichter in Reihe mit einer arbeitenden Anode geschaltet und der Rückstrom punktweise durch eine synchron umlaufende Kontaktscheibe (*Joubertscheibe*) ermittelt. *Prince* gibt als Höchstwert etwa 16 mA an. Eine weitere Bereicherung bekam die Literatur durch eine Veröffentlichung von *W. Dällenbach* in der ETZ. vom Juli 1927. Nach dieser wurde durch mechanische synchronumlaufende Schaltmittel die Rückstromkurve während

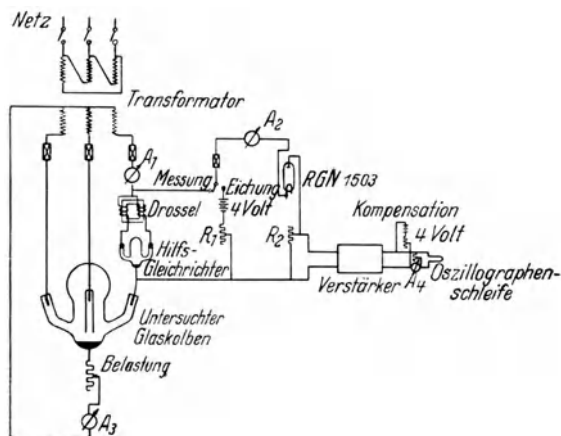


Bild 66. Rückstrommeßschaltung

einer Sperrzeit voll gezeichnet. Für einen gut evakuierten 500-A-Eisengleichrichter wird allerdings nur ein Wert von $\frac{1}{10}$ bis 1 mA angegeben. Als nächstes Ergebnis wurden von *Issendorff* in der ETZ. 1929, H. 30 Meßwerte angegeben von Glasgefäßen, die mit Hilfe eines den Arbeitsstrom führenden Hilfsgleichrichters ermittelt sind, dessen Zu- und Ableitung mit einem Oszillographen in Verbindung steht, so daß der Arbeits- und Rückstrom voll gezeichnet werden konnte. Für letzteren werden Werte von 3 mA angegeben. Doch zeigten die Versuche weiter, daß die Höhe des Rückstromes durch die Änderung der Kühlung, Anodenhülsen oder Armformen, ferner von vorgelagerten Gittern und durch künstlich erzeugte Dampfströmungen stark beeinflußt werden kann. In der gleichen ETZ. ist ein Meßergebnis vom Verfasser mit der im Bild 66²⁾ dargestellten Schaltung wiedergegeben,

1) Deutsch von *O. Gramisch*, Quecksilberdampfgleichrichter, *R. Oldenbourg*, Berlin 1931.

2) *G. W. Müller*, ETZ. 1929, S. 1099.

und zwar wurde ein größeres Ventil für den Arbeitsstrom und ein kleineres für den Rückstrom verwendet. Der Hilfsgleichrichter führt nur den Arbeitsstrom und sperrt den Rückstrom. Die Röhre *RGN* führt in der Plusrichtung den Rückstrom und sperrt in der Minusrichtung den Arbeitsstrom. Die Einschaltung des Hilfsgleichrichters in den Hauptstromkreis der Anoden beeinflußt bei den Messungen den Anodenstrom zwar um einige Prozent,

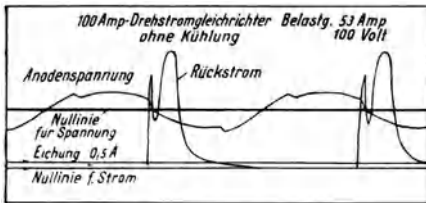


Bild 67 a

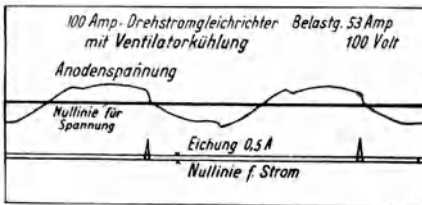


Bild 67 b

Bild 67. Oszillographisch gezeichneter Rückstrom a) mit natürlicher und b) mit künstlicher Kühlung des gemessenen Gefäßes

doch ist die Messung genau genug, um sie als Kriterium für den Vakuumzustand benutzen zu können. Der Strom der kleineren Röhre wurde dann um ein Vielfaches verstärkt und konnte in klarer Zeichnung im Oszillographen aufgenommen werden.

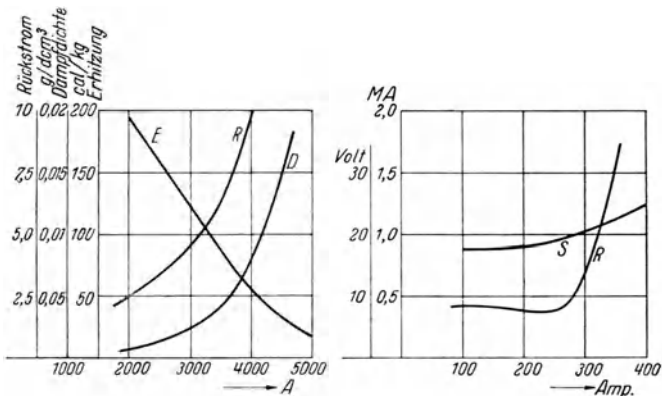
In Bild 67 sind die Rückstromkurven der Einfachheit halber über die Nulllinien gezeichnet. Das Bild zeigt die Unterschiede zwischen einem im Betrieb befindlichen ungekühlten und einem mit Ventilator gekühlten Gefäß. Die Werte sind 16 mA ohne Kühlung und 5 mA bei eingeschalteter Kühlung. Sobald die Belastung eines Glasgefäßes in Dauerzustand so hoch getrieben

wird, daß der Glimmstrom einen bestimmten Wert übersteigt, entsteht nach dieser Auffassung aus der Glimmentladung ein Lichtbogen, und die Rückzündung ist eingeleitet. Diese entsteht demnach bei einer vorbestimmten Bauart und Dampfdichte und ist nach Bild 65 von der Spannungshöhe abhängig.

Wenn auch die genannten Meßwerte voneinander abweichen und durch die verschiedenen Vorbedingungen abweichen müssen, ist doch immerhin der Beweis erbracht, daß der Rückstrom gemessen werden kann und in den gefundenen Größen ohne Einfluß auf den Wirkungsgrad bleibt. In Bild 68 ist als weiteres Versuchsergebnis in dieser Richtung der Anstieg der Rückströme ¹⁾ bei zunehmender Belastung erkenntlich; sie nehmen in der Nähe der Grenzbelastung stärker zu. Oszillographische Aufnahmen des Stromüberganges von der Glimm- zur Bogenentladung sind bis heute noch nicht bekanntgeworden. Auch ist es schwierig, genauer festzustellen, in welchem

¹⁾ A. Siemens, Doktordissertation 1937, „Die Erhitzung, eine thermische Größe“.

Zeitpunkt der Glimmstromkurve die Rückzündung einsetzt. Offenbar ist die Durchschlagmöglichkeit nach der Auffassung verschiedener Forscher in der Sperrichtung am größten, wenn der Scheitelwert der gesperrten Spannung seinen Maximalwert hat und nicht unmittelbar nach dem Verlöschen des Hauptlichtbogens. Die Grenzverhältnisse erscheinen bei den gleichmäßig mit Luft gekühlten Gefäßen gut übersichtlich, wenn diese vor der Erreichung der Grenzbelastung längere Zeit belastet wurden und erwärmt sind. Es entstehen jedoch Unregelmäßigkeiten, wenn bei einem festgelegten Strom eine Verstärkung oder Schwächung der Kühlung erfolgt. So können wassergekühlte Eisengleichrichter durch Veränderung der um-



A = Eisengleichrichter, durch Kühlwasserregelung auf gleicher Temperatur gehalten

B = Glasgleichrichter, mit Ventilator bei allen Belastungen gleichmäßig gekühlt

Bild 68. Verschiedene Werte in Abhängigkeit von der Belastung. R = Rückstrom in MA, D = Dampfdruck in g/dcm³, S = Spannungsabfall in V, E = Erhitzung in cal/kg. (A. Siemens, a. a. O.)

laufenden Wassermenge in ihren Meßwerten voneinander abweichen. Auch können Rückzündungen durch eine allzu starke Kühlung gefördert werden. A. Siemens ¹⁾ unterscheidet bei wassergekühlten Eisengleichrichtern zwischen den Rückzündungen im Grenzstromgebiet und den gelegentlich im Betriebe auftretenden Rückzündungen unterhalb dieser Grenze. Bei starker Unterkühlung können in Anodennähe gelangende Hg-Tropfen Rückzündungen im Gefolge haben. Neben der Einwirkung von Fremdgasen, unreinen Anoden und anderen Unregelmäßigkeiten ist demnach eine Rückzündung von der Hg-Dampfdrucke und Dampftemperatur abhängig.

Diese Feststellung gilt sowohl für Belastungen innerhalb der Leistungsgrenzen als auch für Überlastungen und Kurzschlüsse. Wenn nach obigen Ausführungen die Entstehung einer Rückzündung durch den Übergang einer Glimmentladung in eine Bogenentladung nachweisbar erscheint, so ist trotzdem nicht nachgewiesen, in welcher Weise die Rückzündungen bei

¹⁾ A. Siemens, Dissertation 1937.

Teillasten entstehen, weil bei diesen die Grenze der Glimmentladung nach Bild 68 noch nicht erreicht ist. In der Praxis führt man solche Störungen auf das Eindringen oder Freiwerden von Fremdgasen zurück. Es erscheint durchaus denkbar, daß Fremdkörper oder Hg-Tropfen auf die Graphitanoden treffen und während des Betriebes bei gleichzeitig genügend starker Elektronenemission verdampfen. Die Anode wird somit zur Kathode und

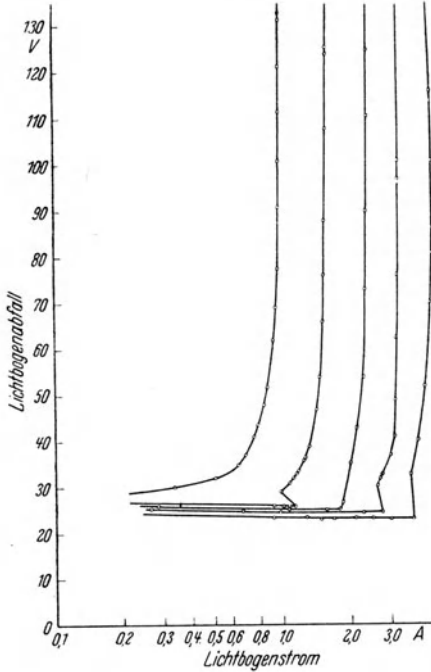


Bild 69. Stromspannungskennlinien der Grenzstrommessung (Dällenbach u. Gerecke, ETZ. 1936, H. 33)

der Weg des Rückstromes ist eingeleitet.

Außer diesen erwähnten Rückzündungen gibt es noch solche, die gleichzeitig bei kurzschlußartigen Überlastungen in Erscheinung treten und die durch den Kurzschluß bereits stark in Anspruch genommenen Gefäße zusätzlich belasten. Nach den Messungen von *Hull* und *Brown*¹⁾ liegt die einwandfrei bestimmbare Belastungsgrenze um so höher, je größer die Dampfdichte in der Anodennähe ist. Sobald in dieser bei starker Überlastung oder beim Kurzschluß zu wenig Hg-Dampf vorhanden ist, entsteht durch Ionenarmut ein steiler Anstieg der Brennspannung, der oft die Ursache von Sprungwellen ist, die im Transformatorkreis Schwingungen erregen und oft Rückzündungen im Gefolge haben.

Daher sollen die Gefäße mit höheren Temperaturen betrieben werden, um der Hg-Dampfverarmung im Lichtbogenweg vorzubeugen.

Die Erhöhung der Brennspannung bei Überlastungen ist in Bild 58 c gut zu erkennen. Es ist gemessen worden, daß die im Bild sichtbare Ausbuchtung beim Kurzschluß plötzliche Werte von mehr als 100 V annehmen kann. Die Belastung eines Gleichrichters, bei der die Brennspannung plötzlich und steil ansteigt, wird mit Grenzstrom bezeichnet. Nach *W. Dällenbach* und *E. Gerecke*²⁾ entstehen die Überspannungen beim Erreichen des Grenzstromes im Lichtbogen selbst. Dieser wirkt dann wie ein Sender für hoch-

¹⁾ Trans. Amer. Inst. El. Eng. 1931, S. 744, 788, H. 50; 1934, S. 1435, H. 53.

²⁾ ETZ. 1936, H. 33.

frequente Schwingungen, die Rückzündungen auslösen können. Bild 69 zeigt an einem kleineren Versuchsgleichrichter bestimmte Grenzstromwerte, die bei verschiedener Dampfdichte gemessen wurden. Der erkennbare steile Anstieg entsteht durch Ionenarmut bei kurzschlußartiger Stromentnahme. Demnach kann ein Gleichrichter bei übermäßig starker Kühlung durch Ionenverarmung auch unterhalb der Nennstromstärke im Grenzstromgebiet arbeiten und infolge der entstehenden Sprungwellen Rückzündungen erzeugen. Bei diesen Betrachtungen muß zwischen dem Hg-Dampfdruck in der Kühlkammer und im Lichtbogenweg unterschieden werden, doch eine zu starke Überkühlung in der ersteren hat oft auch eine Verarmung vor den Anoden im Gefolge. Andererseits bewiesen die Messungen nach Bild 65 eine gut bestimmbare Leistungsgrenze bei festliegenden inneren Vorgängen und Kühlwerten. Wenn also nach *A. Siemens* die wassergekühlten Eisengleichrichter bei Gefäßtemperaturen von höchstens 50 bis 60° betrieben werden und andererseits die Leistungsgrenzen, Bild 65, bei wesentlich höheren Gefäßtemperaturen ermittelt wurden, die etwa Bild 83 entsprechen, so steht dies nicht im Gegensatz zu der Beweisführung von *Hull* und *Brown*, *Dällenbach* und *Gerecke*; denn die Gefäßtemperatur von 60° C ist vielmehr durch die Dichtungsfrage und die Verdampfungsgefahr des Kühlwassers bestimmt. Auch gibt die Gitterschnellabschaltung (Abschnitt 13/k) eine Möglichkeit, gelegentlich eintretende Rückzündungen unwirksam zu machen. Durch die luftgekühlten pumpenlosen Eisengleichrichter mit ihrer thermisch festen Verschmelzung ist der Beweis erbracht, daß Eisengleichrichter bei hohen Temperaturen betrieben werden können. An ihnen wird demnach der durch eine hohe Hg-Dampfdichte entstehende Vorteil ausgenutzt, wie es bei Glasgefäßen schon immer geschah.

c) Die Form der Stromrichtergefäße

Schon vor Jahren wurde erkannt, daß die Lichtbogenführung in der Nähe der Anoden von eminenter Bedeutung ist¹⁾. Bild 70 zeigt in schematischer Darstellung ein Glasgefäß mit einem geraden Unterarm, in dem die Graphitanode angeordnet ist, ferner ein Gefäß mit einem geknickten Arm, so daß ein Unter- und Oberarm entsteht. Die Kurve *a* zeigt den Lichtbogenverlust bei geknickten und Kurve *b* bei geraden Armen. Der Unterschied beträgt zwar 1 bis 1,5 V, doch die Leistung wird wesentlich heraufgesetzt, wie Bild 71 zeigt. Es ist für den Gleichrichterfabrikanten ein ungeschriebenes Gesetz, daß die Anode in irgendeiner Weise so angeordnet sein muß, daß vom Kathoden-Hg-Spiegel keine gerade Linie nach der Anode gezogen werden kann, um Gleichspannungen über 200 V erzeugen zu können. Auf diese Weise entstanden die geknickten Arme bei den Glasgefäßen und die Schutzschilde oder Anodenschutzhülsen bei den Eisengleichrichtern. Durch

¹⁾ Die Bilder 70 bis 71 mögen hier richtungweisend dienen. Die Werte sind vom Verfasser im Laufe mehrjähriger Beobachtungen zusammengetragen.

den heißen Kathodenfleck wird wesentlich mehr Hg verdampft, als für die Aufrechterhaltung des Lichtbogens erforderlich ist. Die Angaben schwanken zwischen dem 15- bis 20fachen Wert. Daher soll soviel wie irgend möglich Hg-Dampf unmittelbar über dem Hg-Spiegel abgesaugt werden. Die Eisen- gleichrichter erhalten zu diesem Zweck Kühldome oder kräftige Innen- kühler und die Glasgleichrichter weit ausbauchende Kühlkammern oberhalb der Kathode. Es ist jedoch zu beachten, daß eine zu große Hg-Dampf- verarmung in der Anodennähe die Rückzündungen begünstigt.

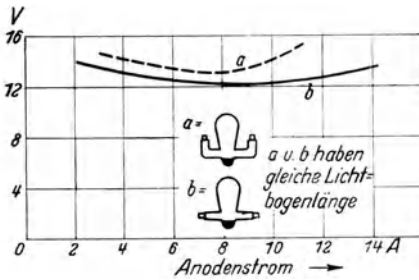


Bild 70. Einfluß der Armform auf die Lichtbogenspannung

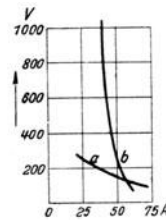


Bild 71. Leistungsgrenzen der Glasgleichrichtergefäße
 a nicht geknickter Anodenarm.
 b einmal geknickter Anodenarm

d) Die Anodenarmform der Glasgefäße

ist im Laufe der Jahre oft geändert worden. Gewisse Schwierigkeiten entstanden bei der Einführung der künstlichen Luftkühlung. Wie aus Abschnitt 5, f hervorgeht, verwendet man ein und dieselbe Gefäßgröße, beispielsweise für 60 A ohne und für 150 A mit Luftkühlung, infolge dessen wird bei 150 A Belastung die etwa 2,5fache Hg-Dampfmenge erzeugt. Trotz der stärksten Kühlung des Kondensraumes drängen bei der höheren Last größere Dampfmengen in die Anodenarme. Da die Kühlluft auch die Arme erreicht, wirken diese zum Teil als Zusatzkondensraum, der Hg-Dampf kondensiert stark in der Anodennähe und die Hg-Tropfen erzeugen bei falscher Armform Rückzündungen, auch unter den gemessenen Höchststromwerten. Die Unterarmfortsätze, die von *Schott* und dem Verfasser erstmalig 1922 verwendet wurden, scheinen wesentlich zur Vermeidung der Rückzündungen beigetragen zu haben. Wie die Bilder 28 bis 34 zeigen, werden diese Armfortsätze heute mit keulenartigen Erweiterungen ausgeführt, um die Saugwirkung zu erhöhen. Sie bilden bei starker Kühlung einen Raum mit Unterdruck gegenüber den Anoden und saugen als sekundäre Kühlkammer zwar Hg-Dampf aus der Hauptkühlkammer an, um den Dampf zu kondensieren, sie saugen aber auch die Ionenwolke ¹⁾ von der Anode schnell fort, wenn an dieser der Lichtbogen erlischt und die nächste Anode die Stromlieferung übernimmt. In den Anodenarmen findet demnach eine ständige Dampfströmung statt.

¹⁾ *Issendorf*, ETZ. 1929, H. 30.

e) Die Dampfströmung

kann beispielsweise bei zu großem Hohlraum oberhalb der Anode dazu führen, daß dieser einen Unterdruck enthält, so daß die Ionenwolke beim Verlöschen der Anode an dieser vorbei in den oberen Raum gezogen wird. Hierdurch werden die Rückzündungen begünstigt. Aus diesen Gründen soll oberhalb der Anoden nur ein kleiner Raum vorhanden sein. Vor Jahren wurden als Notbehelf wärmestauende Manschetten¹⁾ über die Anodenschlüsse gesetzt, um durch einen Dampfüberdruck die Strömung zu stauen. Ferner haben Versuche in dieser Richtung ergeben²⁾, daß durch einen an der Anode vorbeistreichenden neutralen Hg-Dampfstrahl der Rückstrom stark verringert wurde. Sämtliche Armeinzerteile sowie Schutzschilde und Einzelteile der Eisengefäße müssen so angeordnet sein, daß in ihnen kondensiertes Hg ohne großen Reibungswiderstand nach dem Kathoden-Hg ablaufen kann.

f) Die Messung der Lichtbogenspannung (Lichtbogenverlust)

Der Lichtbogenverlust setzt sich aus dem Kathodenabfall, Lichtbogen und Anodenabfall zusammen. Eine angenäherte Meßmethode gestattet ein von einer Anode zur Kathode fließender Gleichstrom (Bild 85). Die zwischen ihnen gemessene Spannung bei brennendem Lichtbogen zeigt den Lichtbogenverlust. Bei dieser Messung werden jedoch nicht alle Vorgänge berücksichtigt, die bei der Wechselstrombelastung einer Halbwelle auftreten. Bild 72 zeigt eine oszillographische Aufnahme einer Brenn-

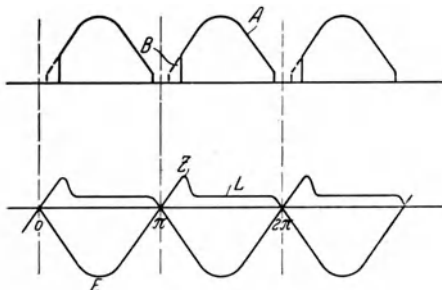


Bild 72. Zündspitze und Anodenstromverzerrung bei Vernachlässigung der Induktivitäten im Gleichrichterstromkreis. *E* Anodenspannung, *Z* Zündspitze, *L* Lichtbogenbrennschpannung, *A* Anodenstrom, *B* Stromverzerrung durch die Zündspitze

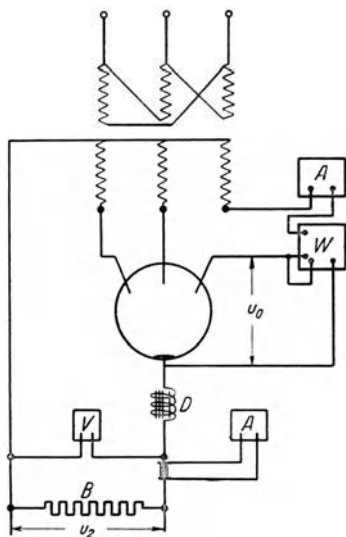


Bild 73. Messung der Lichtbogenverlustspannung (BBC.). *D* Drosselspule, *A* Amperemeter, *W* Wattmeter, *V* Voltmeter, *B* Belastung, u_0 Lichtbogen-spannung, u_2 Gleichspannung

¹⁾ G. W. Müller, Quecksilberdampf-Gleichrichter. Verlag Norden, 1927.

²⁾ Issendorf, ETZ. 1929, H. 30.

periode¹⁾. Beim Einsetzen eines jeden Lichtbogens ist eine erhöhte Zündspannung erforderlich, die mit Phasenzündspannung bezeichnet werden

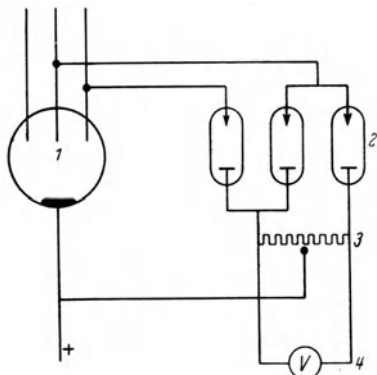


Bild 74. Meßanordnung zur Bestimmung des Lichtbogenverlustes an Gleichrichtern. 1 Gleichrichtergefäß, 2 - Meßröhren (sperren den Rückstrom), 3 Meßwiderstand, 4 Voltmeter

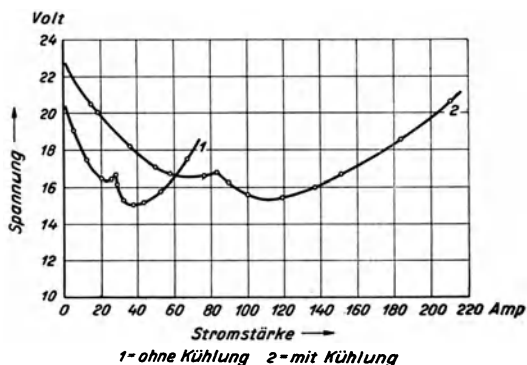


Bild 75. Spannungsabfall (Brennspannung) an Glasgleichrichtern

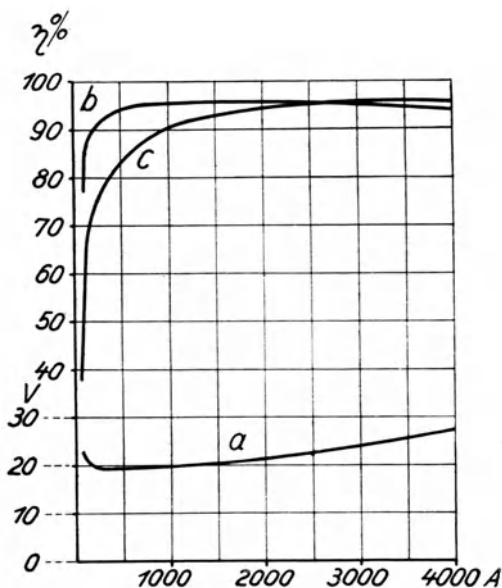


Bild 76. Lichtbogenverlust und Wirkungsgrade an Groß-Eisenstromrichtern (AEG.). a - Lichtbogenverlust, b - Wirkungsgrad eines Eisengleichrichters, c - eines rotierenden Umformers

kann im Gegensatz zur Einschaltzündung des Stromrichters. Diese Spannungsspitze entsteht durch den Ionisierungsvorgang; ihre Höhe ist von der Belastung und Temperatur abhängig. Sie ist bei kalt eingeschalteten Gefäßen höher als später im Betriebe.

Um den Mittelwert des gesamten Verlustes zu erfassen, wird die Wattmetermeßmethode häufig angewendet (Bild 73). Diese für Eisengleichrichter ausgebildete Meßanordnung kann auch für jeden anderen Gleichrichter verwendet werden. Auf diese Weise entstehen aufschlußreiche Kurven über die Leistungsfähigkeit der Stromrichter-

¹⁾ Vielfach wird die Brennspannung aus oszillographischen Aufnahmen ermittelt. G. Reinhardt, Die Messung des Lichtbogenabfalles, E. u. M. 1939, H. 41/42; W. Nowag, BBC-Nachr. 1933, H. 4.

gefäße. In Bild 74 ist eine von *Fr. Hellmuth*¹⁾ entwickelte Meßschaltung dargestellt. Bild 75 zeigt nach einer älteren Messung in Kurve 1 den Lichtbogenverlust eines 60-A-Glasgefäßes ohne fremde Kühlung und in Kurve 2 mit künstlicher Luftkühlung. Das Bild läßt erkennen, wenn der Dampfdruck durch die Kühlung um den 2,5- bis 3fachen Betrag vermindert wird, die Leistung des Gefäßes um diesen Betrag steigt. Den Spannungsverlust eines größeren Eisengleichrichters läßt Bild 76 erkennen.

g) Die Leistungssteigerung der Glasgleichrichter

vor etwa 15 Jahren ist nur durch diese vorteilhafte Eigenschaft der Hg-Dampfgefäße ermöglicht worden. Nach dem Kurvenpaar Bild 75 steht der Lichtbogenverlust zu der Hg-Dampfmenge in einem bestimmten Verhältnis. Bei noch weiterer Steigerung der Belastung steigt die Lichtbogen-spannung immer mehr an, bis der Grenzstrom erreicht ist, der einen plötzlichen Anstieg der Brennspannung auf höhere Spannungen im Gefolge hat. Im Interesse eines guten Wirkungsgrades wird das gemessene Gefäß nicht stärker als mit 200 A belastet.

Es wurden vom Verfasser vor Jahren Versuche ausgeführt, um die Leistung durch eine intensive Flüssigkeitskühlung noch weiter zu steigern. Das beste Mittel hierfür erschien Öl. Bild 91 zeigt den Schnitt eines ausgeführten Gleichrichters, der auch Jahre hindurch gut gearbeitet hat. Mit Hilfe dieser Ölkühlung war es möglich, den Lichtbogenverlust nach den Messungen im Bild 77 noch bei 500 A Belastung unter 20 V zu halten, so daß gegenüber dem ungekühlten Gefäß eine 8- bis 9fache Leistungssteigerung erzielt wurde. In ähnlicher Weise werden auch Eisengleichrichter mit umlaufendem Wasser gekühlt. Da diese von jeher mit Wasserkühlung hergestellt wurden, sind Messungen ohne Kühlung kaum gemacht worden. Es ist aber anzunehmen, daß umlaufendes Kühlwasser die Leistung gegenüber den ungekühlten Gefäßen um den 10- bis 12fachen Betrag steigert, denn Wasser hat eine höhere Wärmeleitfähigkeit als Öl. Die mit Öl gekühlten Glasgleichrichter sind nicht weiter in die Praxis eingeführt worden.

Der bei allen Belastungen praktisch gleiche Lichtbogenverlust innerhalb der festgelegten Leistungsgrenzen ist maßgebend für den Wirkungsgrad, der von $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{1}$ Belastung nahezu unverändert ist. Wie die Verlustkurven zeigen, steigt der Lichtbogenverlust im Gebiet kleiner Belastungen stark an. Dieser Anstieg wird auf den Einfluß der Anodenarme oder Schutzhülsen zurückgeführt. Die Wände der Anodenarme halten offenbar in ihre Nähe gelangende Elektronen teilweise fest. Hierdurch werden Ionen angezogen, so daß die verbleibenden Elektronen mit erhöhter Geschwindigkeit arbeiten

¹⁾ *Fr. Hellmuth*, Helios, 1933, Nr. 29; auch *A. Glaser* u. *Müller-Lübeck*, „Gittergesteuerte Stromrichter“. Berlin, Jul. Springer, 1936.

müssen, was eine größere Spannung erforderlich macht. Also treiben die Wände die Spannung um so mehr in die Höhe, je enger die Anodenarme sind. Daher sollen sie so weit wie irgend möglich gehalten werden. Diese Erweiterung soll jedoch die Rückzündungssicherheit nicht herabsetzen. Je größer der Dampfdruck bei zunehmender Belastung steigt, desto geringer ist der Einfluß der Wände, weil sich der Lichtbogen nur bei kleineren Strömen im ganzen Arm verbreitet und bei wachsendem Strom enger geschnürt wird, bis er bei großen Strömen in Form eines hell leuchtenden Strahles fließt. Der Verlust nimmt bei steigendem Dampfdruck und Strom zuerst ab, durchläuft ein Minimum und steigt dann

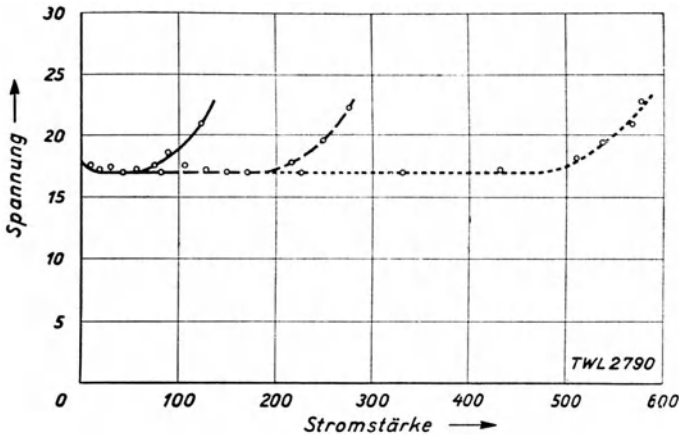


Bild 77. Spannungsverlust im Lichtbogen eines Glaskörpers. 1 — ungekühlter Glaskörper, 2 — luftgekühlter Glaskörper, 3 ölgekühlter Glaskörper, ——— Kurve 1, - - - Kurve 2, Kurve 3

wieder an. Interessant sind in diesem Zusammenhang die neuesten Versuche von A. Siemens¹⁾. Es wurde nachgewiesen, daß der Lichtbogenabfall an Eisengleichrichtern bei starker Kühlung größer wird. Die Unterschiede betragen 2 bis 3 V bei Gefäßtemperaturen von 40 und 60° C. Auch zeigen zu stark gekühlte Gefäße die im Bild 58 c erkennbare Ausbuchtung der Brennspannung, die auf eine Ionenverarmung im Lichtbogenweg zurückzuführen ist.

h) Der Kathodenfall

ist der Teil des Lichtbogenverlustes in unmittelbarer Kathodennähe. Seine Ursachen sind die Verdampfungswärme, die Wärmeverluste durch Abstrahlung, die positive Raumladung und die hierdurch bedingte Elektronenaustrittsarbeit. Andererseits wird durch den Ionenaufprall Energie aus

¹⁾ A. Siemens, Dissertation 1937 a. a. O.

der Entladungsbahn zurückgewonnen. Nach Messungen von verschiedenen Forschern wird der hieraus resultierende Kathodenfall, je nach der Gefäßgröße, mit 5 bis 10 V angenommen¹⁾. Die verdampfte Hg-Menge kann durch eine starke Kathodenkühlung verringert werden, auf diese wird bei Eisen- gleichrichtern verschiedentlich besonderer Wert gelegt. Mit Rücksicht auf die Raumtemperatur bei luftgekühlten Glasgleichrichtern werden von *Jungmichl*²⁾ Leistungsunterschiede zwischen Gleichrichtern angegeben, die beispielsweise bei 12 und bei 35° Raumtemperatur arbeiten, weil bei wärmerer Kühlluft gesetzmäßig weniger Hg-Dampf kondensiert. Im allgemeinen geben jedoch die Firmen für ihre handelsüblichen Ausführungen eine zulässige Raumtemperatur von 35° an, gleich den Regeln für Maschinen und Transformatoren. Dies ist jedoch kein Beweis gegen die obige Angabe, sondern die Firmen wählen ihre Gleichrichtergefäße groß genug, damit sie bei Temperaturen von 35° und darunter zuverlässig arbeiten.

Der Kathodenfleck ist der Ausgangspunkt der Ventilwirkung. Er verdampft das Hg und liefert die Elektronen. Seine Temperatur ist vielfach gemessen worden, doch weichen die Werte voneinander ab, am meisten werden neuerdings 500 bis 600° genannt. Die Stromdichte in ihm soll 4000 A · cm² betragen. Der Fleck tanzt als weißglühender Lichtpunkt auf dem Hg-Spiegel unregelmäßig hin und her. Bei größeren Stromstärken teilt sich der Kathodenfleck. Die Beobachtungen gehen dahin, daß jeder Fleck nur etwa 50 A³⁾ Strom führt. Demnach sind bei 1000 A etwa 20 Lichtflecke sichtbar, wodurch der Hg-Spiegel bei einem in Betrieb befindlichen Gleichrichter wie die Oberfläche einer stark kochenden Flüssigkeit aussieht. Bei geringen Strömen wird der Kathodenfleck so klein, daß die Ionen gelegentlich neben ihm aufschlagen. Hierdurch kann der Lichtbogen erlöschen, weil eine Elektronenverarmung eintritt. Dieser kritische Zustand ist die Minimalstromgrenze, die durch die Fremd- oder Hilferregung überbrückt wird.

Die verdampfte Quecksilbermenge wird von *Güntherschulze* mit $2,08 \cdot 10^{-3}$ g pro Asec angegeben. Von anderer Seite ist festgestellt worden, daß die Dampfmenge pro A mit zunehmender Stromstärke etwas zurückgeht. Der Dampf strömt in Kathodennähe mit einer Geschwindigkeit nach *Siemens* und *Güntherschulze*⁴⁾ bei den ungekühlten Gefäßen mit $1,34 \cdot 10^3$ cm/sec. Er strömt ferner mit einer Geschwindigkeit von $3 \cdot 10^3$ cm/sec auf die gekühlten Wandflächen der Kühlkammer zu. In die Kühlkammer strömen im allgemeinen nur die elektrisch neutralen Dampfteilchen, die bei dem Prozeß zuviel verdampft sind und zu Hg-Tropfen kondensieren sollen. In der Kühlkammer findet ein reiner Kondensationsvorgang statt, wie bei jedem Dampf. Daher ist in ihm auch eine ständige beträchtliche Unruhe.

¹⁾ *Espe* u. *Knoll*, S. 304 u. 353. Berlin, Jul. Springer.

²⁾ *Siemens-Zeitschr.* 1933, Bd. 13.

³⁾ *Güntherschulze*, *Elektr. Gleichrichter und Ventile*. Berlin, Jul. Springer, 1929.

⁴⁾ *A. Siemens*, a. a. O.; *Güntherschulze*, a. a. O. S. 65—68.

i) Die Fixierung des Kathodenfleckes

Im Schrifttum wird verschiedentlich darauf hingewiesen, daß die verdampfte Hg-Menge und der Lichtbogenverlust durch die Fixierung des unruhigen Kathodenansatzpunktes reduziert werden kann¹⁾. *Weintraub* versuchte bereits 1910, den Fleck mit Hilfe eines aus dem Hg-Spiegel herausragenden Wolframstiftes festzusetzen. Der Lichtbogenansatz sitzt auch bis zu einem gewissen Strom fest auf dem Stift, doch bei großer Belastung springt der Lichtfleck von dem Wolframstift ab und bewegt sich wie bei den Kathoden ohne den Stift auf dem Hg-Spiegel. Daher wurde nach Verbesserungen gesucht, um die Ansatzmöglichkeit des Lichtfleckes auf festen Teilen zu vergrößern.

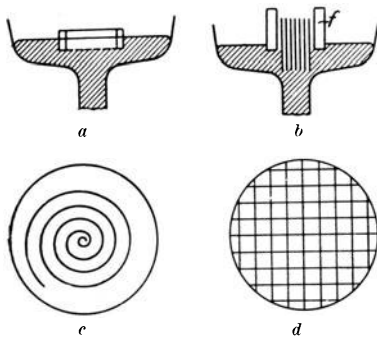


Bild 78. Verschiedene Ausführungen zur Fixierung des Kathodenfleckes (von SSW. u. a.). a - Wolframring, b - Dochkathode, f - Quarzring, c - Wolframspirale, d - Wolframgitter

So zeigt Bild 78 einige Ausführungsbeispiele in Form von Ringen, Spiralen, Gittern und einem Bündel von Drähten in Dochtform²⁾. Der den Docht umgebende Ring *f* besteht aus Quarz und soll das Überspringen des Lichtbogens auf den Hg-Spiegel erschweren. Gleichrichter mit ähnlichen Einrichtungen sind auch im Betriebe erprobt worden, doch sind sie bis heute nicht Allgemeingut der Technik geworden. Die Angaben von *Espe* und *Knoll* sowie *Kobel*³⁾ zeigen auch keine einheitliche Auf-

fassung in den erzielten Gesamtergebnissen, daher wollen wir dieses Problem, das nur gestreift werden sollte, wieder verlassen.

k) Die Vorgänge im Lichtbogen

Die Dampfmenge ist in den Anodenarmen oder in den Anodenschutzhülsen der Entladungsbahn geringer als in der Kühlkammer⁴⁾. Besonders beim wassergekühlten Eisengleichrichter besteht weit eher die Möglichkeit, den Hg-Dampfstrom von der Anodengegend nach der Kühlkammer abzusaugen. Obwohl durch das Brennen und Verlöschen der Lichtbogen ständige Strömungen in Anodennähe und in den Armen vorhanden sind, ist doch die Dampfeinströmung in die Arme kleiner als in die Kühlkammer. Der

¹⁾ Nach *Espe* u. *Knoll*, a. a. O., S. 304 ist der Kathodenfall 8 bis 10 V bei umherirrenden und nur 7 bis 8 V bei fixiertem Kathodenfleck.

²⁾ Von SSW. im Schrifttum mit Dochkathode bezeichnet.

³⁾ *E. Kobel*, ETZ. 1932, H. 37.

⁴⁾ *Güntherschulze*, ebenda, S. 68.

Druck und die Temperatur sind in der Kühlkammer verhältnismäßig niedrig. Der Dampf bei Glasgefäßen strömt nach *Güntherschulze* mit einem Druck von etwa 280 Torr in die Kühlkammer und verringert sich nach den gekühlten Wänden zu auf Null. In den Anodenarmen sind Drücke von 400 Torr und mehr möglich. Dem Druck von 280 Torr soll eine Temperatur von 200° C entsprechen.

Während die Dampfströmung in die Kühlkammer in der gleichen Richtung erfolgt, findet in den Anodenarmen und Schutzhülsen ein Kreislauf statt. Dieser wurde von *Siemens*¹⁾ ausgewertet (Bild 79), um Richtlinien für einen optimalen Kreislaufprozeß zu schaffen. Die Unterschiede zwischen dem Druckanstieg beim Brennen des Lichtbogens, und dem Druckausgleich nach dem Verlöschen werden mit Erhitzung der in den Armen abgeschlossenen Dampfmenge verglichen.

Um den Kreislaufprozeß nach Bild 79 im Stromrichterprozeß wirksamer zu gestalten, sollen die Schutzhülsen am Austritt oder die Anodenarme beim Übergang zum Unterarm zweckmäßig eine Verjüngung erhalten. Zur näheren Erläuterung dieser neuartigen Aufgabenstellung sei auf die Literatur verwiesen. Die Temperatur in der eigentlichen Lichtsäule wird nicht einheitlich genannt, auch muß zwischen der Ionen- und Elektronentemperatur unterschieden werden.

Letztere ist wesentlich höher als die Ionentemperatur. Die mittlere Hg-Dampftemperatur entspricht etwa der Temperatur der Anodenarme oder Schutzhülsen²⁾. In der Anodennähe steigt die Temperatur der Glasarme bis zu 250°, sie beträgt im Unterarm 140 bis 160° (Bild 82).

Eine bestimmte Dampfmenge wird in den Armen kondensiert und läuft in Tropfenform nach der Kathode zurück. Um den Arbeitsprozeß nicht zu unterbrechen, muß daher stets neuer Dampf in die Anodenarme oder Schutzrohre einströmen können oder dort aufrechterhalten werden.

1. Die *freie Weglänge* ist ein Maß für physikalische Untersuchungen der Vorgänge im Lichtbogen. Man bezeichnet hiermit den Abstand zwischen zwei Elektronen, Ionen, Gasteilchen oder Molekülen.

¹⁾ *A. Siemens, a. a. O.*

²⁾ *Güntherschulze* gibt im genannten Buch (Gl. u. V., a. a. O.) auf S. 71 für Glasarme 200 bis 350° C und für die Achse des Lichtbogens bis zu 10000° C an.

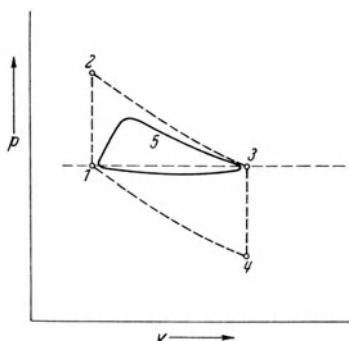


Bild 79. Kreisprozeß im Anodenarm oder Anodenschutzrohr (*A. Siemens, a. a. O.*). 1-2-3-4 - Idealkreisprozeß im $p-v$ -Diagramm, 5 - wirklicher Verlauf des Kreisprozesses. Die Veränderung entsteht durch Wärmeausgleich und Druckausgleich an der Anodenarm- oder Schutzrohröffnung beim Arbeiten, Verlöschen und Aussetzen des Lichtbogens

Bei 1 mm Hg-Druck ist die freie Weglänge¹⁾ der Moleküle bei 0° C für:

Luft	0,0219 mm
Hg	0,0217 „ (bei 300° C)
Ne	0,0957 „
H ₂ O	0,0307 „
Ar	0,0482 „

Für die Elektronen wird der $4 \cdot \sqrt{2}$ -fache Wert der Moleküle zugrunde gelegt, zwischen denen sie sich bewegen. Mit steigendem Gasdruck wird bei konstanter Temperatur die Anzahl der Moleküle größer und die freie Weglänge kleiner.

2. Die *Voltgeschwindigkeit* ist die erreichte Geschwindigkeit eines Elektrons bei einer bestimmten Spannung, bei der es eine Strecke verlustlos, also ohne Energieabgabe, durchlaufen hat. Sie wird errechnet aus der Beziehung

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m}} \dots \dots \dots (5)$$

m = Masse, q = Ladung, U = Volt²⁾.

Die Elektronen haben bei 1 V Spannungsdifferenz eine Geschwindigkeit von 600 km in einer Sekunde.

3. Die *Anregungsspannung* für die Atome oder Moleküle ist die Spannung, bei der ein um den Atomkern kreisendes Elektron durch ein im elektrischen Feld strömendes Elektron aus seiner Bahn gehoben wird, ohne aus dem Atomverband entfernt zu werden. Die angeregten Elektronen fallen nach 10^{-8} sec in ihre alte Bahn zurück und erzeugen hierbei eine Lichtstrahlung.

4. Die *Ionisierungsspannung* dagegen ist weit höher; sie beschleunigt z. B. ein Elektron so weit, daß ein getroffenes Elektron aus dem Atomverband befreit wird; es bleibt dann ein positiver Ladungsträger zurück. Dies ist die sogenannte Stoßionisation. In der Tabelle 5¹⁾ sind einige Anregungsspannungen A und Ionisierungsspannungen J für einige Gase und Dämpfe angegeben.

Tabelle 5

Gas	A	J	Gas	A	J
Hg	4,86	10,4	Na	2,12	5,12
Ne	16,6	21,8	Mg	2,70	7,61
He	20,5	24,5	Cs	1,48	3,87
Ar	12	15,3	Ur		12,5
H ₂	10,1	15,9	Kr	5,2	11,5

Die Entladungstrecken beginnen durch die angeregten Atome bei einer Spannung zu leuchten, die höher als die Anregungsspannung ist.

¹⁾ Engel u. Steenbeck, auch Güntherschulze, a. a. O., S. 25 u. 29.

²⁾ Nach dem elektrostatischen Maßsystem.

5. Die *Leuchterscheinung* in der Entladungsbahn ist von der Anregungsspannung des Gases oder Dampfes abhängig. Die nach 10^{-8} sec zurückfallenden Elektronen, und auch die von einem Ion eingefangenen Elektronen, erzeugen einen Lichtstrahl einer Wellenlänge, die dieser Anregungs- und Ionisierungsenergie entspricht. Dies ergibt beispielsweise beim Hg-Dampf ein bläulich weißes Licht und bei Neon ein rötliches Licht.

6. Die *Lichtsäule* ist bei kleinen Strömen in der Nähe der Anoden nur schwach sichtbar, sie schiebt sich bei wachsendem Strom immer mehr auf die Kathode zu. Die Säule erfüllt bei kleiner Belastung den gesamten Rohrquerschnitt des Anodenarmes oder Schutzrohres. Bei größerem Dampfdruck und steigendem Strom wird der Lichtbogen immer mehr zusammengeschnürt. Die Zusammenschnürung ist auf den wachsenden Dampfdruck zurückzuführen. Der aus der heißen Lichtsäule abgedrängte Dampf ist wenig oder gar nicht an der Entladung beteiligt.

7. Die *Anodenschutzrohre der Eisengleichrichter* beteiligen sich nicht an der Lichtbogenentladung, sie sind zu kalt, um als Kathode zu wirken, im wesentlichen werden an die Rohrwände gelangende Elektronen aufgesaugt und aus dem Prozeß entfernt, denn es ist keine Energie da, sie für die Entladungsbahn nutzbar zu machen. Diese Schutzrohre sind heute nahezu bei allen Firmen von den übrigen Metallteilen des Gefäßes isoliert angeordnet und dienen nach dem Verlöschen des Lichtbogens zur schnellen Entionisierung der Entladungsbahn.

8. Der *Anodenfall*. Dies ist der Spannungsverlust in unmittelbarer Nähe der Anoden. Er ist nach verschiedenen Feststellungen von der Höhe der Belastung wenig abhängig. Der Anodenfall ändert seine Werte jedoch nach der Anodenform und dem die Anoden umgebenden Raum. Graphitanoden werden daher oft als Hohlkörper ausgebildet, auch werden sie mit sternförmigem Querschnitt ausgeführt.

Die Literaturwerte über den in Anodennähe gemessenen Spannungsabfall schwanken zwischen 2,5 und 6 V. Für die Messung werden Sonden verwendet, doch eine einwandfreie Sondenmessung ist wegen der hiermit eintretenden Veränderung der Lichtbogenvorgänge noch nicht gefunden worden. Daher wurde eine Zunahme des Bogenverlustes unmittelbar vor der Anode oft bezweifelt. Dem widerspricht jedoch die Feststellung, daß *Güntherschulze* bei verschiedenen Anodenformen Unterschiede von 2,5 bis 5,6 V¹⁾ im Anodenabfall gefunden hat. Eine Erhöhung entsteht durch Elektronenraumladung, also durch eine Anreicherung vor der positiven Anode, ehe die Elektronen in diese eintreten. Die Elektronenkonzen-

¹⁾ *Drozdow*, Elektrischeswo 1938, H. 2, hat den Verlust vor den Anoden durch Wärmestrahlung gemessen und gibt 4 bis 6 V an; *Güntherschulze*, Elektr. Gl. u. V., a. a. O., S. 80.

tration ist von der Höhe des Dampfdruckes abhängig und wie durch Messungen bewiesen wurde, von der Anodenform.

l) Das Anodenmaterial

Die Glasgefäße erhielten von jeher Graphitanoden. Größere Eisengleichrichter wurden früher mit Stahlanoden ausgerüstet. In neuerer Zeit werden auch für die größten Stromstärken häufig Graphitanoden verwendet. Graphit schmilzt erst bei 3800 bis 3900°. Der elektrische Widerstand ist dagegen schlecht, doch werden die Anoden in großen Dimensionen hergestellt, so daß die Stromwärme durch *Ohmsche* Verluste wenig in Erscheinung tritt. Die wichtigsten Merkmale des Graphits sind:

Hoher Schmelzpunkt,
Günstige Wärmeabstrahlung,
Gute Wärmeleitfähigkeit ¹⁾,
Hohe Elektronenaustrittsarbeit,
Unempfindlichkeit gegen Hg,
Leichte Werkstättenbearbeitung.

Während des Betriebes werden nach und nach staubartig kleine Teilchen von den Anoden abgestoßen, die sich als braunschwarze Schicht niederschlagen oder als Staubschicht auf dem Hg-Spiegel schwimmen. Wenn der Graphit nicht genügend rein ist, treten im Betriebe die Fremdkörper (meist Kalk oder Alkali) an die Oberfläche. Da diese eine geringe Elektronenaustrittsarbeit haben, entstehen Rückzündungen. Nach diesen zeigen sich an den Anoden weiß schimmernde Flecke, die vom Zerstäuben der Fremdkörper herrühren. Solche Flecke sind bei Glaskörpern gut erkennbar. Diese Erkenntnis führte dazu, nach besonderen Reinigungsverfahren der Graphitanoden zu suchen. Um den Ausheizprozeß während des Evakuierens zu beschleunigen, erhalten die Anoden zweckmäßig eine geriffelte Form. Die Graphitanoden sollen nach der Fertigstellung auch nicht mit den Händen in Berührung kommen, denn Handschweiß löst eine ähnliche Wirkung wie Fremdkörper aus.

m) Das Quecksilber (Hg)

Quecksilber ist das einzige bei normalen Raumtemperaturen noch flüssige Metall. Der Siedepunkt liegt im freien Raum bei etwa 357° C ²⁾. Das Hg friert erst unter — 39°, es muß vor dem Einfüllen oder Destillieren in die Entladungsgefäße chemisch rein sein. Eine weitere Reinigung erfolgt während des Ausheizens. Im Hg sind geringe Zusätze verschiedener Metalle vor-

¹⁾ Sie wird von *Espe* u. *Knoll*, a. a. O., S. 111 mit 0,286 (cal. cm sec Grad) für 25 bis 1000° C angegeben.

²⁾ Der Siedepunkt wird in evakuierten Gefäßen mit 80° C angenommen.

handen (Pb, Cu, Bi, Zn, *Miethe* fand auch Spuren von Gold im Hg), so daß eine gute chemische Vorreinigung erforderlich ist. Das Hg wird in Ton- oder Eisenflaschen aufbewahrt und soll von der Luft abgeschlossen werden. Der Graphitstaub geht mit dem Hg keinerlei Verbindungen ein, wohl aber Oxyde, wie z. B. Eisenoxyd. Das Hg greift die meisten Metalle außer Eisen, Wolfram, Molybdän, Tantal an. Auch Gummi muß vor der direkten Berührung mit dem Hg geschützt werden. Die an kalten Glas- oder Eisenwänden kondensierten Dampfteilchen laufen an ihnen in Tropfenform leicht ab, so daß es kaum ein besseres Material gibt, um eine stetige Erneuerung der flüssigen Kathode zu erhalten.

Für den inneren Vorgang im Stromrichtergefäß sind folgende Daten von Interesse ¹⁾:

Spezifisches Gewicht bei 20° C - 13,54,

Atomgewicht 200,61

Masse eines Hg-Atoms $200,61 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}$ g,

Masse eines Elektrons $8,98 \cdot 10^{-28}$ g,

Kathodenfall etwa 5 bis 10,4 V,

Anodenfall 2,5 bis 6 V,

Spannungsabfall in der freien Lichtbogenstrecke:

Gleichstrom 0,02 bis 0,05 V/cm,

Wechselstrom 0,05 bis 0,2 V/cm,

Temperaturen:

Kathodenfleck etwa 600° C,

Anoden 600 bis 700° C,

Kathoden-Hg 50 bis 150° C,

Kathodenfleck Größe $2,53 \cdot 10^{-4}$ cm²/A,

„ Stromdichte 4000 A/cm²,

„ Wärmeausstrahlung in das Hg 0,268 Watt/A,

„ Geschwindigkeit etwa 10 m/sec,

Verdampfte Hg-Menge etwa $2-7 \cdot 10^{-3}$ g/A sec ²⁾,

Druck in der Kühlkammer 0,005 bis 0,030 mm/Hg/S.

Die Glimmentladung entsteht nach verschiedenen Angaben bei einem Dampfdruck von 0,01 Hg/S bei 400 V. Diese Spannung wird mit abnehmendem Druck höher und beträgt 15000 V bei einem Druck von 0,0005 mm. Diese Zahlen stimmen mit der Praxis offenbar überein, denn Gleichrichter erzeugen unter 400 V Scheitelwert in der Sperrichtung kaum Rückzündungen. Daher werden auch Gleichrichtergefäße unter 200 V ohne geknickte Anodenarme und Anodenschutzrohre ausgeführt.

¹⁾ Teilweise aus *Marti* und *Winograd*, übersetzt von *Gramisch*, Stromrichter. Berlin, Verlag Oldenbourg, 1933. S. 20.

²⁾ *Espe* u. *Knoll*, a. a. O., S. 304 geben je nach den Kühlverhältnissen $1 \cdot 9 \cdot 10^{-3}$ g pro Asec an (vgl. auch S. 73 dieser Schrift).

6. Die Überlastungsfähigkeit, die Kurzschlußfestigkeit und der Überlastungsschutz der Hg-Stromrichtergefäße

Um die Grenzwerte der Gleichrichtergefäße festzustellen, sind einige Versuchsergebnisse und Messungen wiedergegeben. Messungen ähnlicher Art sind an wassergekühlten Eisengefäßen nicht gemacht worden und von den luftgekühlten, pumpenlosen Eisengleichrichtern liegen Ergebnisse noch nicht vor, daher werden solche von Glasgefäßen zugrunde gelegt. Gleichzeitig wurden auch die den Anoden der Gefäße vorgeschalteten Sicherungen und Schalteinrichtungen untersucht (Bild 4). Die bekannten Diazepatronen¹⁾ werden von allen Firmen seit Jahren erfolgreich im Gleichrichterbau verwendet. In automatischen Gleichrichter-Unterwerken sieht man auf der Gleichstromseite selbsttätige Schalter vor, die einen Überstrom oder Kurzschluß früher auslösen sollen, ehe die Sicherungen durchschlagen. Die Praxis hat ergeben, daß die größere Zahl betriebsmäßiger Überlastungen weniger als 200 % der Nennstromstärke beträgt. In diesen Grenzen hat der Glaskörper eine noch höhere Überlastungsfähigkeit, wie sie den allgemein gültigen Regeln (VDE.) zum Sichern und Schützen von elektrischen Anlagen entspricht. Es wird beispielsweise eine Hochspannungsleitung oder ein Niederspannungs-Kabelabzweig durch Zeitrelais in Verbindung mit Überstromschaltern geschützt. Bei 100 % Überlast erfolgt die direkte Auslösung. Zwischen dieser Überlast und der Nennstromstärke besteht eine Abstufung in der Weise, daß bei etwa 10 % Überlast die Auslösung in 10 sec erfolgt, bei 50 % in 5 sec und bei 100 % sofort.

Als Grenzwert für die Höchstbelastung der Gleichrichtergefäße wird die Rückzündung angenommen. Es sei darauf hingewiesen, daß die Rückzündungsmeßwerte der Kurven im Bild 65 bei einer längeren Dauerbelastung gefunden wurden. Das Gefäß ist mit dem Strom des Meßwertes mehrere Stunden belastet worden, ehe die Rückzündung eintrat. Die Differenz zwischen den Rückzündungskurven und den tatsächlichen Belastungswerten, also den zulässigen Werten, ist demnach eine Betriebsreserve, die bei den zulässigen Überlastungen teilweise ausgenutzt wird, ohne jedoch die Rückzündungsgrenze zu erreichen.

a) Versuchsergebnisse und Messung der Überlastbarkeit

Das zuverlässigste Mittel zur Bestimmung der Grenzwerte ist die betriebsmäßige Überlastungsprobe. Zu diesem Zweck wurde ein Gleichrichter auf ein Gleichstromnetz geschaltet und überlastet. Gleichzeitig wurde die Zeit bis zum Einsetzen der Rückzündung bestimmt. Für die Messungen wurde ein Glaskörper benutzt, der mit 100 A bei künstlicher Luftkühlung und mit 40 A ohne Kühlung belastet werden kann. Die Resultate sind im Bild 80 in

¹⁾ Von feinem Sand umgebene und in Porzellankörpern angeordnete Schmelzstreifen.

Kurvenform aufgetragen¹⁾. Die Kurve *a* wurde vom Betriebszustand aus gemessen, nachdem der Glaskörper mit seiner Nennstromstärke bis zur Endtemperatur belastet war. Diese ist bei den gebräuchlichsten Gefäßgrößen in etwa 30 bis 40 min erreicht, wie Bild 81 erkennen läßt.

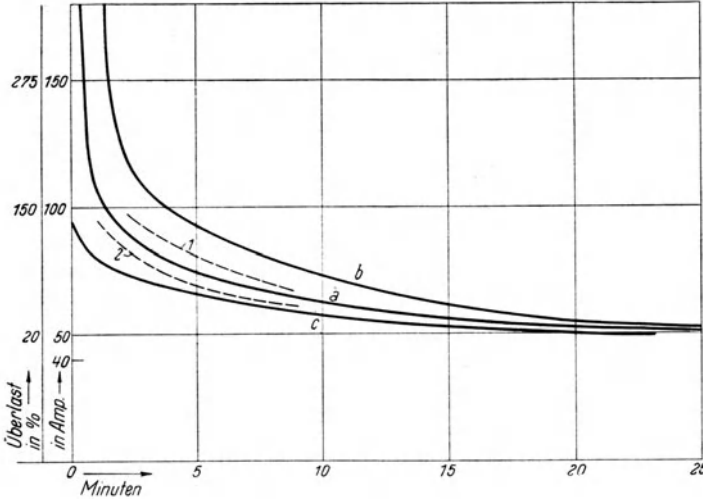


Bild 80. Überlastung eines Glasstromrichtergefäßes bei 250 V
a = vom im Betriebe vorerwärmten Zustande,
 1. bei 20% Spannungsniedrigung, 2. bei 20% Spannungserhöhung;
b vom kalten Zustande;
c = die Überlastungskurve einer geschlossenen Schmelzpatrone einer analogen Stromstärke

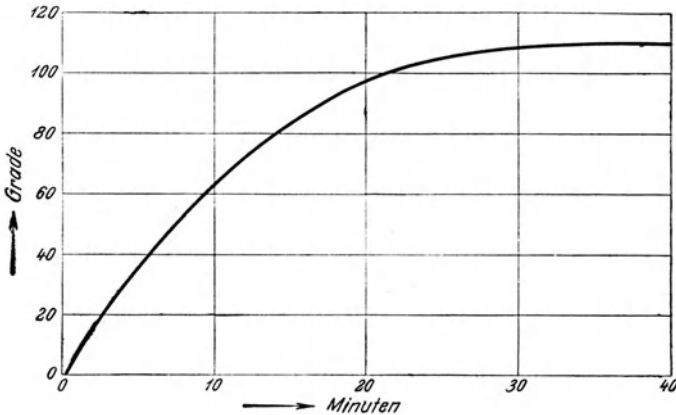


Bild 81. Temperaturkurve eines Glaskörpers

¹⁾ Die Kurvenwerte wurden vom Verfasser etwa 1924 ermittelt, um die bis dahin noch gänzlich unbekanntenen Überlastungsgrenzen der Gefäße kennenzulernen.

Kurve *b* zeigt die Grenzwerte an, wenn das Gefäß vom kalten Zustand aus überlastet wird. Bei weiter ansteigendem Strom nähert sich der Zustand allmählich einem Kurzschluß. Kurve *c* zeigt die Überlastbarkeit normaler Schmelzpatronen, wie sie im Betrieb verwendet werden. Für die Versuche wurden Sicherungen größerer Stromstärken gewählt. Die gemessenen Werte liegen wesentlich über den in der Praxis zugelassenen Stromstärken (Bild 84). Aus den Kurven geht ferner hervor, daß das gemessene Gefäß etwa 20% dauernd überlastet werden kann.

b) Die Gefäßtemperatur

wurde bei diesen Versuchen registriert. In der Entladungsbahn Anode ...Kathode sind die Temperaturen wesentlich höher als an der Kühlkammer

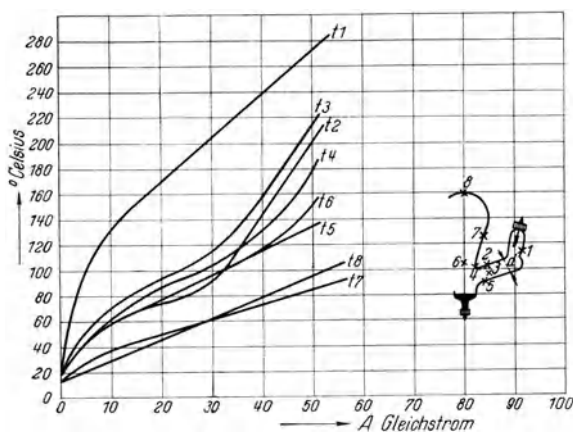


Bild 82. Glasgefäßtemperaturen bei natürlicher Kühlung

und erreichen in der Nähe der Anoden ihren Höchstwert. Bild 82 zeigt die bei Dauerbelastung gemessenen Temperaturwerte acht verschiedener Meßpunkte. Diese wurden nach etwa 40 min unveränderter Belastung registriert. Analog hierzu wurde die Messung an demselben Gefäß mit künstlicher Kühlung durchgeführt, Bild 83. Der Kühlmotor lief mit 1500 Umdrehungen je Minute, die Windgeschwindigkeit betrug bei einem Flügeldurchmesser von 350 mm etwa 160 m in der Minute. Die Stromstärke konnte hierdurch auf den etwa dreifachen Wert gesteigert werden. Die thermische Beanspruchung des Glases geht bei Überbelastungen vom kalten oder wenig belasteten Zustande aus merklich zurück, weil sich die Gefäßteile in der kurzen Überlastungszeit nur unwesentlich erwärmen. Demnach können die Glasgefäße bei großer Überlast durch zu hohe Temperaturen kaum zerstört werden. Auch die Anoden gehen bei der Überbelastung in ihrer Temperaturzunahme zurück, sie wurden während der Versuche nur bei kleineren Überlastungsströmen und längeren Überlastungszeiten rotglühend. Bei

Messungen vom kalten Zustand aus und bei kurzzeitig hohen Überlastungen verfärbten sich die Anoden nicht mehr. Aus diesen Ergebnissen wurden vom Verfasser vor einigen Jahren die Überlastungskurven normaler Gleichrichtergefäße nach Bild 84 ermittelt ¹⁾. Die Überlastungsfähigkeit wassergekühlter Eisenstromrichter zeigt Bild 146. Nach bisher vorliegenden Ergebnissen haben luftgekühlte Eisengleichrichter eine Überlastungsfähigkeit, die den wassergekühlten Eisengefäßen

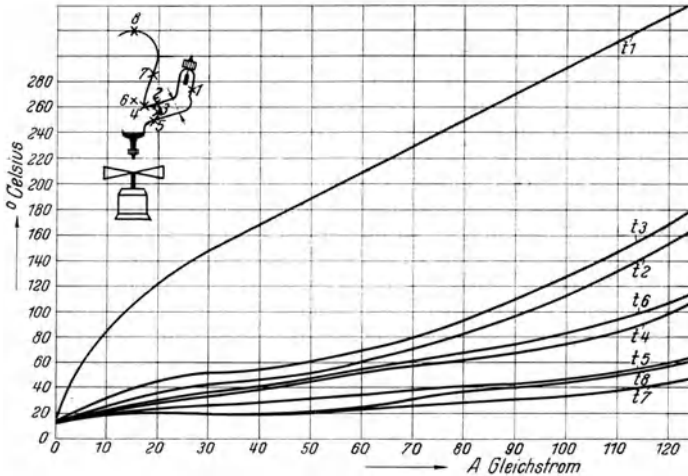


Bild 83. Glasgefäßtemperaturen bei künstlicher Kühlung

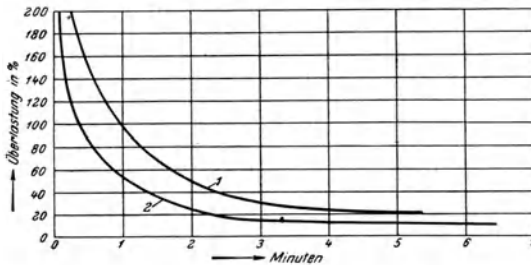


Bild 84. Überlastungsfähigkeit von Glaskörpern

1 = vom kalten Zustande aus. 2 vom im Betriebe vorerwärmten Zustande aus

entspricht. Diese werden oft nach anderen Richtlinien bemessen, weil man die Belastung durch erhöhten Wasserumlauf regeln kann. Die Schalter und Sicherungen müssen in ihrer Stromzeitcharakteristik so bemessen sein, daß sie früher ausschalten, ehe die Rückzündungsgrenze erreicht ist.

¹⁾ Vgl. auch K. Müller-Lübeck, Der Quecksilberdampfgleichrichter, II. Bd., S. 178. Jul. Springer, 1929. (Die Kurvenwerte dienen nur als Richtlinie und sind nicht für sämtliche Betriebsverhältnisse anwendbar.)

c) Die Kurzschlußfestigkeit der Gleichrichtergefäße und ihre Abschaltung beim Kurzschluß

Die normalen Glasgleichrichteranlagen erhalten einen Hochspannungsausschalter mit Überstromauslösung, hin und wieder auch eine Zeitverzögerung. Zwischen Transformator und Gleichrichtergefäß werden Sicherungen, häufig auch Drosselspulen geschaltet. Auf der Gleichstromseite befinden sich Überstromhauptschalter, Speisekabelschalter, Sicherungen oder Schnellschalter. Die Praxis hat gezeigt, daß in einer Gleichrichteranlage bei einem Spannungsabfall von 9 bis 10% zwischen Leerlauf und Vollbelastung, im Falle eines Kurzschlusses auf der Gleichstromseite, ein einfacher Überstromschalter zuverlässig auslöst. Es sind in vielen Anlagen häufige Kurzschlüsse in dieser Weise abgeschaltet worden. Die Anodensicherungen sprechen bei diesen Kurzschlüssen selten an. Die Kurve Bild 80 c entspricht den Grenzwerten (Abschmelzgrenze) einer Diazepatrone. Um auch die Schaltzeiten bei großen Kurzschlußströmen kennenzulernen, sind mit den Sicherungen Kurzschlußversuche ausgeführt worden und im Oszillographen registriert. Hierbei ergaben sich die Abschaltzeiten, die in der Tabelle 6 als Annäherungswerte aus dem vorliegenden Schrifttum der letzten Jahre zusammengestellt sind. Die Streuung der Zeitwerte ist durch die Konstruktion der Schmelzdrähte und auch durch die dem Kurzschluß vorausgehende Betriebsbelastung bedingt. Immerhin lassen die Meßwerte ein Kriterium für die Wahl der Sicherungen zu, sie lassen auch die große Trägheit offener Schmelzstreifen erkennen.

Tabelle 6

Nr.	Nennstrom Amp.	Nennspannung der Sicherung Volt	Kurzschlußstrom Amp.	Abschmelzzeit Millisee
1	100—125	500—750	1000—1200	100—170
2	100—125	500—750	1200—1400	60—120
3	100	500	1500—1800	20—60
4	100—160	500—750	2500—3000	7—12
5	100	500	4000—5000	2—8
6	125	500	3500—4000	70—100

1 bis 5 - - geschlossene, mit Sand gefüllte Schmelzpatronen; 6 offene, von der Außenluft umgebene Schmelzstreifen

Analog zu den Sicherungen sind auch die Schaltzeiten selbsttätiger Schalter (Überstromschalter) untersucht worden. Bild 249 zeigt ein Oszillogramm der Abschaltkurve eines Selbstschalters für 500 A ¹⁾. Im Bild 250 ist ferner die Abschaltkurve eines Schnellschalters zu erkennen. Die Anodensicherungen werden bei Glasgleichrichtern und kleineren Eisengleich-

¹⁾ E. Reinhardt, AEG.-Mitt. 1936, H. 10.

richtern verwendet. Besonders für Glasgleichrichter ist die Anodensicherung ein guter Schutz, der in Störungsfällen sicher anspricht. Auch ist die Schmelzpatrone in ihrer Charakteristik den Glasgefäßen am besten angepaßt und schützt sie vor Zerstörung bei Kurzschlüssen. Die Sicherungen sind andererseits bis zum zehnfachen Nennstrom so träge, daß die üblichen Zeitrelais- und Überstromschalter beim Überstrom oder Kurzschluß früher ansprechen. Hierbei ist vorausgesetzt, daß den Glasgefäßen Anodendrosselspulen zugeordnet werden, die beim Kurzschluß eine genügend große Stromdämpfung ermöglichen. Der Spannungsabfall zwischen Leerlauf und Vollbelastung, Bild 116, soll hierbei nicht kleiner als 8 bis 10% sein. Der Kurzschlußstrom erreicht dann Werte des 10- bis 12fachen Betriebsstromes. Bei geringerer Dämpfung und höheren Kurzschlußströmen werden schneller ansprechende Schalter (Schnellschalter) im Gleichstromkreis installiert. Selbst Bahnanlagen, Grubenbahnanlagen, Industriebetriebe mit häufigen Kurzschlüssen und Überlastungen werden mit Gleichrichtern ohne Nachteile gespeist, wenn sie nach diesen Richtlinien erstellt werden.

Offene Schmelzstreifen bilden nach Tabelle 6 weder einen Schutz für den Glaskörper, noch passen sie sich in ihrer Charakteristik der Überlastung genügend an. Ihre lange Abschmelzzeit ist durch die den Streifen umgebende Außenluft begründet, die ihn bei der Erwärmung beträchtlich abkühlt. Für höhere Spannungen als 1000 V sind heute von verschiedenen Firmen Sicherungen entwickelt worden, die etwa den Abschmelzzeiten der Tabelle 6 entsprechen.

7. Die Lebensdauer der Stromrichtergefäße

Die Glühkathodengefäße sind in ihrer Lebensdauer vorwiegend durch den Verbrauch der geheizten Kathode begrenzt. Reine Metallkathoden erreichten selten eine Lebensdauer über 1500 Stunden. Die Röhren mit pastierten Drahtkathoden und direkt geheizten Oxydkathoden erreichen eine Lebensdauer von 5000 bis 10000 Stunden und mehr. Die Lebensdauer der Glasgefäße mit flüssiger Hg-Kathode (Quecksilberdampfgleichrichter) wird im Durchschnitt mit 20000 bis 30000 Stunden angegeben. Die mit Schraubdichtungen und mit Vakuumpumpen ausgerüsteten Eisengleichrichtergefäße können von Zeit zu Zeit geöffnet und ihre Dichtungen erneuert werden. Daher ist ihre Lebensdauer wohl nur durch Anfressungen des Kühlwassers begrenzt. Je nach der Art des Kühlwassers und den örtlichen Verhältnissen kann mit einer 20jährigen Haltbarkeit und darüber gerechnet werden. Im Gegensatz zu den mit Pumpen ausgerüsteten Eisengleichrichtern müssen die pumpenlosen Gefäße im Fabrikationsprozeß ein sicheres Vakuum bekommen, das Jahre hindurch erhalten bleiben soll.

a) Die Alterung der Glasgefäße

In zahlreichen Betrieben sind Brennstunden bis zu 50000 und teilweise bis 100000 Stunden erreicht worden. Trotzdem die Innenwände der Anodenarme durch zerstäubten Graphit nach und nach schwarz gefärbt werden, arbeiten die Gefäße rückzündungsfrei. Eine geringe Armschwärzung entsteht häufig bereits während der Evakuierung. Die geschwärzten Anodenarme absorbieren Wärmestrahlen besser als blanke Flächen. Daher entsteht nach einigen 100 Stunden eine bessere Wärmeabfuhr von den Anoden nach den Glasaußenwänden. Trotz aller Beobachtungen scheint eine Gleichmäßigkeit in der Ursache des Absterbens nicht zu bestehen. Einerseits ist es möglich, daß im Laufe der Jahre etwas Luft in das Gefäß eindringt, andererseits ist bekannt, daß nach und nach eine Fremdgasanreicherung stattfindet. Also könnte im Laufe der Jahre etwas Luft eindringen und außerdem Gas aus den Anoden und dem Hg frei werden. Häufig macht sich die Lebensgrenze durch gelegentliche Rückzündungen bemerkbar, auch übernehmen alternde Gefäße kleine Betriebsströme gar nicht oder erst nach einiger Zeit. Beides ist ein Beweis für das Vorhandensein von Fremdgasen.

Im gewissen Sinne wirkt der im Laufe der Zeit entstandene Graphitstaub der Verschlechterung des Vakuums entgegen. Dieser schwimmt auf dem Hg als schwarze Schicht und saugt Gasreste auf. Der Graphit hat demnach eine beschränkte Getterwirkung ähnlich den Metallniederschlägen in Rundfunkröhren. Auch das Regenerieren mit Hilfe kleiner Belastungen oder bei ausgeschalteter Belastung und eingeschaltetem Erregerkreis verbessert für einige Zeit das Vakuum, d. h. es werden hierdurch Gasreste aufgesaugt.

Das Hg wird während des Betriebes nicht verbraucht. Wohl nimmt die Standhöhe in den ersten Betriebsstunden um einige Millimeter ab, weil an den Wänden, in den Armen und in der Kühlkammer gewisse Hg-Mengen haften bleiben, doch hierauf wird bei der Füllmenge Rücksicht genommen, so daß in dem Kathodenbecken stets genügend Hg vorhanden ist. Bei dem ununterbrochenen Kreislauf läuft das an den Glaswänden vorhandene Hg-Kondensat in mehr oder weniger starken Tropfen in das Kathodenbecken zurück.

b) Die Einwirkung von Fremdgasen auf den Lichtbogenverlust

Um dieses im Schrifttum hin und wieder erörterte Problem zu untersuchen, wurden Messungen an einem Gefäß im neuen und gealterten Zustand ausgeführt und in Bild 85 in Kurvenform aufgetragen. Die Lichtbogen Spannung nimmt mit zunehmender Alterung des Gefäßes bei kleiner Belastung zu, was auf Vorhandensein von Fremdgasen zurückgeführt werden kann. Doch bei Stromsteigerung erreicht die Brennspannung bereits bei 3% Belastung den Wert eines neuen Gefäßes und behält diesen mit

geringen Abweichungen bis zur Nennstromstärke. Das gemessene Gefäß hatte eine Lebensdauer von einigen Jahren. Die Beobachtungen an mehreren älteren Gleichrichtern haben ergeben, daß der Brennspannungsanstieg über 20 V hinaus bei kleinen Strömen zwischen 5 bis 30 V beträgt. Dieser ist für die Praxis ohne Bedeutung, denn die Gleichrichter arbeiten wohl nie in der Nähe der Leerlaufgrenze. Die Atome der Fremdgase wirken in der Entladungsbahn nur dann als Ladungsträger, wenn sie tatsächlich ionisiert werden. Solange aber der Hg-Dampf die Fremdgase abdrängt, werden dessen Atome in der bekannten Weise ionisiert und der Lichtbogen-

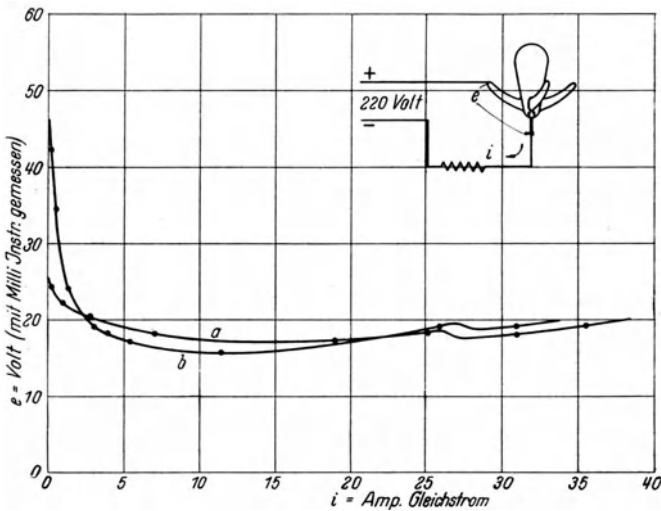


Bild 85. Lichtbogenabfall (Brennspannung) an neuen (a) und gealterten (b) Gefäßen gemessen

verlust bleibt unverändert. Wohl aber bewirken die Fremdgase, daß der Lichtbogen sichtbar breiter brennt. Nur bei kleinerem Hg-Druck, und demnach kleinerer Belastung, wenn also die Fremdgase einen größeren Raum ausfüllen, werden deren Atome ionisiert, wodurch der höhere Spannungsabfall, Bild 85, entsteht. Auch leuchtet hierbei die Gasstrecke, doch mit einem größeren Energieaufwand und mit weißen, roten oder anderen Farben durchsetzt, je nach der Art und Menge der Fremdgase. Die Leuchterscheinung wird bei größerem Strom, also bei größerer Hg-Dampfdichte, unsichtbar und durch die normale bläuliche Farbe des leuchtenden Quecksilbers abgelöst.

Wird dagegen der Zusatz an Fremdgasen weiter gesteigert, so tritt ein labiler Zustand im Lichtbogen ein, wenn nicht das Gefäß schon vorher unbrauchbar geworden ist. Der labile Zustand entsteht durch einen stärkeren Einfluß der Fremdgase auf den Ionisationsvorgang ¹⁾. Dieser Zustand

¹⁾ Güntherschulze, a. a. O., S. 76.

läßt sich nach *Güntherschulze* beim Eindringen von Luft gut beobachten. Häufig ist der Lichtbogen im letzten Stadium des Versagens auch stark rot gefärbt, was offenbar auf das Vorhandensein von Stickstoff zurückzuführen ist.

Obige Darlegungen sollen den Beweis erbringen, daß der Wirkungsgrad eines Gleichrichtergefäßes ohne Vakuumpumpen bis zum Unbrauchbarwerden keine praktisch meßbare Verschlechterung erleidet. Sobald der Druck der Fremdgase so hoch ansteigt, daß der Spannungsverlust größer wird, versagt auch die sichere Ventilwirkung und das Gefäß ist unbrauchbar. Dieser Zustand tritt jedoch erst nach den genannten Brennstunden ein. Es wäre falsch, die Meßergebnisse beim Ausheizen von Eisengleichrichtern auf alternde Gefäße ohne Vakuumpumpen zu übertragen. Die Gefäße arbeiten während der Ausheizung mit einer Anodenwechselspannung von etwa 50 V, so daß keine Rückzündungen entstehen, obwohl beim Ausheizen soviel Fremdgase vorhanden sind, daß der Lichtbogenverlust beträchtlich größer ist als beim reinen Hg-Dampf. Ein Gleichrichtergefäß in diesem gasreichen Zustande würde bei normaler Netzspannung wohl zünden, aber bereits nach kurzer Zeit versagen. Demnach haben nicht genügend evakuierte und durch Gasanreicherung verbrauchte Gefäße für einen ordnungsmäßigen Betrieb zuviel Fremdgase. Beim Ausheizen besteht ein vorübergehender Zustand, der demnach bei allen Gefäßen kurzzeitig vorhanden ist, die im Fabrikationsprozeß ausgepumpt und gereinigt werden.

8. Die Kühlung der Stromrichtergefäße

Die Gefäße kleinerer Stromstärken bis zu etwa 50 A erhalten im allgemeinen keine künstliche Kühlung. Bei kleineren Gleichrichtern ist wohl eine Verringerung der Gefäßabmessungen durch zusätzliche Kühlung erreichbar, doch bis zu etwa 50 A steht der Aufwand an Kühlmitteln in keinem Verhältnis zur Ersparnis der Gefäßgröße. Die Glühkathodengleichrichter erhalten keine künstliche Kühlung, sie ist für Glühkathoden-Hg-Dampfgefäße unter Umständen schädlich, weil eine zu starke Kühlung die schon an sich geringen Hg-Dampfmengen verkleinern würde, wodurch der Spannungsverlust im Lichtbogenweg wächst. Ein Hg-Dampfgefäß dagegen kann in der Stromaufnahme durch eine sinngemäße zusätzliche Kühlung solange gesteigert werden, bis der Lichtbogenverlust merklich größer wird. Dieser Anstieg hängt unmittelbar von dem Dampfdruck in der Kühlkammer ab, der um so niedriger ist, je intensiver gekühlt wird.

a) Die künstliche Kühlung der Hg-Dampfglasgefäße

Glasgefäße können durch Luft oder Flüssigkeit gekühlt werden. Es war naheliegend, daß bei der Einführung größerer Glasgleichrichter in den Jahren 1922 bis 1925 versucht wurde, die durch Luftkühlung erreichte

Leistungsverbesserung mit einer Flüssigkeitskühlung noch weiter zu steigern.

Bild 86 zeigt den Aufbau eines Glasgefäßes mit untensitzendem Kühlventilator, der die Luft in einfacher Weise nach oben gegen das Glasgefäß treibt. Wie aus den Kurven 1 und 2, Bild 75, hervorgeht, ist es zweckmäßig, die Kühlung unter etwa 30% Belastung abzustellen, um den Lichtbogenverlust bei kleiner Belastung zu reduzieren. Auch wird der Stromverlust des

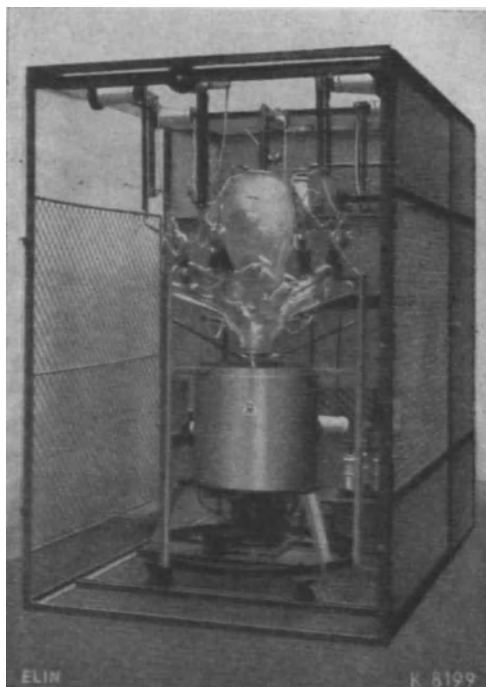


Bild 86. Gleichrichteraggregat mit einem teilweise geführten Luftweg

Kühlmotors gespart und dessen Verschleiß vermindert. Zur Ausnutzung dieser Vorteile¹⁾ sind weiter hinten beschriebene Schaltungen entwickelt worden, nach denen der Kühlventilator in Abhängigkeit von der Höhe der Belastung ein- und ausgeschaltet werden kann. Die Kühlanordnungen der einzelnen Herstellerfirmen sind sich annähernd gleich. Vielfach wird der im Bild 86 erkennliche Luftführungsring um den Ventilatorflügel gesetzt, der neben der Luftführung noch eine Sicherung gegen zufällige Berührung bildet. Die Ventilatorflügel haben eine gut ausgesuchte Form, um die Luft mit möglichst hoher Geschwindigkeit gegen das Glasgefäß zu treiben. Für die Kühlung der

¹⁾ G. W. Müller, AEG.-Mitt. 1924, H. 7.

Gefäße werden sogenannte Schraubenlüfter verwendet, wie sie bei Flugzeugpropellern üblich sind. Es ist verschiedentlich versucht worden, die Leistung der Gefäße durch entsprechende Luftführungsbleche, die bis nahe an die Gefäßwand geführt werden, zu steigern. Auch wurde versucht, die Kühlkammer und Anodenarme getrennt zu kühlen. Ein Ausführungsbeispiel für einen Luftführungsschacht zeigt Bild 87. Der Schacht *b* ist um die Kühlkammer *a* gelegt¹⁾. Für die Anodenarme *e* sind entsprechende Ausschnitte vorgesehen, aus denen eine geringe Luftmenge austreten kann, um auch die Anodenarme zu kühlen. Es hat sich gezeigt, daß bei einer starken Überkühlung der Anodenarme zuviel Hg oberhalb der Anoden kondensieren kann, was leicht zu Rückzündungen führt.

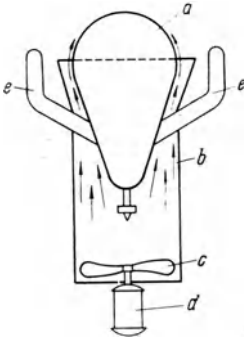


Bild 87. Ein Glaskörper in einem Luftführungsrohr

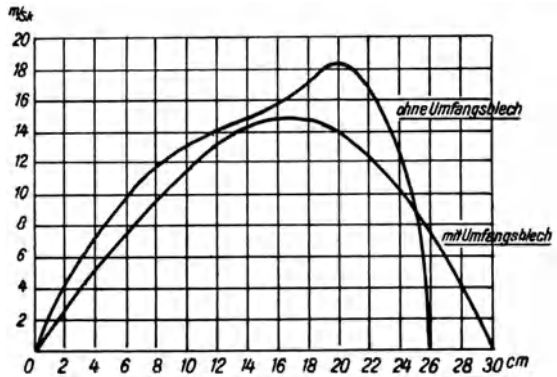


Bild 88. Einfluß der Ventilatorumrandung (ELIN.). Die Senkrechte zeigt in sec Luftgeschwindigkeit. Die Waagerechte zeigt die Verteilung auf den Radius des Ventilatorflügels. Leistungsaufnahme mit Umfangsblech 525 Watt, ohne Umfangsblech 735 Watt

b) Die Kühlluftmenge

Messungen haben ergeben, daß durch frei laufende Flügel ohne Führungsschächte ein großer Teil der bewegten Luftmenge nach oben strömt, ohne eine Kühlwirkung auszuüben. Auch sind Luftwirbel durch die Anodenarme unvermeidlich. Ein Teil der bewegten Luftmenge umströmt die Arme und ein weiterer erreicht die Kühlkammer, so daß die oben in einem bestimmten Querschnitt gemessene Luftmenge ein angenäherter Maßstab für die Bemessung der Kühlventilatoren sein kann. Eine genauere Messung läßt sich durch im Handel bekannte Luftdruckmesser an einzelnen Glaswandteilen ausführen. Das einfachere Verfahren der Querschnittsmessung erfolgt in der Weise, daß über den Glaskörperkühlschacht ein Rahmen gelegt wird, der durch dünne Drähte in beispielsweise 16 bis 20 kleine Quadrate geteilt ist. Sodann wird die Windgeschwindigkeit in jedem dieser Quadrate festgestellt. Das Mittel aus diesen Messungen multipliziert mit dem Querschnitt

¹⁾ Vgl. auch *Fr. Kleeberg*, AEG.-Mitt. 1939, H. 2.

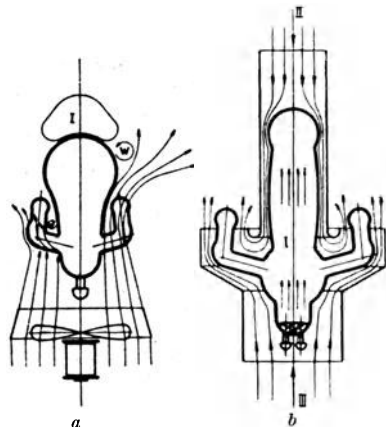
ergibt die Luftmenge in einer Zeiteinheit. Als Erfahrungswerte haben sich etwa folgende Zahlen bewährt:

Für 100 A Gefäße	60 bis	80 m ³ :min
„ 250 A „	160 „	180 „
„ 500 A „	240 „	270 „

Die Leistungsaufnahme der Kühlmotore läßt sich nach Meßergebnissen von *W. Gauster*¹⁾ durch um den Flügel gesetzte, zylindrische Führungsringe (Bilder 86 und 88) vermindern und hierdurch die bewegte Kühlluft präziser richten.

c) Die geführte Luftkühlung der Gefäße

Die sperrigen Anodenarme stören die Symmetrie, auch können sie durch Glasbläser nur mit einer verhältnismäßig großen Toleranz angesetzt werden, daher lassen sich aus festen Bauteilen hergestellte Luftführungsbleche nur begrenzt verwenden. Ein erstellter Gleichrichter muß so gebaut sein, daß unbrauchbar gewordene Gefäße durch neue ersetzt werden können, auch wenn sie in ihren Maßen von den Vorgängern abweichen. Trotzdem sind verschiedene Vorschläge gemacht worden, um Glasgefäße mit Druckluft intensiver kühlen zu können als mit Freiflächenflügeln. Nach einer Veröffentlichung von *Jungmichl*²⁾ soll die Kühlkammer in der Mitte einen Einsatzzylinder erhalten, durch den von oben mit einem zweiten Ventilator Druckluft getrieben wird. Vom Verfasser wurde vorgeschlagen, den Ventilatorflügel



Luftströmung am Kolben bei Kühlung von unten.
I - Strömungsschatten,
W Luftwirbel

Glasgleichrichter mit Gegenstromkühlung.
I - Hg-Dampf,
II - Kühlluftströmung zum Kondensdom,
III - zusätzliche Unterluft

Bild 89

zweiteilig auszuführen, dessen mittlerer Teil Druckluft in den Einsatzzylinder treibt und der äußere Flügelteil freiströmende Luft gegen die Außenwände. Bild 89 zeigt eine Ausbildung dieser getrennten Kühlung von der Firma ELIN.³⁾ Das Glasgefäß ist im oberen Teil angenähert zylindrisch ausgebildet. Auf den Zylinder ist ein Luftführungsrohr gesetzt (Bilder 90, 265 und 270). Von einem Druckluftkanal, der von einem be-

¹⁾ E. u. M., Wien 1935, H. 11 u. 12.

²⁾ Siemens-Zeitschr. 1933, Bd. 13.

³⁾ H. v. Bertele, ELIN.-Sonderdruck 154, 6, 33.

liehigen Kompressor unter Druck gehalten wird, strömt die Luft in der Pfeilrichtung II am zylindrischen Glaskörperteil vorbei. Ein untensitzender Ventilator kühlt das Gefäß und die Anodenarme in der angedeuteten Pfeilrichtung III. Im gleichen Bild ist links im Schema die Freiflächenkühlung angedeutet, in der nachgewiesen werden soll, daß durch den von unten kommenden Luftstrom im oberen Teil der Kühlkammer Wirbel entstehen, wodurch die Luftkühlung teilweise unwirksam ist.

d) Die ölgekühlten Gleichrichter

Nach einer französischen Patentschrift ¹⁾ sind Gleichrichter ausgeführt worden, bei denen Glasgefäße in ein ruhendes Ölbad getaucht werden.

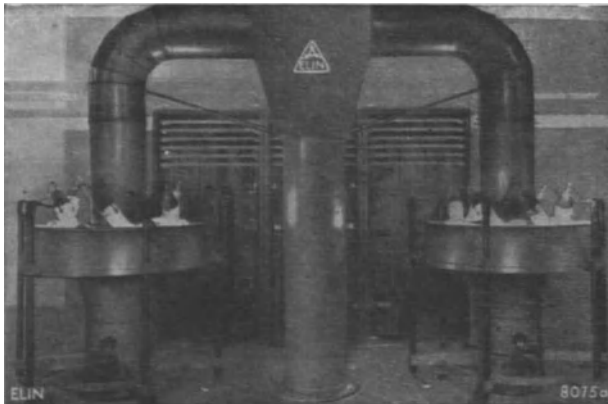


Bild 90. Eine ausgeführte Gleichrichteranlage nach dem Prinzip der Gegenstromkühlung (ELIN., vgl. auch Bild 270)

Diese wurden für Hochspannungsanlagen bis zu 15000 V benutzt. Die Ausführung wurde offenbar gewählt, um neben der günstigen Kühlwirkung eine gute Isolation für die Metallteile des Glasgefäßes zu erhalten. Eine nennenswerte Leistungssteigerung konnte durch diese Anordnung nicht erzielt werden, weil das Öl nur durch den eigenen Wärmeauftrieb bewegt wird. Diese ist jedoch zu erreichen, wenn das an den Glaswänden erwärmte Öl durch einen zwangsläufigen Umlauf ständig erneuert wird. Bild 91 ²⁾ zeigt einen ölgekühlten Gleichrichter im Längs- und Querschnitt. Der Motor *d* treibt durch Welle *e* einen Pumpenflügel *f* an, der die Ölmenge in der Pfeilrichtung nach oben gegen das Glasgefäß drückt. Das erwärmte Öl strömt über Einsatzgefäß *c* in Kühlrippen *ö* des Gefäßes *b*, das an den Außenwänden durch Öffnungen *l* mit Hilfe des Ventilatorflügels *o* nach dem Prinzip der

¹⁾ *E. Leblanc*, 529930.

²⁾ *G. W. Müller*, DRP. 470101, 385389, AEG.

Gegenstromkühlung in Pfeilrichtung l von Kühlluft durchströmt wird. In dieser Anordnung sind Umlauf- und Gegenstromrückkühlung vereinigt. Um eine übermäßige Kühlung der Anodenarme in der Anodennähe zu vermeiden, wird das umlaufende Öl nur gegen die Kühlkammer und nicht gegen die Anodenarme getrieben. Diese haben natürliche Selbstkühlung. Die Versuchsergebnisse ergaben, daß ein ungekühltes 60-A-Gefäß in dieser Anordnung mit 600 A Gleichstrom belastet werden konnte. Es sind auch Gleichrichter dieser Art erstellt worden, doch die spätere Entwicklung der größeren luftgekühlten Glasgefäße bis 500 A und die weitere Entwicklung

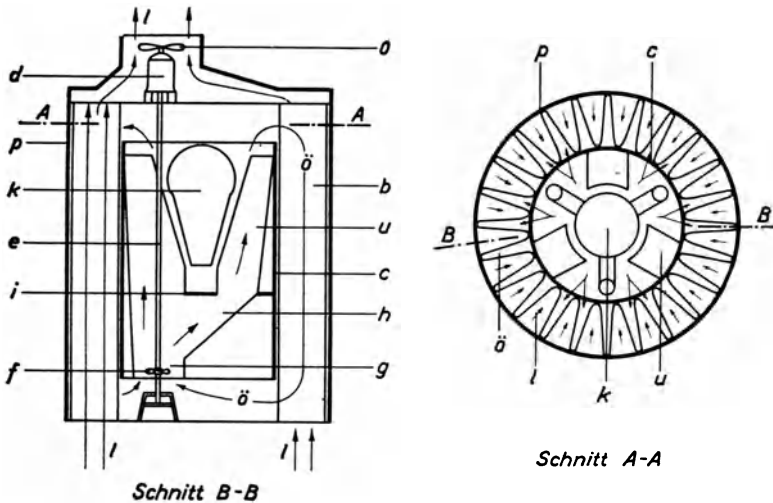


Bild 91. Schnitt durch den Ölgleichrichter. Ölbehälter, in dem der Glaskörper gekühlt wird

der Eisengleichrichter führten zu dem Ergebnis, daß Glasgleichrichter in dieser Ausführung zu teuer wurden. Bei diesen vom Verfasser ausgeführten Versuchen wurde gleichzeitig festgestellt, wie weit die Leistung der Glasgefäße mit einer Wasserumlaufkühlung gesteigert werden kann. Gleichrichter dieser Art sind nicht in die Praxis eingeführt worden.

e) Die kombinierte Luft- und Flüssigkeitskühlung

Ein verschiedentlich angewendetes Glasgefäß hat in die Kühlkammer reichende und von Kühlwasser durchflossene Kühlrohre aus Glas¹⁾. Diese erhielten eine U-Form und wurden von unten durch das Kathodenbecken geführt, um das verdampfte Hg unmittelbar über dem Kathodenspiegel an den Rohrwänden niederzuschlagen. Die Kühlung der Anodenarme und der Kühlkammer erfolgte durch Freiflächenventilatoren im beschriebenen Sinne.

¹⁾ Jungmichl, Siemens-Zeitschr. 1933, Bd. 13; vgl. auch G.W. Müller, DRP. 587505.

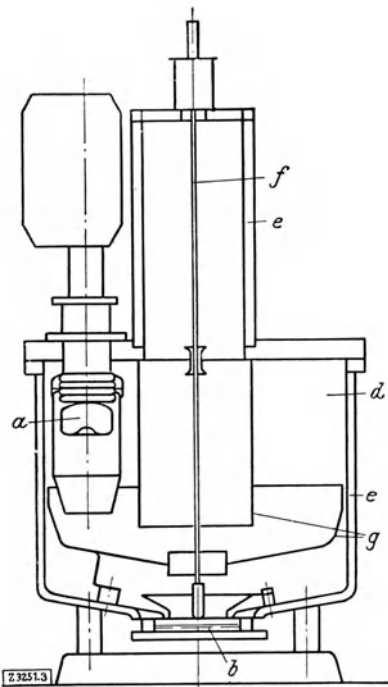


Bild 92. Bauart Brown, Boveri & Cie.,
Mannheim (BBC)

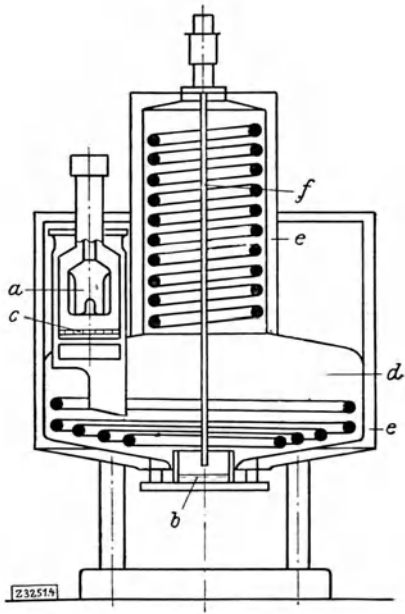


Bild 93. Bauart General Electric Co.,
Schenectady, Ver. St. v. Amerika (GEC)

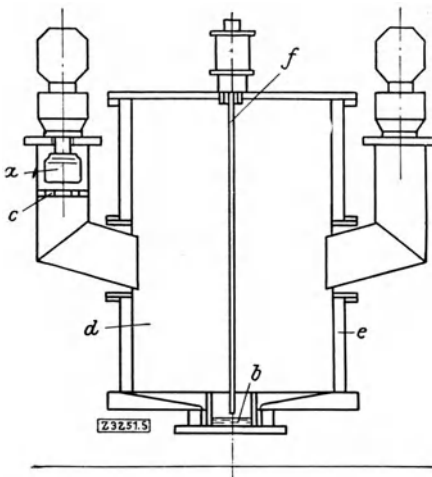


Bild 94. Bauart Českomoravska Kolben,
Daněk, Prag (Kolben)

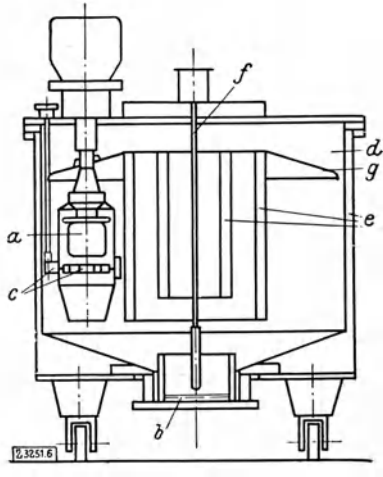


Bild 95. Bauart Siemens-Schuckertwerke,
Berlin (SSW.)

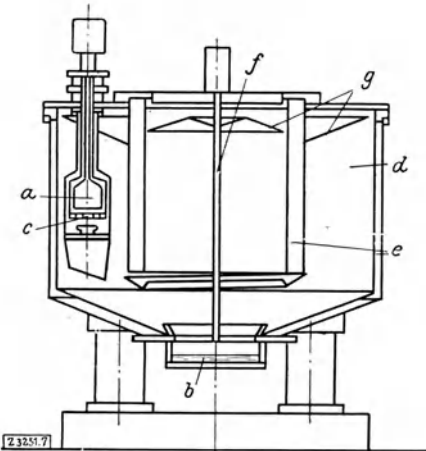


Bild 96. Bauart Allgemeine Electricitäts-Gesellschaft, Berlin (AEG.)

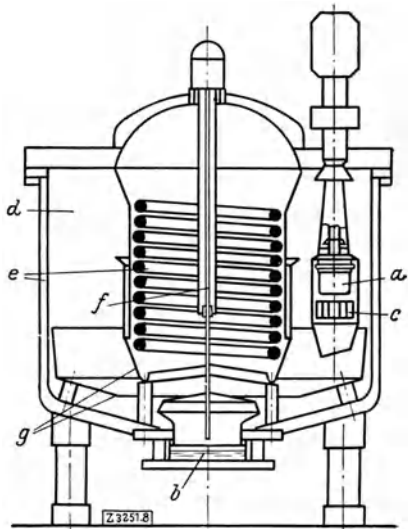


Bild 97. Bauart Allmänna Svenska Elektriska, A. B., Västerås (ASEA.)

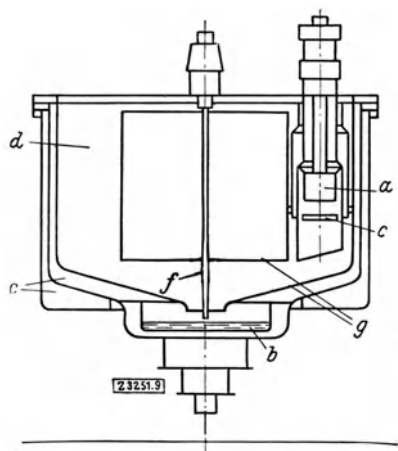


Bild 98. Bauart Maschinenfabrik Oerlikon, Oerlikon, Schweiz (Oerlikon)

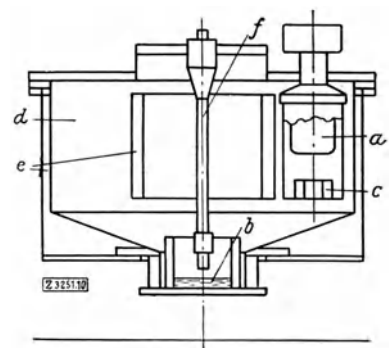


Bild 99. Bauart Westinghouse Electric & Manufacturing Company, East Pittsburgh, Ver. St. v. Amerika (Wemco)

Bild 92 bis 99. Stromrichterbauformen verschiedener Werke

Bild 92 bis 94. Bauarten mit Dampfdom

Bild 95 bis 99. Bauarten mit zylindrischen Gefäßen und flachem Deckel

- a* Anode, *b* Kathode, *c* Steuergitter, *d* Vakuumkessel, *e* Kühleinrichtungen,
- f* = Zündnadel, *g* = Führungsbleche für den Quecksilberdampf

f) Die Kühlung der Eisengleichrichter mit Preßdichtungen

Größere Eisengleichrichter werden mit Umlaufwasser gekühlt. Die Gefäßtemperatur muß wegen der Preßdichtungen niedriger gehalten werden als bei Gleichrichtern mit verschmolzenen Anodendichtungen. Das austretende Kühlwasser soll bei temperaturempfindlichen Dichtungen eine Temperatur von 50 bis 60° C nicht übersteigen. In den Bildern 92 bis 99 sind die Ausführungen der bekanntesten Firmen wiedergegeben¹⁾. Aus diesen sind die Kühlwege im großen und ganzen erkenntlich. Der ausgeprägte Dampfdom wird von BBC. und GEC. verwendet. Von anderen werden nach unten ragende Innenkühler benutzt. Die Firma Kolben, Prag, paßt ihre Eisengleichrichter der Form von Glasgleichrichtern an. Bild 94 zeigt die ausgeprägten Anodenarme. Die Betriebsvorschriften für die zulässigen Endtemperaturen werden von den Herstellerfirmen je nach der Gefäßgröße verschieden angegeben. Bei der getrennten Kathoden- und Gefäßkühlung soll das Kathodenkühlwasser zweckmäßig nicht so stark erwärmt werden wie das Gefäßkühlwasser. Offenbar besteht auch keine Einstimmigkeit über die Betriebstemperatur des Kathodenquecksilbers. Im allgemeinen wird angegeben, daß für 1000 A Dauerstromstärke stündlich etwa 1 m³ Kühlwasser benötigt wird.

Die stündliche Kühlwassermenge läßt sich angenähert wie folgt errechnen²⁾:

Wassereintrittstemperatur	= t^1
Wasseraustrittstemperatur	= t^2
Lichtbogenverlust	= u_0
Belastungsstrom	= J
Zuschlag für Wärmestrahlungsverlust	= x
Wassermenge je Stunde in Litern	= L

$$L = \frac{u_0 \cdot J \cdot 0,24 \cdot 3600 \cdot x}{1000 \cdot (t^2 - t^1)} \dots \dots \dots (6)$$

Für x ist ein Erfahrungswert gleich 1,1 einzusetzen. Bei getrennter Berechnung der aufzuwendenden Wassermenge für Kathode und Gefäß kann für das Gefäß ein Lichtbogenverlust von 15 bis 18 V und für die Kathode von 5 bis 7 V angenommen werden. Nach neueren Forschungen soll der Kathodenabfall bis zu 10 V betragen. Der Wasserverbrauch der Hochvakuumpumpe ist in obigen Werten enthalten. Die Bedingungen für die Reinheit des Kühlwassers sind im letzten Abschnitt erläutert. Zu beachten ist jedoch, daß bei Gleichrichtern, die von Kathode gegen Erde eine hohe Spannung haben, Vorkehrungen zu treffen sind, damit durch das Kühlwasser nur geringe Ströme nach Erde fließen können. Zu diesem Zweck

¹⁾ A. Siemens, Zeitschr. d. VDI. 1936, Nr. 34, S. 1041.

²⁾ W. Norwag, BB.-Nachr. 1933, H. 4.

sehen die Herstellerfirmen als Verbindung zwischen Wasserrohrsystem und Eisengleichrichtergefäß in der Wasserzu- und -ableitung längere Gummischläuche vor. Die Maße hierfür sind in den Bedienungs- und Betriebsvorschriften der Lieferfirmen angegeben. Um vagabundierende Ströme zu vermeiden¹⁾, werden die Kathoden, also der Pluspol, in Bahnanlagen neuerdings mit der geerdeten Fahrschiene verbunden, der Minuspol dagegen mit der Stromschiene oder dem Fahrdrabt. Bei Verwendung von Rückkühlern wird oft das gesamte Rohrsystem und der Rückkühler selbst auf Isolatoren gesetzt, um das Fließen der Erdströme zu vermeiden.

g) Die luftgekühlten Eisengleichrichter

In neuer Zeit sind Eisengleichrichter mit Vakuumpumpen entwickelt worden, die durch Luft und Umlaufwasser gekühlt werden. Bild 100 zeigt eine Ausführung. Ein Gebläse *b* saugt Frisch- oder Raumluft, je nach der Höhe der Gefäßtemperatur, durch den Rückkühler *c* und treibt die angesaugte Luft am Gefäß vorbei ins Freie, oder zurück in den unteren Raum. Der Abschlußschieber *f* wird durch den Regelmotor *d* in Abhängigkeit vom Thermostaten *g* so gesteuert, daß am Gefäß annähernd gleiche Temperaturen bestehen. Der zusätzliche Wasserumlauf dient zur Kühlung der Vakuumpumpe und Innenteile. Die gemischt zugeführte Kühlluft sorgt allein für Abführung der im Betriebe entstehenden Verlustwärme, teils direkt und teils aus dem Rückkühler²⁾. Ähnliche Ausführungen sind auch für kleinere Stromrichter entwickelt worden.

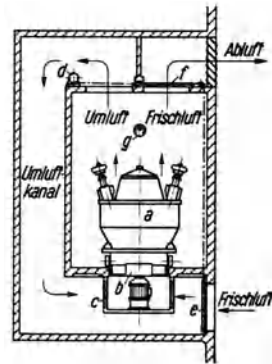


Bild 100. Luftgekühlter Eisenstromrichter mit Wasserumlaufkühlung (SSW.)
a = Gleichrichter,
f = regelbarer Abschlußschieber,
c = Rückkühler,
d = Regelmotor,
e = Frischlufteintritt,
g = Thermostat.

h) Die Kühlung pumpenloser Eisengleichrichter

Ein weiterer Fortschritt auf dem Wege der Vereinfachung von Kühlanordnungen ist die unmittelbare Luftkühlung an Eisengefäßen ohne zusätzliche Wasserkühlung. Dies setzt jedoch höhere Betriebstemperaturen voraus, so daß an Stelle der Preßdichtungen die im Abschnitt 2 erläuterten thermisch festeren Verschmelzungen für die Dichtung der Elektroden-einführungen verwendet werden müssen. Die Luftkühlung bietet ferner die

¹⁾ W. Draeger, ETZ. 1934, H. 21 u. 46.

²⁾ A. Siemens, S. E. V. Zürich, 1936, H. 24; A. Partzsch u. G. Dobke, AEG.-Mitt. 1939, H. 2. Siehe auch Verbundkühlung nach Bild 100 von K. Baudisch u. A. Siemens, E. u. M. 1939, H. 35/36.

Möglichkeit, Eisengleichrichter ohne Vakuumpumpe zu betreiben, denn die Versuche führten zu dem Ergebnis, daß bei wassergekühlten Eisengleichrichtern und Verwendung normaler Eisensorten eine ständige Diffusion ionisierter Wasserstoffatome nach dem Innern der Gefäße stattfindet, so daß selbst bei vollkommen gedichteten Gefäßen eine Vakuumpumpe zur gelegentlichen Evakuierung unerlässlich ist. Um die unmittelbare Luftkühlung anwenden zu können und die Vakuumpumpen fortzulassen, wurden die Einflüsse und Strömungen der Fremdgase eingehend untersucht.

i) Die Strömung von ionisierten Wasserstoffatomen durch Eisen bei verschiedenen Kühlmitteln

In der ETZ. 1934, H. 4; 1936, H. 33¹⁾ sind Meßergebnisse über den Einfluß des Kühlmittels veröffentlicht, die eine neue Erkenntnis für den Stromrichterbau aus Eisen bedeuten. Es wurde ein handelsübliches nahtloses

Eisenrohr bei 400° entgast und hierauf zuerst teilweise und später ganz mit der äußeren Oberfläche in destilliertes Wasser von 0 bis 100° eingetaucht, um festzustellen, ob Wasserstoff aus dem Wasser durch die Rohrwandung ins Hochvakuum eindringt. Die Bilder 101 und 102 zeigen den zeitlichen Verlauf des Druckes p



Bild 101. Wasserstoffdruckanstieg in Abhängigkeit von der Zeit, 0 bis 40 min

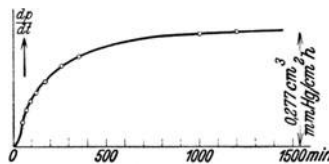


Bild 102. Der zeitliche Verlauf des Druckanstieges in einer Zeit von 1500 min (Dällenbach u. Gerecke, J. Pintsch)

und die Zunahmegeschwindigkeit dp/dt des Druckes. Nach dem Beginn des Versuchs hielt sich das Vakuum im Innern des Rohres von 5 mm Wandstärke zunächst solange auf einem Wert unterhalb 10^{-4} Torr, wie das Rohr sich in freier Luft befand. Dann wurde ein Teil von 340 cm^2 der Außenfläche des Rohres in Wasser von 95° C eingetaucht. Es dauerte 8 min (Bild 101), bis am Hitzdrahtvakuummeter das Eindringen von Wasserstoff erkennbar wurde. Von diesem Augenblick an nahm in dem Gefäß von 510 cm^3 Inhalt der Druck p rasch zu und erreichte nach etwa 1000 min eine Zunahmegeschwindigkeit entsprechend einer diffundierenden Menge von $0,277 \text{ cm}^3 \text{ mm Hg cm}^2 \text{ pro Stunde}$. Dieser Grenzwert der diffundierenden Wasserstoffmenge konnte beliebig lange beobachtet

¹⁾ W. Dällenbach u. E. Gerecke.

werden ¹⁾. Mit Erniedrigen der Wassertemperatur wurde er kleiner und änderte sich proportional der Wasserstoffionenkonzentration in destilliertem Wasser. Bei Zusatz von Säure oder Basen zum Wasser ändert sich die Wasserstoffaufnahme entsprechend der Wasserstoffionenkonzentration im Wasser.

Bei 10%iger KOH-Lösung betrug die diffundierte Menge unter gleichen Bedingungen nur noch 0,5% derjenigen vom destilliertem Wasser. Geringe Zusätze von Chrom können die Durchlässigkeit des Eisens beträchtlich vermindern. Nach

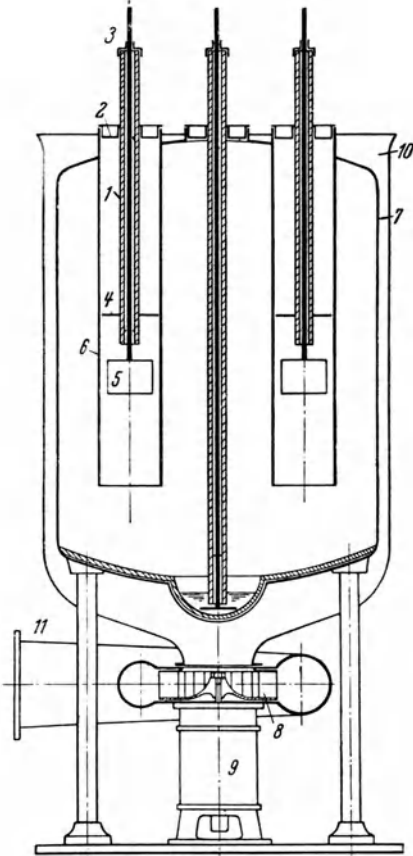


Bild 103. Schnitt durch einen mit Luft gekühlten, pumpenlosen Eisengleichrichter (J. Pintsch)
 1 = keramisches Rohr, 2, 3 = Schweißkappen,
 4 = Stützblech, 5 = Anode, 6 = Anodenschutzrohr, 7 = Gefäßwand, 8 = Lüfterrad, 9 = Motor,
 10 = Lufteintritt, 11 = Luftaustritt

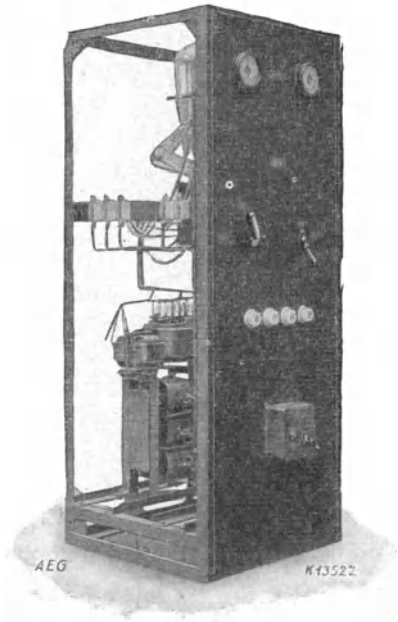


Bild 104. Ein Glasgleichrichter mit aufgebautem Ladeschalter (Abschnitt 13)

W. Dällenbach ist Chromstahl oder Chromeisen für Wasserstoffatome fast undurchlässig. Die Strömung von Wasserstoff durch Eisen und Metalle ist in der neuesten Zeit häufig Gegenstand von Erörterungen gewesen, sie läßt sich durch die Atomtheorie auch beweisen, denn letzten Endes kann eine

¹⁾ Vgl. auch BBC.-Nachrichten, Jan./März 1935, S. 27.

Strömung von Gasen nur dann stattfinden, wenn ein Strömungsweg vorhanden ist. Für die Erklärung dieses Vorganges ist die folgende Erläuterung denkbar. Jeder Stoff besteht aus Atomen bzw. Molekülen, die eine für jeden Körper verschiedene Größe haben. Wasserstoffatome haben von allen Gasen das niedrigste Atomgewicht und den kleinsten Rauminhalt, ihr Durchmesser ist etwa 10^{-8} cm und etwa gleich den Atomen des normalen Schmiedeeisens. Eine Strömung des neutralen Wasserstoffs ist demnach unmöglich. Sobald jedoch die Wasserstoffatome durch hohe Temperaturen oder durch die Ionisierungsspannung ionisiert werden, findet eine Abspaltung der Elektronen statt und aus den neutralen Gasteilchen entstehen ionisierte Wasserstoffatome, sogenannte Protonen. Diese haben nur noch einen Durchmesser von 10^{-13} cm, sind also rund 100000mal kleiner als neutrale Atome und können bequem durch Eisenwände strömen.

Nach dem *Bohrschen* Atommodell ist ein Atom mit dem Planetensystem vergleichbar, dessen Planeten gleich den Elektronen die Sonne umkreisen. Beim Ionisieren werden die Planeten oder Elektronen abgespalten und der Durchmesser des Systems um den genannten Betrag verkleinert.

Die ionisierten Wasserstoffatome vereinigen sich nach der erfolgten Durchströmung mit Elektronen und bilden somit neue Wasserstoffteilchen.

Wenn demnach ein Eisengefäß statt mit Wasser mit Luft gekühlt wird, vermeidet man die Vakuumverschlechterung durch Strömung von Wasserstoff nach dem Gefäßinnern. Außerdem wird in jedem Stromrichtergefäß ständig Wasserstoff frei, der zur Vakuumverschlechterung beiträgt. Die Abwanderung des Wasserstoffs aus dem Gefäßinnern wird in einem der nächsten Abschnitte nachgewiesen. Durch die Verwendung wasserstoffionenfrier Flüssigkeiten wie Benzin, Tetrachlorkohlenstoff und andere läßt sich die Wasserstoffdiffusion vermeiden.

Die Luftkühlung ermöglicht den Betrieb bei wesentlich höheren Temperaturen. Eine Bedingung ist jedoch die Verwendung von Elektrodenverschmelzungen und Dichtungen, die den erhöhten Temperaturen standhalten. Im Bild 103 ist der Schnitt durch ein luftgekühltes Eisengefäß dargestellt. Die Kühlluft wird durch den Weg zwischen Luftführungsschacht und Vakuumgefäß getrieben.

9. Der Bau der Stromrichter und Hilfsapparate

Größere Eisenstromrichter werden im allgemeinen freistehend, in einem hierfür passenden Raum, untergebracht. Die zu einer Stromrichteranlage gehörenden Instrumente, Regeleinrichtungen und Schaltapparate werden auf besonderen Schaltfeldern oder in Schaltzellen angeordnet. Im Gegensatz hierzu ist bei Glasstromrichtern die Anordnung der Gleichrichtergefäße in schalttafelähnlichen Eisengerüsten bevorzugt worden. Hierdurch wird die

Montage an Ort und Stelle vereinfacht, denn in den Eisengerüsten werden sämtliche Instrumente, Hilfseinrichtungen und häufig auch Schaltgeräte untergebracht. Die Erstellung einer besonderen Schaltanlage wird hin und wieder gewählt, wenn außer der normalen Schaltapparatur noch zugehörige Relais und Einrichtungen für fern- und selbsttätige Bedienung erforderlich sind. Die pumpenlosen Eisengleichrichteranlagen und teilweise auch größere ¹⁾ Glasgleichrichteranlagen werden je nach den örtlichen Verhältnissen in der einen oder anderen Bauweise ausgeführt.

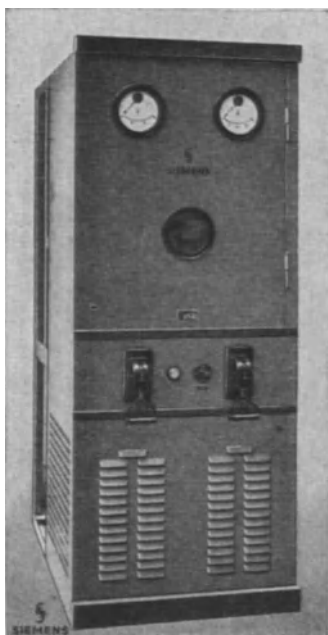


Bild 105. Mittelgroße Glasgleichrichter

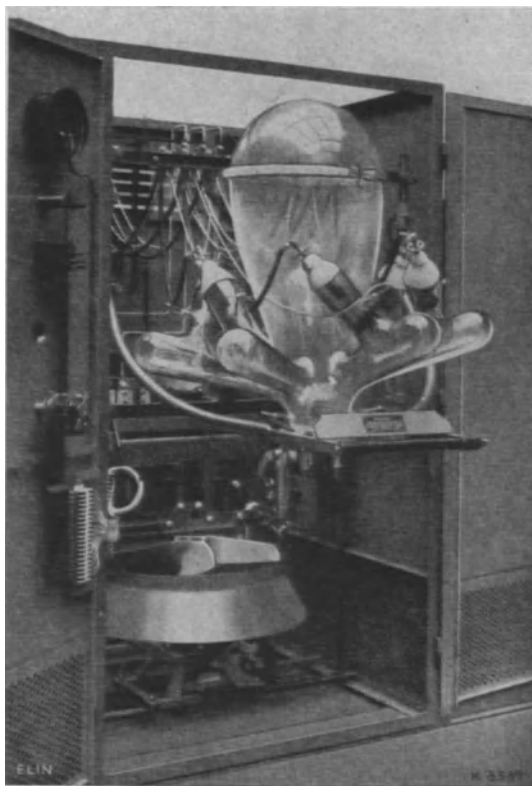


Bild 106. Ein Gerüst mit herausziehbarem Gefäßhalter (ELIN.)

a) Der Bau der Glasstromrichter

Die Bilder 104 bis 110 zeigen fertige Gleichrichter einiger Herstellerfirmen. In den letzten Jahren wurde für größere Leistungen die Anordnung der Glasgefäße im vorderen Teil der Gleichrichtergestelle bevorzugt. Diese werden durch eine teilweise oder ganz bis auf den Boden reichende Tür verschlossen, um ein bequemes Auswechseln der Glasgefäße zu ermöglichen.

¹⁾ AEG.-Mitt. 1939, H. 1, S. 19.

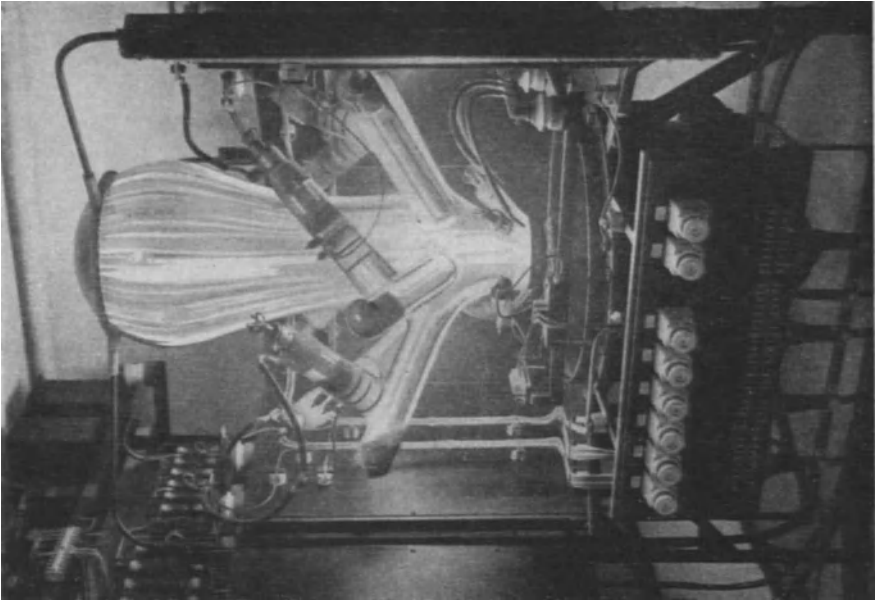


Bild 108. Ein Gleichrichter im vollen Betrieb mit sichtbaren Gitter-

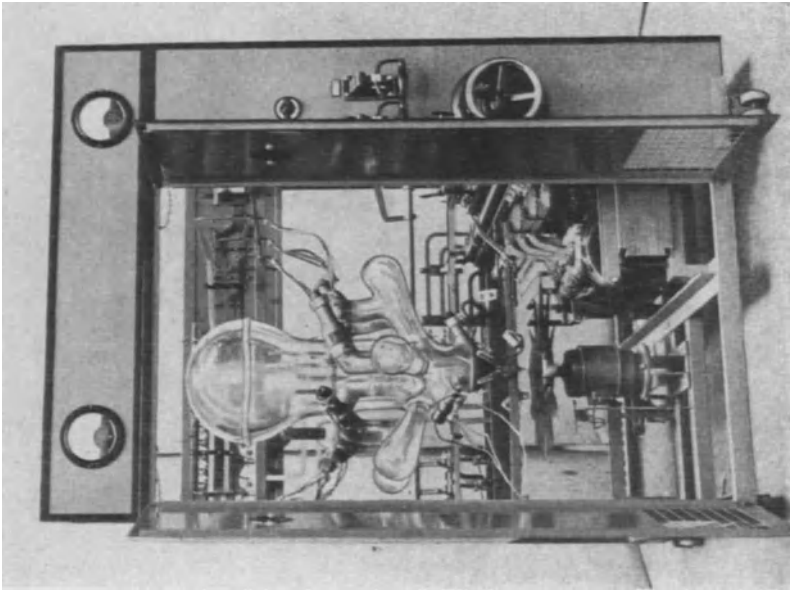


Bild 107. Ein Gleichrichtergerüst 500 A mit rechts angeordnetem

Bei kleineren Gleichrichtern lassen sich die Glasgefäße auch von oben oder von der Seite einsetzen. Interessant ist der Hochspannungsgleichrichter (Bild 110) für 15000 V Gleichspannung. Die Anodenarme haben in Anodennähe kugelige Erweiterungen und sind stark ausgeprägt, zweimal

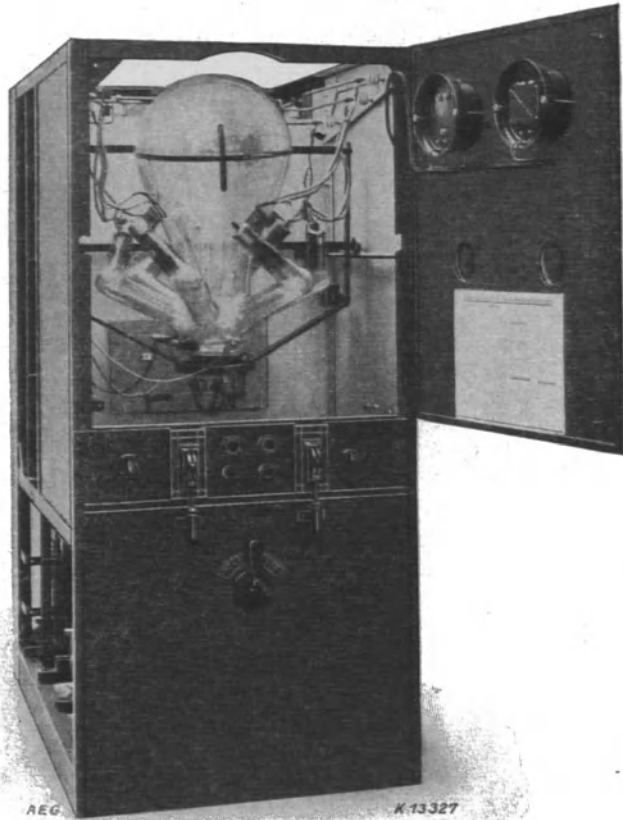


Bild 109. Ein Gleichrichtergerüst mit im unteren Teil befindlichen Spannungsregelgerät (Reguliertransformator) und herausziehbarem Gefäßhalter

geknickt worden. Zum Auswechseln größerer Glasgefäße verwendet man einen herausziehbaren Gefäßhalter, der nach vorn gezogen wird, um das Gefäß vor dem Gestell einsetzen zu können. Auch werden die Glasgefäße, wie im Bild 26 aufgewiesen wurde, vor dem Versand in besonderen Eisenrahmen befestigt. Der Rahmen dient zugleich als Transportgerät und wird an Ort und Stelle in das schalttafelähnliche Gerüst gesetzt. Die Leitungsverbindungen nach dem Gefäßhalter erfolgen durch entsprechende Klemm-

schrauben und Kabel. Man transportiert die Glasgefäße allgemein auf dem Kopf stehend, wobei das Hg in der Kühlkammer gesammelt wird. Bei einem Transport in aufrechter Stellung besteht die Gefahr, daß die Elektroden-einführungen durch den Quecksilberschlag zerstört werden.

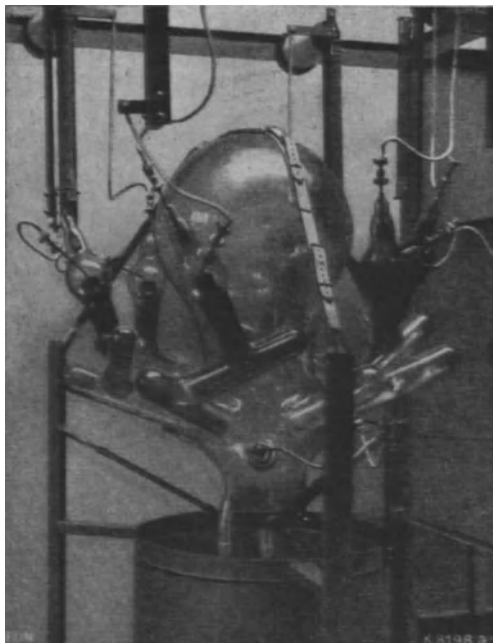


Bild 110. Ein Hochspannungsgleichrichter für 15 000 V mit zweimal geknickten Anodenarmen (ELIN.)

b) Die Bauteile der Glasstromrichter und ihre Schaltungen

Das Bild 4 zeigt die Schaltung eines fertigen Glasstromrichters, dessen Legende die einzelnen Bauteile erkennen läßt. Diese sind mit dem Glasgefäß in einem gemeinsamen Gestell vereinigt. Bei Gleichrichtern mit Regulierung werden häufig Regelumspanner mit Regulierschalter oder die Bauteile für Gittersteuerung und andere Regelarten unmittelbar im Gleichrichtergestell angeordnet. Auch werden für die Befestigung der Regelapparatur kleinere Zusatztafeln verwendet, die neben dem Gleichrichtergestell angeordnet sind. Zur Erleichterung der Montage sind im hinteren Teil der Gleichrichtergerüste entsprechende Anschlußklemmen vorgesehen. Glasgleichrichter erfordern wegen ihres verhältnismäßig geringen Gewichtes kein Fundament. Die Grundfläche der Gerüste ist so gehalten, daß sie ohne besondere Halteschrauben auf den Fußboden gestellt werden können.

Aus der Fülle der für Stromrichter im Laufe der Jahre entwickelten Schaltungen lassen sich in einer zusammenhängenden Schrift nur die wichtigsten erläutern. Die Unterschiede sind in der Hauptsache durch die verschiedenen Anwendungsgebiete und Ausführungsmöglichkeiten begründet. Die wichtigsten Ausführungsformen sind:

- Stromrichter für Licht-, Kraft-, Batterie- und Bahnbetrieb.
- Stromrichter in ein-, zwei-, drei-, sechs- und zwölfphasiger Schaltung.
- Stromrichter für Einzel- und Parallelbetrieb.

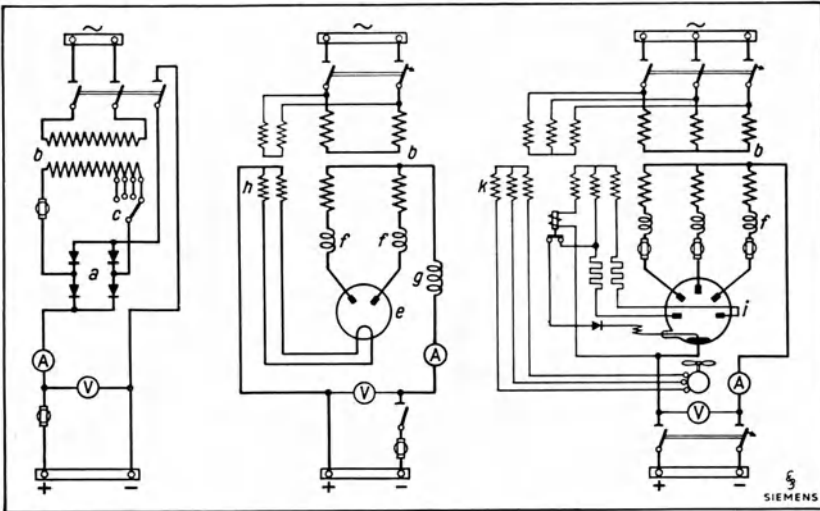


Bild 111. Grundsaltungen von Trocken-, Glühkathoden- und Quecksilberdampfgleichrichtern
a = Kupferoxydulzellen, *b* = Umspanner, *c* = Regelschalter, *e* = Glühkathodenröhre, *f* = Ladedrosselspulen, *g* = Glättungsdrosselspule, *h* = Heizung für die Glühkathode, *i* = Glaskolben, *k* = Zündung, Erregung und Kühlung für den Glaskolben

- Stromrichter mit und ohne Spannungsregeleinrichtungen.
- Stromrichter zum Anschluß an Niederspannungsnetze ohne oder mit Zwischentransformatoren.
- Stromrichter zum unmittelbaren Anschluß an die Sekundärseite eines Hochspannungstransformators, wobei dieser ein oder mehrere Stromrichtergefäße speist.
- Stromrichter für einen selbsttätigen, teilweise oder ganz überwachten Betrieb, unter Berücksichtigung der Unterwerke für Bahn- und Lichtnetze.

In den Bildern 111 bis 115 sowie im letzten Abschnitt sind einige Schaltungen dargestellt. Die Bauteile gehen aus der Legende der Unterschriften hervor, es ist jedoch wichtig, auf die Bedeutung einzelner näher einzugehen.

1. Die Anodendrosselspulen. Im allgemeinen werden für größere Leistungen mehrere Gleichrichter erstellt; auch wird häufig gefordert, daß sie mit vorhandenen Umformern oder Generatoren parallel arbeiten sollen. In dieser Anwendung müssen Gleichrichter eine abfallende Charakteristik erhalten.

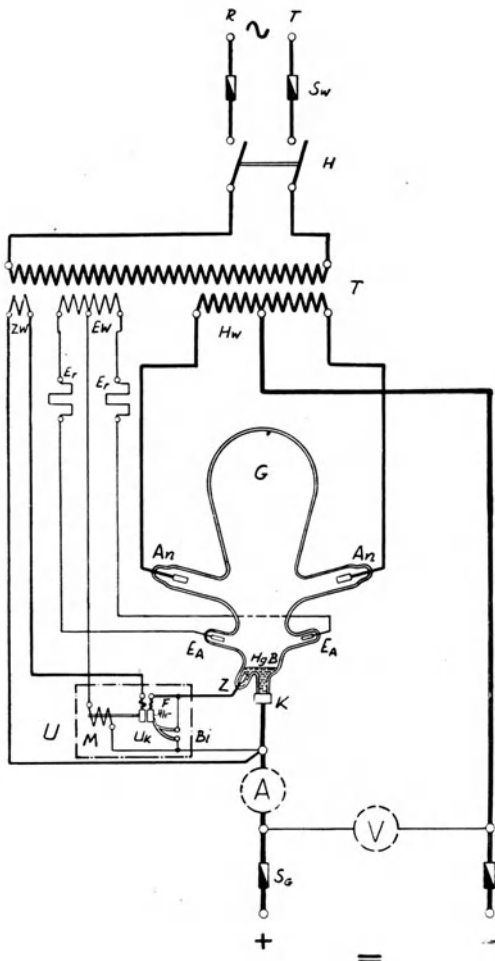


Bild 112. Prinzipschaltbild eines einphasigen Quecksilberdampfgleichrichters mit Kontraktionszündung

- A - Strommesser.
 - A_n - Hauptanoden,
 - B_i - thermischer Auslöser,
 - E_A - Erregeranoden,
 - E_w = Erregerwiderstände,
 - E_w Erregerwicklung des Transformators,
 - F - Feder,
 - G - Glaskolben,
 - H - Hebelschalter,
 - HgB - Quecksilberbrücke,
 - H_w - Hauptwicklung des Transformators,
 - K - Quecksilberkathode.
 - M - Magnetspule des U-Relais,
 - R, T - Wechselstromzuleitung,
 - S_G - Gleichstromsicherungen,
 - S_W - Wechselstromsicherungen,
 - T - Transformator.
 - U - Unterbrecherrelais,
 - U_k - Zündstromunterbrecherkontakte des U-Relais,
 - V - Spannungsmesser,
 - Z - Zündstutze,
 - Z_w - Zündwicklung des Transformators.
- Vgl. E. u. M. 51, 1933, S. 144 (E.L.N.)

Eine gleichmäßige Stromverteilung mehrerer Gleichrichter untereinander und in Parallelarbeit mit anderen Stromerzeugern, wie Generatoren oder Umformern, ist nur möglich, wenn die Spannung aller beteiligten Stromquellen mit zunehmender Belastung sinkt. Auch die Stromrichter mit einer lastabhängigen Stromkompensation und steigender Spannung bei zunehmender Belastung haben eine abfallende Charakteristik (vgl. auch Bild 225 und 257). In den Bildern 116 und 117 ist der normale Spannungs-

verlauf einer Gleichrichteranlage gezeigt. Glasgleichrichter haben demnach eine Charakteristik wie Nebenschlußmaschinen, die sich ebenfalls gut zur Parallelarbeit eignen. Eine Parallelarbeit zwischen Compoundmaschinen und Gleichrichtern ist nur dann möglich, wenn zwischen beiden ein längeres

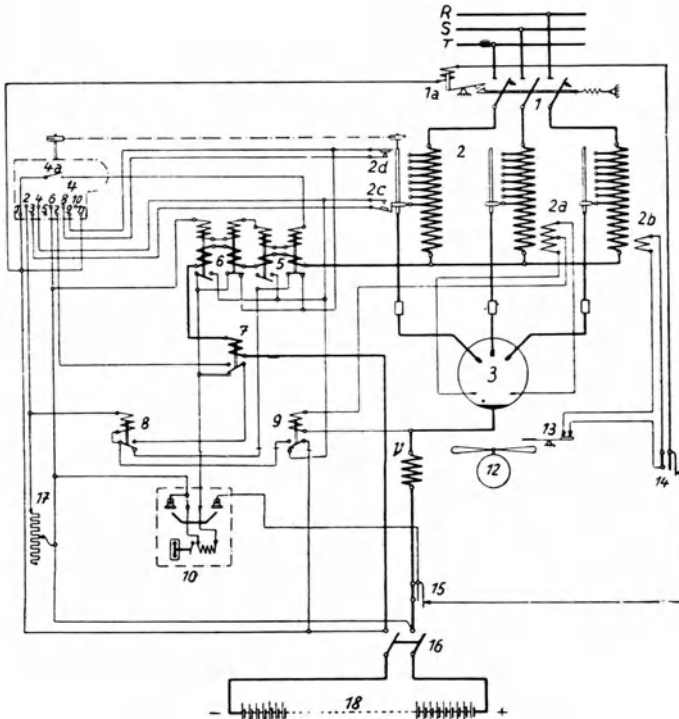


Bild 113. Schaltbild einer Glasgleichrichteranlage zur selbsttätigen Batterieladung (BBC.)

- | | | |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1 = Drehstromautomat mit | 2c = unterer Endausschalter, | 9 = Erregerrelais, |
| 1a = Nullspannungsaus- | 2d = oberer Endausschalter, | 10 = Pöhlerschalter, |
| lösung, | 3 = Gleichrichterkolben, | 11 = Kathodendrosselspule, |
| 2 = Reguliertransformator | 4 = Motorregler mit | 12 = Ventilator, |
| mit Reglerschalter, | 4a = Hilfskontakt, | 13 = Windklappe mit Kontakt, |
| 2a = Hilfswicklung 110 V für | 5 = Stromregulierungsrelais | 14 = thermisches Verzögerungs- |
| Erregung und Auslöse- | für vollen Ladestrom, | relais, |
| magnet, | 6 = Stromregulierungsrelais | 15 = thermisches Überstrom- |
| 2b = Hilfswicklung 8 V für | für Nachladestrom, | relais, |
| thermisches Verzögerungs- | 7 = Minimalstromrelais, | 16 = Gleichstromschalter, |
| relais, | 8 = Maximalspannungsrelais, | 17 = Regulierwiderstand, |
| | | 18 = Batterie. |

Verbindungskabel vorhanden ist, welches einen bestimmten Spannungsabfall voraussetzt. Durch den Verlust im Kabel erhalten häufig auch Compoundmaschinen, im Speisepunkt der Gleichrichter gemessen, den Charakter einer Nebenschlußmaschine. Die Parallelarbeit mit Einankerumformern und Motorgeneratoren normaler Ausführung ist stets möglich, wenn diese eine Nebenschlußcharakteristik haben. Um den Spannungs-

verlust von Gleichrichtern zu erhöhen, werden den Anoden der Glas- oder Eisengefäße auch Drosselspulen vorgeschaltet. Diese erhalten einen verstellbaren Luftspalt oder Spulenzapfungen, damit die Charakteristik der Gleichrichter den ortsüblichen Verhältnissen angepaßt werden kann. Im Bild 118 ist in einer Kurve die Verstellmöglichkeit einer zweiteiligen Anoden-

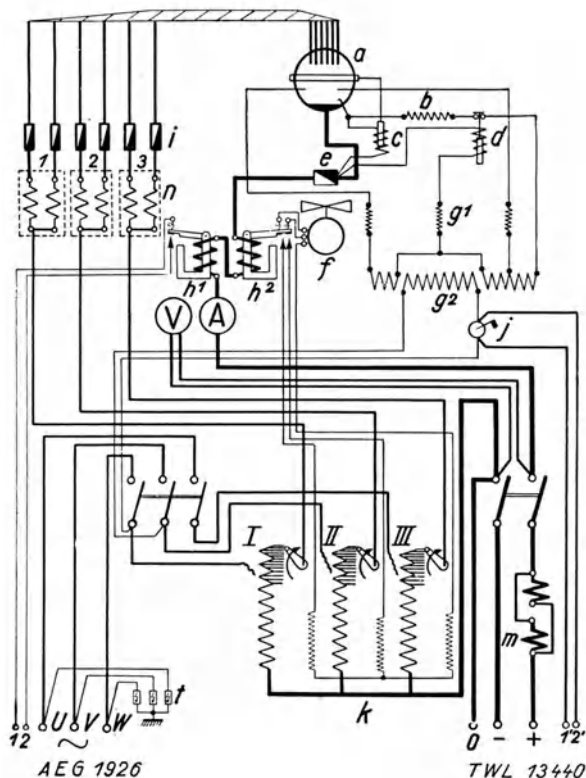


Bild 114. Schaltbild eines selbsttätig arbeitenden Glasgleichrichters (AEG.)

a = Gleichrichtergefäß, b, c, d = Zündkreis, e, i = Sicherungen, f = Lüftermotor, g_1, g_2 = Erregerstromkreis, h_1, h_2 = Schaltrelais für den Lüftermotor, h_1 = Überstromrelais zum Einschalten weiterer Gleichrichter, k = Regulierungspanner, m = Gleichstromdrosselspule, n = Stromteilerdrosselspulen, t = Überspannungsableiter

drosselspule normaler Bauweise bei verschiedenen Luftspalteinstellungen zur Anschauung wiedergegeben. Die Kurvenwerte sind praktischen Messungen im Prüffeld entnommen. Drosselspulen erhalten häufig ein Spulenspaar und einen gemeinsamen Eisenkernumschluß. Der angegebene Luftspalt ist die Summe der einzelnen Zwischenräume zwischen den Kernen und Jochen des Eisens in Millimetern. Wie die Kurve erkennen läßt, ist eine Veränderung der Drosselwirkung in den Grenzen von 200 bis 800 VA möglich. Demnach kann eine Verstellung der Charakteristik an Ort und Stelle in weiten Grenzen erfolgen. Auch lassen sich durch Veränderung der

Luftspalteinlagen mehrere parallel arbeitende Gleichrichter auf genaue Stromverteilung einrichten. Die höchst zulässigen Spannungsabfälle sind durch die Netzverhältnisse gegeben. Erwünschte Mindestwerte für eine ausreichende Dämpfung beim satten Kurzschluß sind im Abschnitt 6 erläutert worden.

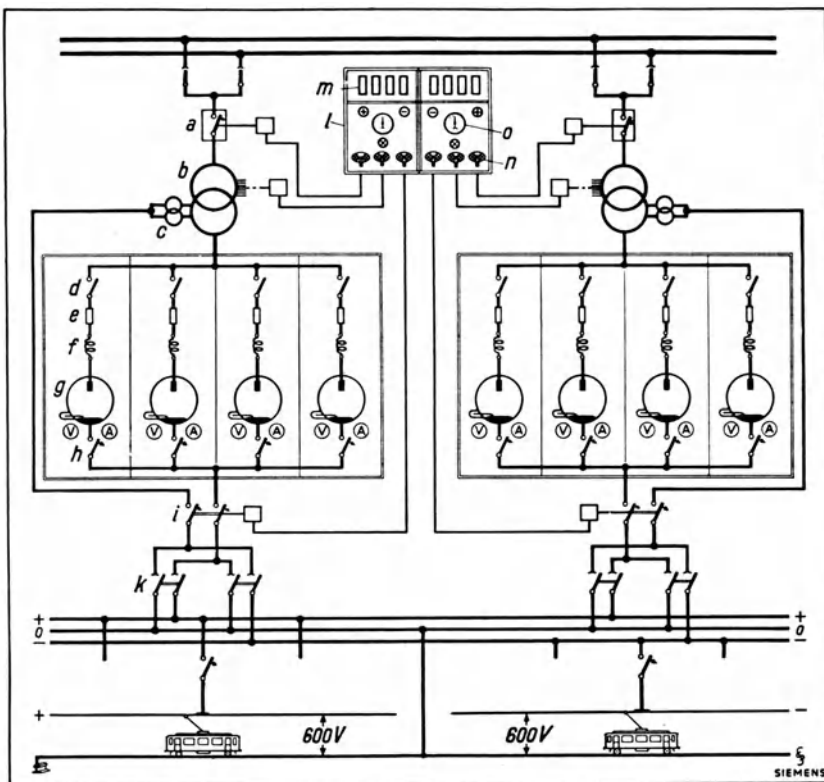


Bild 115. Glasstromrichteranlage, 8 Gefäße 500 A. *a* = fernbetätigter Drehstromschalter, *b* = Haupttransformator mit Lastschalter, *c* = Saugdrossel, *d* = sechspolige Anodentrennschalter, *e* = Anodensicherungen, *f* = Anodendrosseln, *g* = Glaskolben, *h* = handbetätigter Überstromschalter, *i* = fernbetätigter Gruppenüberstromschalter, *k* = handbetätigter Umschalter, *l* = Schalterpult, *m* = Meßinstrumente, *n* = Steuerschalter, *o* = Stellungsanzeiger für Lastschalter

2. *Stromteiler im Anodenkreis.* Beim Parallelschalten mehrerer Anoden in einem Gleichrichter, beispielsweise in Dreiphasengleichrichtern mit sechsarmigen Glaskörpern (Bild 114), müssen Induktivitäten vor die parallel arbeitenden Lichtbögen geschaltet werden, um die gleichmäßige Stromlieferung der parallel geschalteten Anoden sicherzustellen. Sobald die Leitung vom Transformator unmittelbar mit zwei Anoden verbunden wird, entsteht ein fortwährendes Springen der Ströme von einer Anode auf die andere. Im Bild 119 ist die Schaltung für einen Gleichstromkreis wiedergegeben und darunter die mit einem Oszillographen aufgenommenen Strom-

kurven der Anoden i_1 und i_2 . Die Kurven lassen erkennen, daß der Strom unregelmäßig durch das Gefäß fließt. Dieser Zustand läßt sich auch beob-

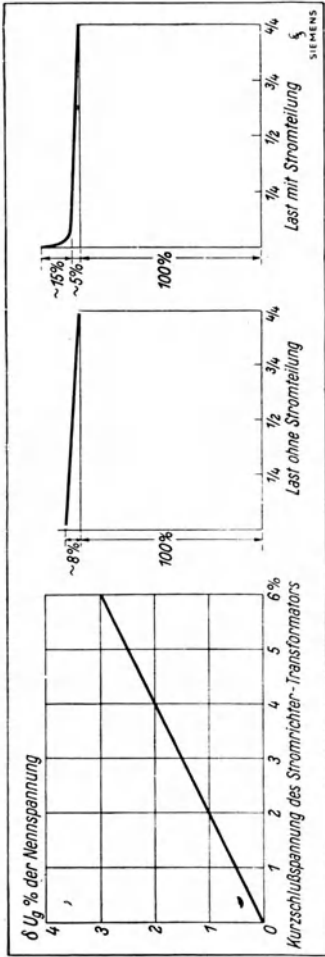


Bild 116. Spannungscharakteristiken und ihre Veränderung durch den Einfluß der Induktivitäten (Abschnitt 12)

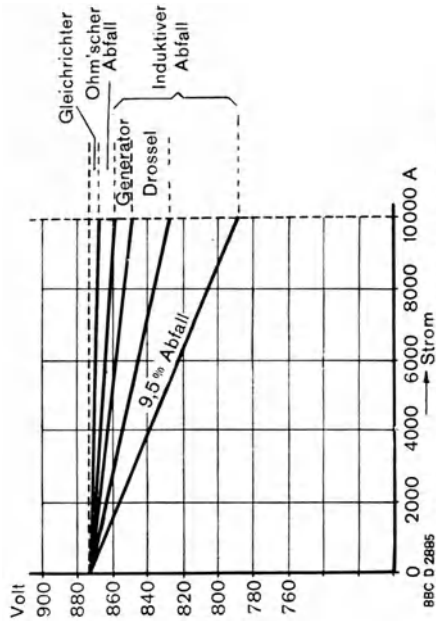


Bild 117. Spannungscharakteristiken einer Gleichrichtergruppe. Unterteilung des Spannungsabfalles

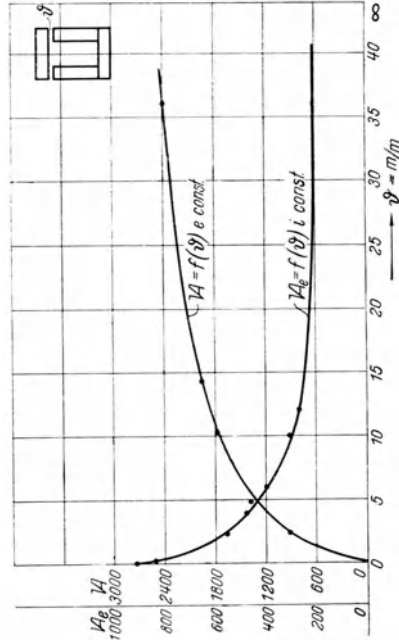


Bild 118. Die Veränderung der Leistung einer Drosselspule in Abhängigkeit vom Luftspalt bei konstanter Spannung bzw. Strom

achten, wenn ein Gleichrichter mit einem Gefäß arbeitet, das parallel geschaltete Anoden hat und nur gering belastet wird. Bei geringer Belastung ist die Induktivität der Stromteilerspulen so gering, daß eine erzwungene Parallelarbeit noch nicht stattfindet. Dieser Zustand ist jedoch für die sichere Funktion der Gleichrichtung ohne Bedeutung, weil bei kleiner Beanspruchung eine Überbelastung einzelner Anoden nicht eintreten kann. In der Praxis erstellte Anlagen mit Stromteilern zeigen eine gute Stromverteilung von etwa 10% der Nennstromstärke aufwärts¹⁾. Stromteiler werden auch für Eisengleichrichter verwendet, wenn 12- oder 18anodige Gefäße in Verbindung mit sechsphasigen Umspannern zur Anwendung kommen.

Um den Spannungsabfall der Stromteilerspulen auf ein Mindestmaß zu reduzieren, werden die Kraftlinienflüsse der einzelnen Spulen gegeneinander geschaltet. Bild 120a zeigt in einer Kurvenschar die Meßergebnisse an einem Beispiel. Die beiden unteren gestrichelten Kurven beweisen, daß der Spannungsverlust an den Drosselspulen bei Gegenschaltung und völlig geschlossenem Eisenumschluß am kleinsten ist. Ferner zeigen die sich nach oben anschließenden Kurven den Spannungsabfall der Spulen bei verschieden großem Luftspalt und gleichgerichteten magnetischen Kraftlinien.

Nach diesem Beispiel kann ein Gleichrichter bei der Gegenschaltung für einen vernachlässigbar geringen Spannungsverlust eingestellt werden und bei der Hintereinanderschaltung für eine den Betriebsverhältnissen angepaßte Spannung in den Grenzen zwischen 6 bis 25 V. Eine Weiterbildung der magnetischen Verkoppelung gestattet die zwangsweise Parallelarbeit beliebig vieler Anoden. Dies geschieht durch eine Leitungsführung von dem Pol einer Umspannerphase zur Anode des Gleichrichters II Bild 121 über eine Spulenhälfte des Stromteilerpaares im ersten Gleichrichter. Sodann wird Gleichrichter II mit Gleichrichter III verkoppelt usw., bis sich der letzte mit dem ersten schließt. Eine ähnliche Verkoppelung ist durch eine vielpolige Ausbildung der Spulen Bild 120a möglich.

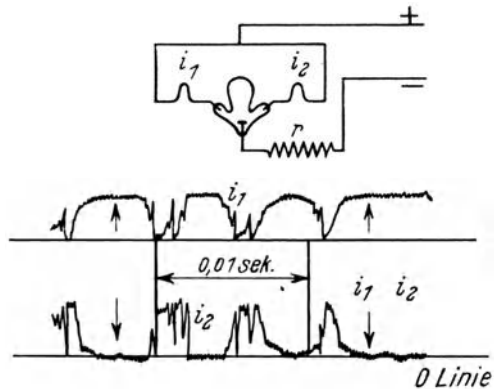


Bild 119. Parallelarbeit von Lichtbogen

¹⁾ Die durch Änderung der Hg-Dampfdichte und des Lichtbogenverlustes (Bild 75) bei wechselnder Belastung und Kühlung vorhandene Beeinflussung der Parallelarbeit wird durch die Induktivitäten unwirksam gemacht. (Vgl. auch Saugdrosselspule S. 219.)

3. Die Glättungsdrosselspule. Die Glättungsdrosselspule wird häufig mit Kathodenspule bezeichnet, weil sie mit wenigen Ausnahmen in die Kathodenleitung geschaltet wird. Sie dient zum Glätten des pulsierenden Gleichstromes und wird bei den verschiedenen Gleichrichterschaltungen und An-

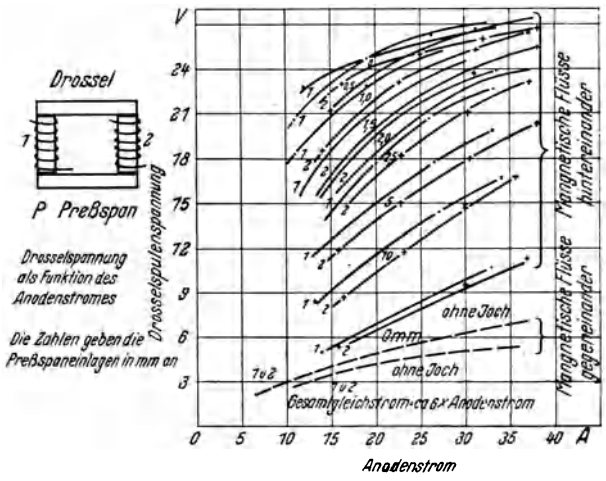


Bild 120a. Magnetische Kopplung von Anodenspulen

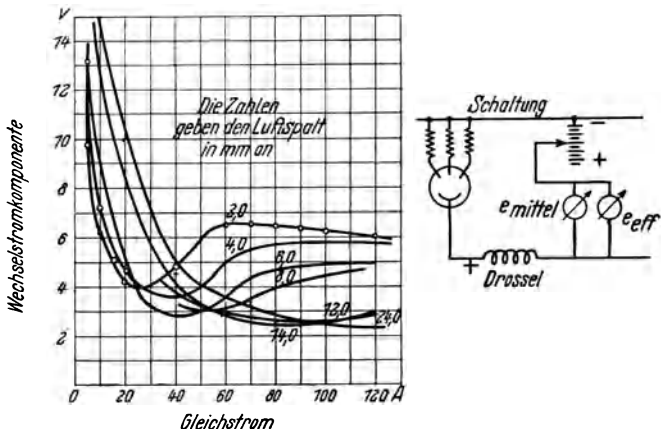


Bild 120b. Wechselstromkomponente der Gleichspannung eines Drehstromgleichrichters als Funktion des Kathodenspulenluftspaltes

wendungsgebieten nicht gleich dimensioniert. Ihre Größe ist oft durch den Herstellungspreis begrenzt. Bei der Berechnung von Gleichrichtern wird zur Vereinfachung die unendlich große Drosselspule zugrunde gelegt. Selbst mit der größten herstellbaren Spule lassen sich nicht alle Oberwellen im Gleichstromkreis beseitigen. Die in der Praxis erreichbaren Glättungswerte sind im Abschnitt 12 erläutert. Zwischen diesen Maximalwerten und dem

ungeglätteten Gleichstrom bestehen jedoch noch mehrere vorteilhafte Anwendungen für die Glättungsdrosselspule, auch wenn sie nur eine mäßige glättende Wirkung ausübt. So ist das Glätten des Gleichstromes für Batterie-ladegerichter zur Vermeidung übermäßig hoher Scheitelwerte des Ladestromes (Bild 161) vorteilhaft. Eine Verminderung des Scheitelwertes entlastet die Gefäßanoden und den Anodenstromkreis. Häufig werden Glättungsdrosselspulen als Dämpfungsmittel in den Gleichstromkreis geschaltet, um das allzu hohe Ansteigen des Kurzschlußstromes zu vermeiden. Sechssphasengleichrichter werden für einfache Kraft- und Bahnbetriebe oft ohne Glättungsspulen ausgeführt, dagegen erhalten Dreiphasengleichrichter im allgemeinen eine Glättungsspule, um die natürliche Welligkeit des Gleichstromes von 18 auf etwa 6% der Gleichspannung zu vermindern. Dies ist der Effektivwert des der mittleren Gleichspannung überlagerten Wechselspannung, wobei eine induktionsfreie Gleichstrombelastung angenommen wird. Eine stark induktive Gleichstrombelastung übt eine glättende Wirkung auf den Strom aus, wodurch Strom und Spannung

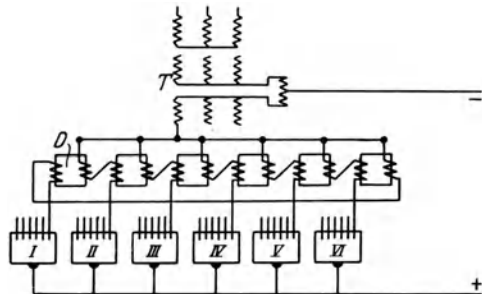


Bild 121. *D* Drosselspulen mit gegeneinandergerichteten Kraftlinien, die durch die einzelnen Spulen erzeugt werden, I VI Gleichrichter, T = Transformator

verschiedene Form erhalten (Abschnitt 12). Bild 8 läßt erkennen, daß schon eine verhältnismäßig kleine Drosselspule die überlagerte Wechselspannung kräftig vermindert. Die Praxis hat bewiesen, daß diese in der Größenordnung von 8 bis 10% der mittleren Gleichspannung für Gleichstromverbraucher wie Glühlampen, Batterien, Elektromotore usw. nicht nachteilig ist. Für die Bemessung der Spulen zum Entstören von Gleichrichtern müssen jedoch andere Maßstäbe gewählt werden.

Die Glättungsspulen werden gleich den Anodenspulen mit einem einstellbaren Luftspalt versehen. Bild 120 *b* gibt einige Messungen bei einem veränderlichen Luftspalt von 2 bis 14 mm wieder. Wie die Kurvenschar erkennen läßt, entstehen beträchtliche Veränderungen des überlagerten Wechselstromes je nach der Größe des Luftspaltes. Die Glättungswirkung der Drosselspulen ist nach dem Beispiel bei einem Luftspalt von 6 mm am günstigsten, denn sie sollen so bemessen sein, daß von etwa $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{1}$ Belastung angenähert gleiche Glättungswerte entstehen. Dieser Belastungswert entspricht der Mehrzahl der im Betrieb befindlichen Anlagen. Kleinere Belastungen sind selten zu erwarten. Bei gittergesteuerten Gleichrichtern nach Abschnitt 11 ist die Glättungsspule für sämtliche Stromrichterschaltungen unerläßlich. Wenn die Gleichrichteranlage einen Störschutz

erhält, bildet die Kathodenspule einen Bestandteil der Störschutzanordnungen, die an anderer Stelle besonders behandelt werden. Sie sind ab und zu erforderlich, wenn vom Gleichstromnetz Rundfunkapparate gespeist werden. Auch kann ein Bahnnetz ohne Glättungseinrichtung ein Telefonnetz stören.

4. Die Speisung und Regulierung der Kühlventilatoren der Stromrichter. Mit Kühlventilator ausgerüstete Stromrichter werden häufig ohne Rücksicht auf die Höhe der Belastung, besonders wenn diese oft wechselt, gleichmäßig

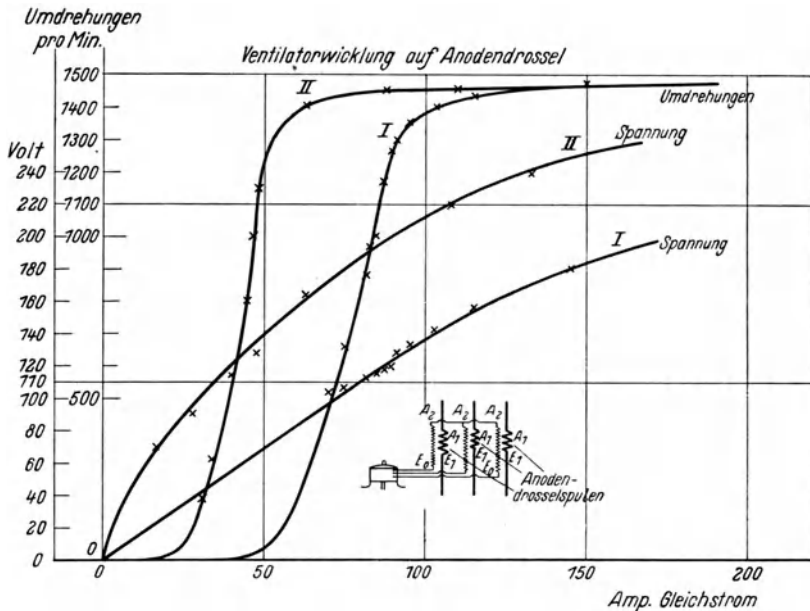


Bild 122. Die Abhängigkeit der Motordrehzahl von der Belastung eines Gleichrichters

gekühlt. Es sind jedoch Schaltungen entwickelt worden, die Kühlventilatoren bei kleinerer Belastung außer Betrieb zu nehmen. Bild 114 zeigt ein in den Gleichstromkreis geschaltetes Stromrelais, das den Ventilatormotor bei wechselnder Belastung ein- und ausschaltet. Eine lastabhängige und kontaktlose Kühlmotorregelung ist im Bild 123a dargestellt¹⁾. Die Anodendrosselspulen des Gleichrichters haben eine Zusatzwicklung, die den Ventilatormotor speist. Mit zunehmender Belastung entsteht in der Wicklung eine allmählich steigende Wechselspannung, die dem Motor zugeführt wird. Im Bild 122 ist die veränderliche Motordrehzahl bei verschiedenen Belastungen für zwei Luftspaltwerte I und II in Kurvenform aufgetragen. Der Höchstwert der Motordrehzahl wird bei etwa 60% der Nennstromstärke

¹⁾ Fr. Hellmuth, Der Argonalgleichrichter, S. 39, a. a. O., DRP. 486839.

erreicht. Es sind zahlreiche Anlagen in dieser Schaltung ausgeführt worden. Sie hat den Nachteil, daß die Motore größer ausgeführt werden müssen als bei der Speisung mit einem Wechselstrom reiner Sinuskurve. In der den Motor speisenden Wicklung entstehen durch die pulsierenden Anodenströme verzerrte Wechselspannungen mit stark ausgeprägten Oberwellen. Eine Anordnung mit einer günstigeren Kurvenform zeigt Bild 123¹⁾. Der Ventilator ist an konstante Wechselspannung angeschlossen. Zwischen Spannungsquelle und Motor sind vom Hauptgleichstrom durchflossene Transformatoren angeordnet. Diese wirken bei kleinem Gleichstrom als Drosselspulen. Die ver-

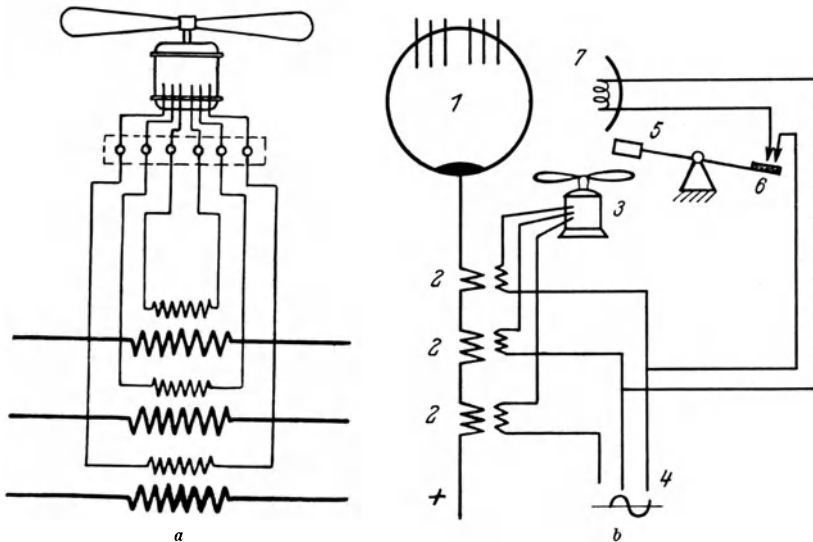


Bild 123. Kühlmotorregelanordnung. Links = Anodenstromregelung, rechts = Kathodenstromregelung (Fr. Hellmuth, Der Argonalgleichrichter, Leipzig 1933). 1 = Gleichrichtergerätfäß, 2 = 3 Einphasentransformatoren mit Gleichstromvormagnetisierung, 3 = Kühlmotor, 4 = Wechselstromhilfskreis, 5 = Windklappe, 6 = Schließkontakt, 7 = Heizkörper für die Gefäßvorwärmung

bleibende Restspannung reicht für den Anlauf des Motors nicht aus. Bei zunehmender Vormagnetisierung durch den Gleichstrom dagegen wird die Drosselspulenwirkung allmählich verringert, und die Drehzahl steigt bei wachsender Belastung in ähnlicher Weise an, wie im Bild 122 angegeben ist²⁾. Außer diesen transformatorisch wirkenden Anordnungen sind noch Schaltungen mit zeitverzögerten Relais entwickelt worden. Hierzu sind mechanisch oder elektrisch wirkende Zeitelemente in Verbindung mit einfachen Stromrelais geeignet. Eine zuverlässige Kühlmotorregelung entsteht durch eine Abhängigkeit von der Gefäßtemperatur. Ein am Gefäß angebrachter

¹⁾ Fr. Hellmuth, Der Argonalgleichrichter, S. 38, DRP. 480202 (von den SSW. angewendet).

²⁾ Fr. Hellmuth, ebenda S. 39, a. a. O., DRP. 486839.

Wärmefühler vermeidet beispielsweise bei häufigen Stromstößen im Gleichstromnetz ein allzu häufiges Anlaufen des Kühlmotors¹⁾.

5. *Die Gefäßvorheizung.* In besonders kalten Räumen soll nach nicht ganz einheitlichen Angaben ein Stromrichtergefäß vor der Zündung erwärmt werden, um die Entstehung von schädlichen Überspannungen zu vermeiden. Im allgemeinen sollen Glasgefäße bei Raumtemperaturen unter 5° C vor dem Einschalten angewärmt werden²⁾, um für den Zünd- und Erregerstromkreis einen genügenden Hg-Dampfvorrat zu schaffen. Zu diesem Zweck ist eine Schaltung in Verbindung mit der Motordrehzahlregulierung Bild 123 entwickelt worden. Die über dem Kühlventilatorflügel sitzende Windklappe 5 wird vom Luftstrom angehoben, sobald der Kühlmotor 3 anläuft. Die Heizung ist nur dann in Betrieb, wenn der Kühlmotor stillgesetzt und die Belastung niedrig ist. Der Vorteil dieser Schaltung besteht darin, daß ein Glasgefäß nicht nur vor der Inbetriebnahme erwärmt wird, sondern auch während der Betriebszeit und bei größeren Belastungspausen, die in Bahnanlagen häufig zu erwarten sind. Die Heizkörper haben etwa die Form kleiner Heizsonnen, ihre Wärmestrahlen sind auf das Kathodenbecken gerichtet. Größere Gefäße erhalten mehrfach unterteilte Heizeinrichtungen. In den wärmeren Jahreszeiten kann der Heizstromkreis durch einen Handschalter außer Tätigkeit gesetzt werden.

6. *Die Anodensicherungen.* Die Glasstromrichter werden wohl immer mit Anodenschutzsicherungen ausgerüstet. Sie bilden einen Schutz für beide Stromrichtungen. Von den Herstellerfirmen sind in den Betriebsvorschriften besondere Hinweise vorhanden über die richtige Auswahl von Ersatzpatronen für durchgeschmolzene Sicherungen, denn nicht jede Sicherung ist imstande, das Glasgefäß richtig und schnell genug abzuschalten. Es sei besonders darauf hingewiesen, daß sich offene Schmelzstreifen für den Schutz des Glaskörpers nicht eignen, da sie nach Abschnitt 6 eine wesentlich größere Abschmelzzeit haben als die von den Gleichrichterfirmen verwendeten geschlossenen und mit feingesiebttem Sand gefüllten Schmelzpatronen. Für kleinere Eisengleichrichter werden Anodensicherungen in gleicher Weise verwendet.

7. *Die Sicherungen im Gleichstromkreis.* Die kleineren Gleichrichter bis zu etwa 100 A erhalten im Gleichstromkreis normale Schutzpatronen, die im Falle eines Gleichstromkurzschlusses durchschmelzen. Mittlere Gleichrichter sind auch mit gekühlten, offenen Sicherungen ausgerüstet worden, deren Schmelzstreifen unmittelbar im Luftstrom über dem Kühlventilator

¹⁾ Wird von Pintsch für pumpenlose Eisengleichrichter angewendet. Vgl. auch *Fr. Hellmuth*, Der Argonalgleichrichter, a. a. O., S. 41.

²⁾ *G. W. Müller*, Elektr. Bahnen 1932, H. 11. ELIN.-Sonderdruck St. 113/37. (Von der Firma ELIN. wird die Notwendigkeit der Vorheizung verneint.)

sitzt. Durch die Luftkühlung wird die Abschmelzgrenze einer offenen Sicherung um den etwa $2\frac{1}{2}$ - bis 3fachen Betrag heraufgesetzt. Eine 50-A-Sicherung reicht zum Schutz eines 150-A-Gleichrichters aus. Die Kühlung ermöglicht hier dieselbe Leistungssteigerung, wie sie auch bei den Gleichrichtergeräten besteht.

8. *Die Wechsel- und Gleichstromschalter.* Häufig werden Glasgleichrichtergerüste mit Wechselstromhebelschaltern ausgerüstet. Für die Gleichstromableitungen werden Hebelschalter oder Gleichstromselbstschalter verwendet. Bild 115 zeigt das Schaltbild einer Glasgleichrichtergruppe, die aus 8 Gleichrichtern je 500 A besteht. Aus dem Schaltbild geht hervor, daß mit Hilfe der Schalter *d* und *h* jedes Glasgefäß stromlos geschaltet werden kann, um während des Betriebes eine Überholung oder Auswechslung vornehmen zu können. Eine Eigenheit der Schaltung ist die umschaltbare Gleichstromverteilung, wodurch der Fahrdraht mit der positiven oder negativen Sammelschiene verbunden werden kann. Die in den Gleichrichtergerüsten untergebrachten Gleichstromselbstschalter werden ein- oder zweipolig ausgeführt. Die Selbstschalter erhalten im allgemeinen stromabhängige Zeitrelais, die innerhalb der Überlastungsgrenzen der Gleichrichtergerätee eine Ausschaltung gestatten, wenn der Überlastungsstrom die zulässige Grenze erreicht. Für größere Glas- und Eisengleichrichteranlagen werden vielfach Schnellschalter verwendet, die im Abschnitt 13 in ihrer Bedeutung für Gleichrichter erläutert sind.

9. *Die Ventilatormotore.* In kleineren Gleichrichteranlagen werden die Ventilatormotore wohl immer von der Sekundärseite des Leistungstransformators gespeist. Für größere Anlagen sieht man oft einen besonderen Hilfstransformator vor, der die Aufgabe hat, Zünd- und Erregereinrichtungen, Ventilatormotore, Steuerrelais, Regelorgane usw. zu speisen. Die Kühlmotorachsen laufen auf einem Stützlager. Auch werden für die seitliche Führung Kugellager verwendet, um ein Schleudern der Achse zu vermeiden. Die Motore bilden den einzigen Bauteil, der einem mechanischen Verschleiß unterliegt.

10. *Der Schutz der Stromrichter beim Versagen der Kühlventilatoren.* Die Haltbarkeit der Stromrichtergerätee ist unter Umständen von der sicheren Funktion der Kühlventilatoren abhängig. Um in Störungsfällen das Gefäß zu schützen, sind von den Herstellerfirmen Vorkehrungen getroffen worden. Die im vorstehenden erwähnte gekühlte Sicherung erfüllt teilweise diese Aufgabe, denn sie schmilzt mit einiger Annäherung durch, wenn der Kühlmotor innerhalb der vorgeschriebenen Kühlgrenzen zum Stillstand kommt. Ihr Nachteil ist jedoch, daß offene Schmelzstreifen beim Durchschmelzen einen großen Lichtbogen erzeugen, wodurch heiße Metallteilchen des Streifens vom Luftstrom gegen das Glasgefäß getrieben werden und dieses zerstören können. Außerdem arbeiten sie in den Grenzen von 30 bis 50 %

Belastung nicht genau genug. Einen sicheren Schutz bieten die oft verwendeten Windklappen Bild 124, die über dem Luftstrom des Ventilators angeordnet sind und bei laufendem Kühlmotor angehoben werden. Die bei stehendem Kühlmotor geschlossenen Kontakte 5 werden zum unmittelbaren Abschalten der Gleichrichteranlage benutzt, oder zum Signalisieren eines

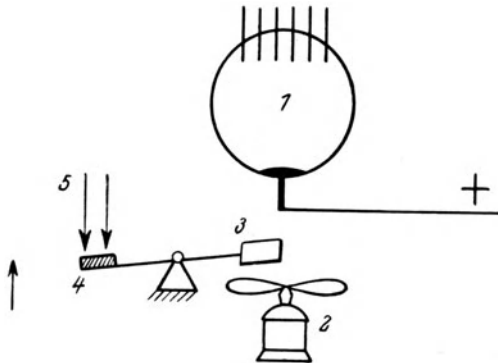


Bild 124. Windklappe als Schutz für den Kühlmotor (DRP. 270002, *Fr. Kleeberg, A.E.G.*). 1 = Gleichrichtergefäß, 2 = Kühlmotor, 3 = Windklappe, 4 = Schließkontakt, 5 = Signalleitungen

Wärters, der für die Entlastung des Gleichrichters die erforderlichen Maßnahmen ergreifen muß. In gleicher Weise sind auch Wärmefühler verwendet worden, die unmittelbar am Gefäß befestigt sind. Sobald dessen Temperatur zu hoch ansteigt, wird ein Signal- oder Ausschaltstromkreis geschlossen. Diese Anordnung kann auch als Überstromschutz verwendet werden, um den Gleichrichter bei betriebs-

mäßigen Überlastungen zu schützen, was die Windklappe nicht vermag. Auch wird ein Signalkontakt an der Motorwelle vorgesehen, der bei stehendem Motor geschlossen ist ¹⁾.

c) Die selbsttätige Zu- und Abschaltung mehrerer Gleichrichter untereinander

Aus dem Abschnitt „Planung von Stromrichteranlagen“ geht hervor, daß oft die Forderung gestellt wird, im Laufe eines Tages selbsttätig einen oder mehrere Stromrichter in und außer Betrieb zu nehmen. Für kleinere Gleichrichtergruppen werden (Bild 114 und 125) in den Gleichstromkreis der Gleichrichter Maximalrelais *h* 1 gesetzt, die bei wachsender Belastung ein sukzessives Einschalten einer größeren Gleichrichtergruppe ermöglichen. Dies geschieht lediglich durch Schließen der Zünd- und Erregerkreise. Beim Abfallen der Belastung erfolgt in umgekehrter Weise die Abschaltung ²⁾. Nach Abschnitt 3 wird jedoch der Hauptstrom durch die Ausschaltung des Erregerstromes nicht unterbrochen. Der Hauptstromlichtbogen erlischt erst beim Erreichen des Minimalstromes, dessen Größe nicht genau definierbar ist, daher schwankt der Ausschaltstrom in verhältnismäßig weiten Grenzen. Die Schaltung ist trotzdem in kleineren Werken oft

¹⁾ ELIN.-Sonderdruck St. 114, 38.

²⁾ *G. W. Müller*, Quecksilberdampfgleichrichter 1924, a. a. O., S. 66.

verwendet worden, um an Glaskörperbrennstunden zu sparen. Größere Gleichrichter erhalten gesteuerte Hauptstromschalter, auf die im Abschnitt 13 hingewiesen ist.

d) Die Regulierung der Stromrichterspannung (Gleichrichter)

Der einheitlichen Bauweise entsprechend war man von jeher bestrebt, die Regelanordnung im Glasgleichrichtergestell anzuordnen. Bei größeren

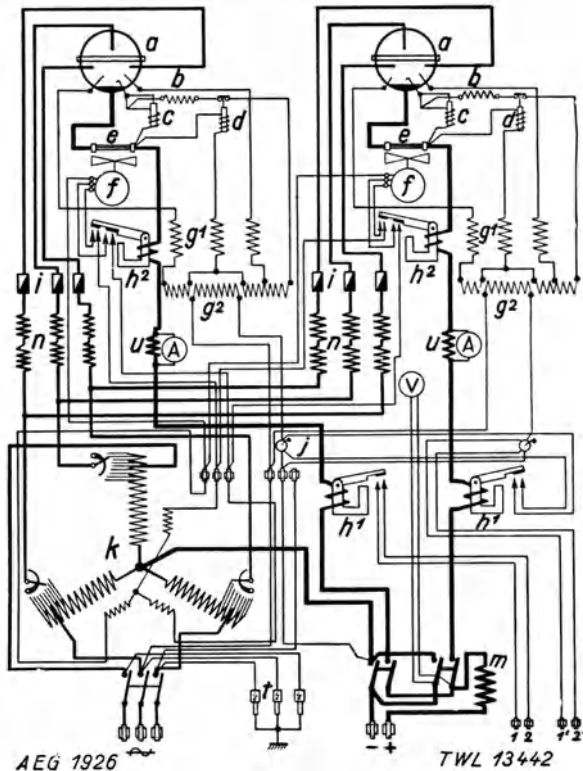


Bild 125. Zwei mit lastabhängiger Zu- und Abschaltung parallel auf das gleiche Netz arbeitende Gleichrichter. (Indexzeichen wie Bild 114)

Leistungen begrenzt sich diese Anordnung jedoch selbst. So zeigt Bild 115 die Ausführung mit zwei Leistungstransformatoren, die je einen aufgebauten Lastschalter zum Regeln der sekundären Phasenspannung haben. Diese und somit die Gleichspannung wird in ihrer Höhe durch Verstellen des Reglerschalters ähnlich dem Schaltplan Bild 126 geändert. Eine Ausführung dieser Lastschalter¹⁾ für größere Glas- und Eisengleichrichter zeigen Bilder 127 und 131 A. Sie werden als Luft- oder Öllastschalter ausgeführt.

¹⁾ K. Bölte u. R. Kügler, Transformatoren mit Stufenregelung, Berlin, R. Oldenbourg, 1938.

Die in den Gleichrichtergestellen untergebrachten kleineren Regelumspanner Bilder 114 und 125 werden häufig in Sparschaltung ausgeführt. Sie erhalten Regelanzapfungen und einen Zellschalter, der nach dem Prinzip der Batteriezellschalter als Langbahn- oder Rundscharter eine Verstellung der Anodenspannung während des Betriebes gestattet. Der Regler Bild 128 von Pintsch hat Stufenspannungen von 0,5 bis 1 V und gestattet eine praktisch stufenlose Veränderung der Spannung. Ein weiterer Vorteil ist der praktisch funkenfreie Übergang von Kontakt zu Kontakt, denn während des Überschaltens werden durch eine entsprechende Anordnung der Eisenkerne die

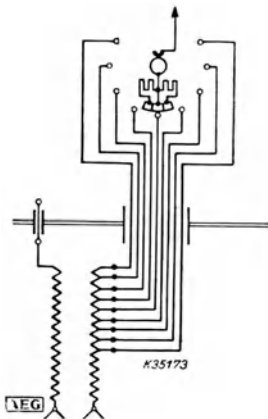


Bild 126. Lastwähler.
Schaltplan einer Phase

Kraftlinien aus dem kurzgeschlossenen Wicklungsteil auf Streukerne abgedrängt, so daß kein Kurzschlußstrom entstehen kann. Die Regelkontakte können demnach in jeder beliebigen Stellung angehalten werden, die bekannten Übergangshilfswiderstände, Mittelstellungs- und Sprungkontakte sind vermieden. Der Antriebsmotor für eine Fernsteuerung oder Automatisierung mittels Spannungswächter ist durch Zahnräder oder Kettenantriebe mit den Gleitkontakten verbunden. Die Bilder 129 bis 132 zeigen eine Anzahl drei- und sechsphasiger Grundschaltungen, wie sie für Gleichrichteranlagen häufig zur Anwendung kommen. Auch werden nach Bild 130 b zwei Transformatoren im Regelstromkreis benutzt

Durch die Verstellung der erkenntlichen Schaltstufen wird dem Transformator *ZTr* vom Transformator *StTr* eine veränderliche Spannung geliefert. Mit den Sekundärwicklungen des Transformators *ZTr* sind die Anodenzuführungsleitungen in Reihe geschaltet. Im Gegensatz hierzu zeigt Bild 129/6 einen Nullpunkttransformator *c*, dessen Wicklungen in den geöffneten Nullpunkt der Sekundärseite eines Sechspannenspanners gelegt sind. Nach den Anordnungen Bild 129 und 130 b lassen sich mit einem Regelschalter und einer Regelbahn die Spannungen von beliebig vielen Wicklungsgruppen erhöhen oder erniedrigen. Im Bild 130 a ist die Anwendung von Drehtransformatoren im Hauptanodenstromkreis dargestellt.

1. Die Gitterregulierung. Bild 131 B zeigt die Prinzipschaltung der Gitterregulierung. Die einzelnen Systeme der Gitterregelschaltung sind im Abschnitt 11 erläutert. Im Bild 132 ist eine Gitterschaltung für zwei Gleichrichtergefäße erkenntlich. In beiden Schaltungen ist nur ein Drehregler sichtbar. Nach dem Schrifttum lassen sich mit einem Regler beliebig viel Gleichrichtergefäße regeln¹⁾. Für besondere Verwendungsgebiete

¹⁾ Bild 268.

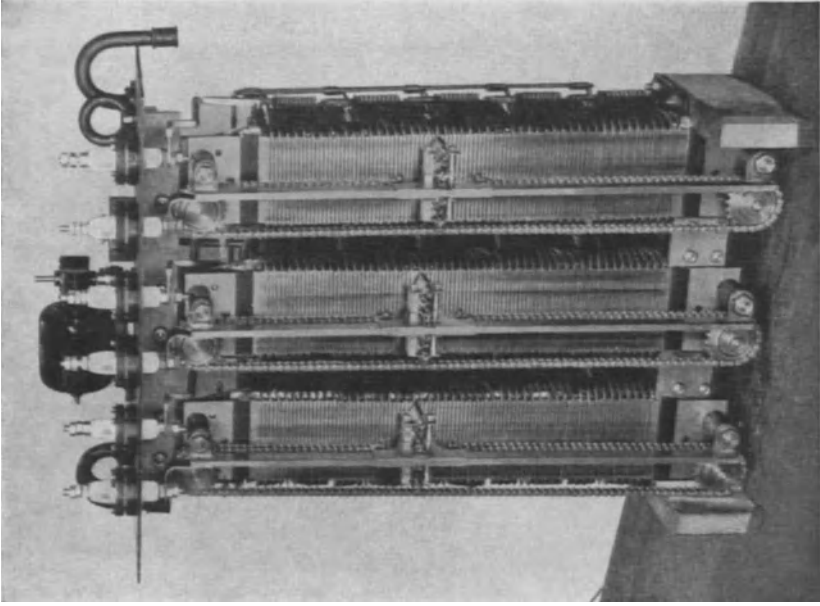


Bild 128. Feinstufiger Niederspannungsregeltransformator (J. Pintsch)

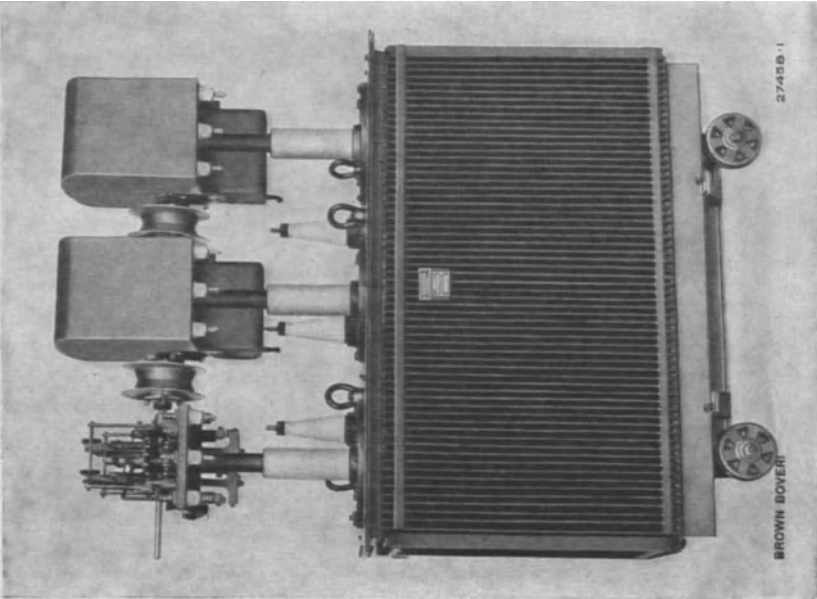


Bild 127. Reguliertransformator mit Lastwähler für Eisengleichrichter

wird jedem Gefäß ein Drehregler zugeordnet. Die Belastung mehrerer parallel arbeitender Gleichrichter läßt sich durch Verstellen der Drehregler auf gleiche Belastung einstellen. Größere Anlagen werden auch mit Summendrehreglern ausgeführt. Hierbei dient ein Hauptregler zum Regulieren der gesamten Anlage. Ferner ist jedem Gleichrichter ein Drehregler zugeordnet zum genauen Einstellen der Lastaufnahme eines jeden einzelnen Gleichrichters¹⁾. Die Herstellerfirmen verwenden für die Gitterkreise hochohmige Begrenzungswiderstände, damit der Gitterstrom einen festgelegten Grenzwert nicht übersteigt. Dieser beträgt je nach der Größe der Gleichrichter 50 bis 200 mA. Die Bemessung der Höhe der Gitterspannungen erfolgt

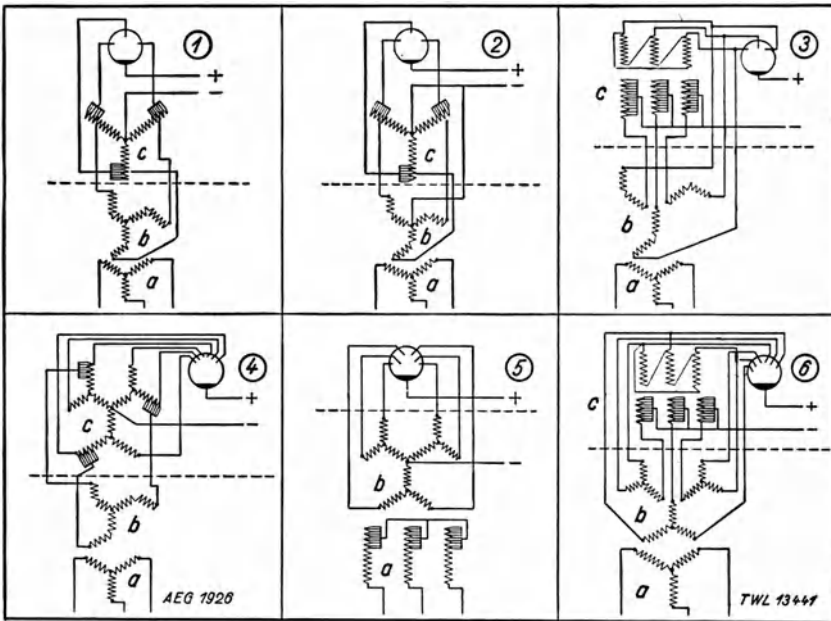
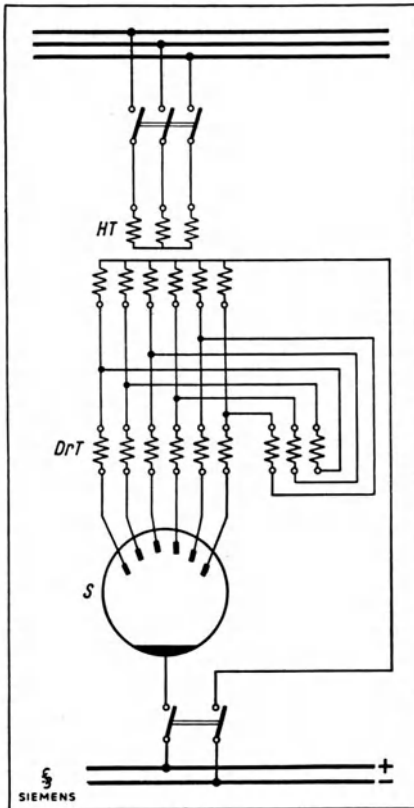


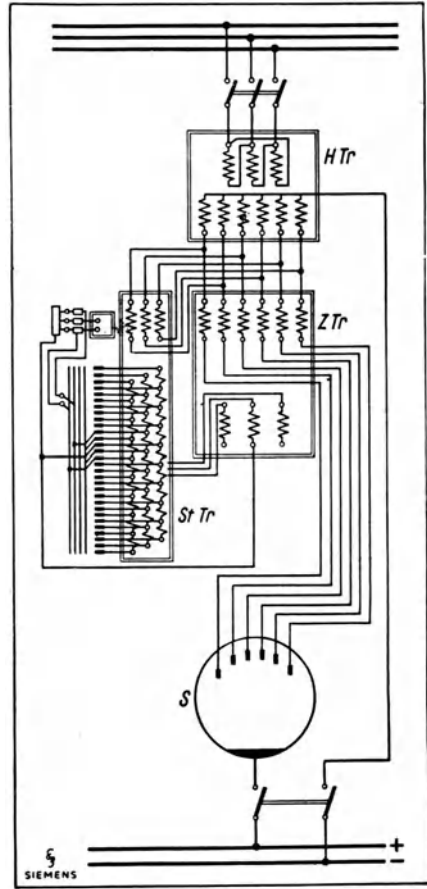
Bild 120. Prinzipschaltungen der gebräuchlichen Regulierungen

nicht nach einheitlichen Richtlinien. Sie hängt von der Gitterform ab, der Höhe der gesteuerten Gleichspannung und der Kurvenform der Gitterspannung. Theoretisch genügt bei einer kritischen Zündspannung von -10 V eine Sperrspannung von etwas mehr als 10 V , um den Zündensatz der Anodenströme zu verhindern. Doch die Gitterspannung wird größer gewählt, um eine sichere Sperrung zu erreichen. Die Höhe der effektiven Gitterspannung schwankt zwischen 30 und 70% der höchsten erzeugten Gleichspannung. Eine allzu hohe Gitterspannung kann von Nachteil sein. Während der Sperrphase fließt ein Gitterstrom von der Kathode

¹⁾ L. Lebrecht u. A. Partzsch, Zwei Großgleichrichteranlagen für 64000 kW und 33000 kW. AEG.-Mitt., Febr. 1939.



a



b

Bild 130.

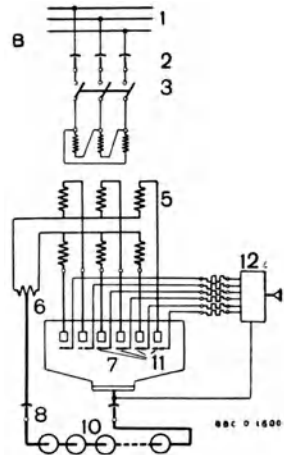
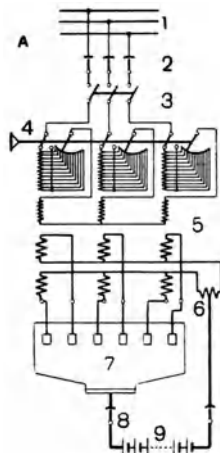
a = Spannungsregelanordnung mit Drehtransformator (*DrT*) im Hauptanodenkreis,
 b = ein Einbahnregelschlitten zum gleichzeitigen Regeln von sechs Phasenspannungen.

Bild 131.

Spannungsregelung einer Gleichrichteranlage (BBC.)

A durch Regeltransformator,
 B durch Gittersteuerung.

- 1 = Drehstromsammel-
- schienen,
- 2 = Trennschalter,
- 3 = Ölschalter,
- 4 = Stufenschalter,
- 5 = Gleichrichter-
- transformator,
- 6 = Saugdrossel,
- 7 = Gleichrichter,
- 8 = Gleichstromschalter,
- 9 = Bäder für wässrige
- Elektrolyse,
- 10 = Öfen für Schmelz-
- elektrolyse,
- 11 = Steuergitter,
- 12 = Gittersteuer-
- einrichtung.



nach dem Steuergitter, wobei das Gittermaterial je nach der Größe des Stromes, also nach der Höhe der Gitterspannung, mehr oder weniger zerstäubt wird. Die Größe der Gitterzerstäubung hängt außerdem vom gewählten Material ab. Am günstigsten erscheinen Steuergitter aus Graphit, Wolfram oder Molybdän. Auch haben sich Gitter aus Nickelblech gut

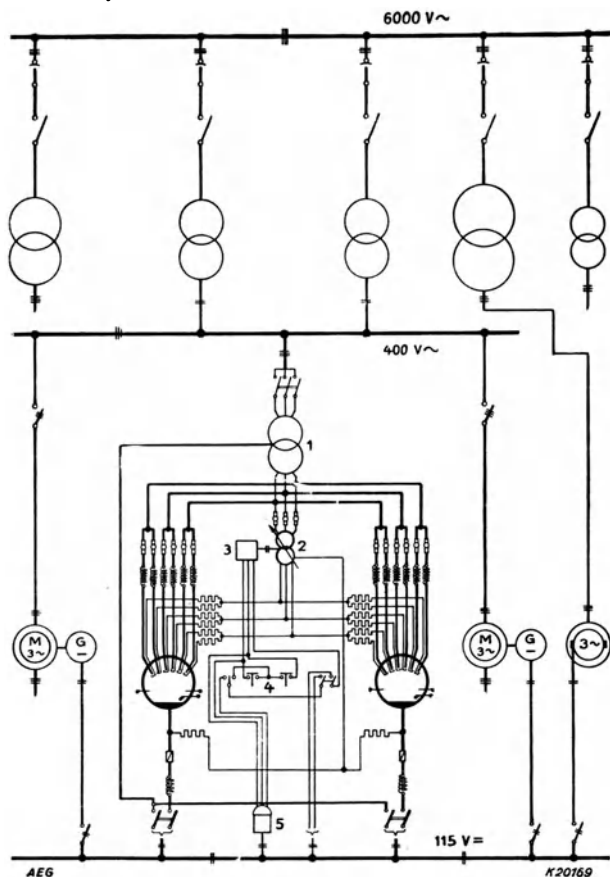


Bild 132. Schaltung der Gleichrichter mit parallel arbeitenden umlaufenden Umformern (AEG.)
 1 - Zwischentransformator, 2 = Drehtransformator für die Gitterregulierung, 3 -- Antrieb für den Drehtransformator, 4 - Druckknöpfe für Handbetätigung, 5 = Spannungsrelais

bewährt, denn Nickel läßt sich leicht entgasen und zerstäubt verhältnismäßig wenig. Während der Brennperiode ist die Spannung vom Gitter gegen Kathode gemessen nicht höher als der Lichtbogenabfall von 10 bis 25 V. Bei diesen kleinen Spannungen findet praktisch keine Zerstäubung des Gittermaterials statt. Demnach erscheint für eine gute Lebensdauer der Steuergitter die richtige Auswahl des Gittermaterials und die Vermeidung allzu hoher Gitterströme während der Sperrzeit von großer Bedeutung.

e) Die Konstruktion der Eisenstromrichter mit Vakuumpumpen und Wasserkühlung

Zum besseren Verständnis der bis heute entwickelten Hochstrom-Eisen-
gleichrichter erscheint es wertvoll, eine alte Konstruktion wiederzugeben,

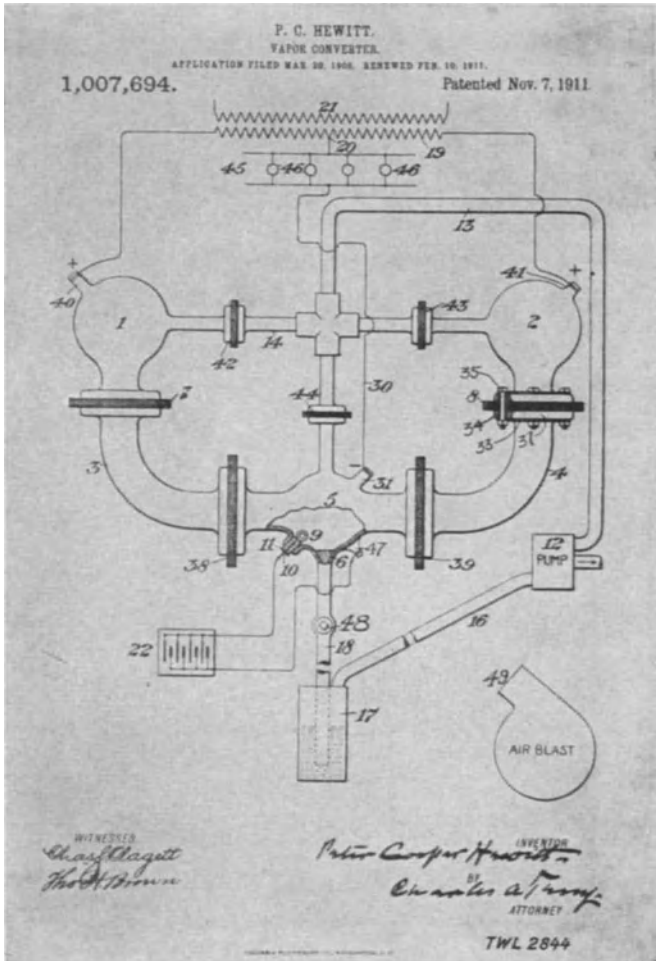


Bild 133. Ein Eisengleichrichter von P. C. Hewitt aus dem Baujahr 1911

um den inzwischen gemachten Fortschritt besser erkennen zu können. Bild 133 zeigt einen Eisengleichrichter von P. C. Hewitt aus dem Jahre 1911¹⁾. Bei diesem ist die Kühlkammer fortgelassen. Der Quecksilberdampf wird durch verhältnismäßig dünne Röhre geführt. Im Laufe der Jahre ent-

¹⁾ Chr. Krämer, AEG.-Sonderdruck, Jan. 1924. Vortrag T. H. Berlin, 26. Nov. 1923.

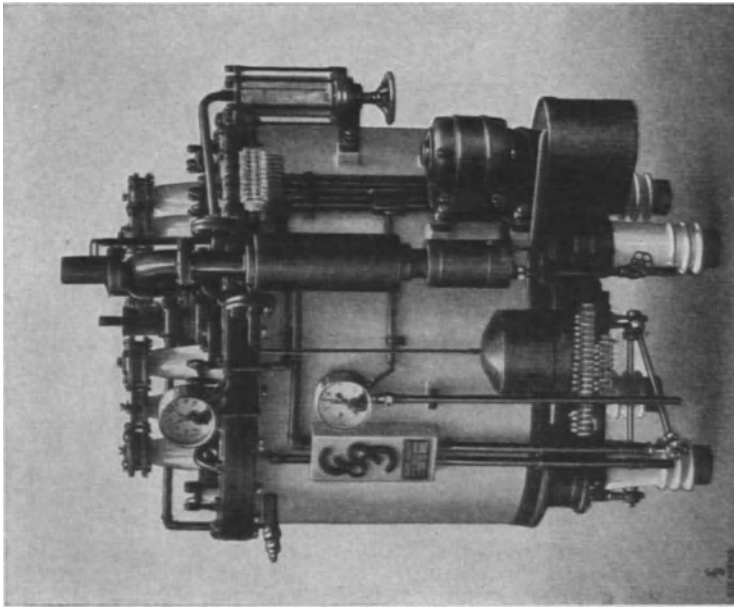


Bild 134. Ein Hochspannungseisengeleicher für 1000 kW und 25000 V mit Gummidichtungen (SSW.)

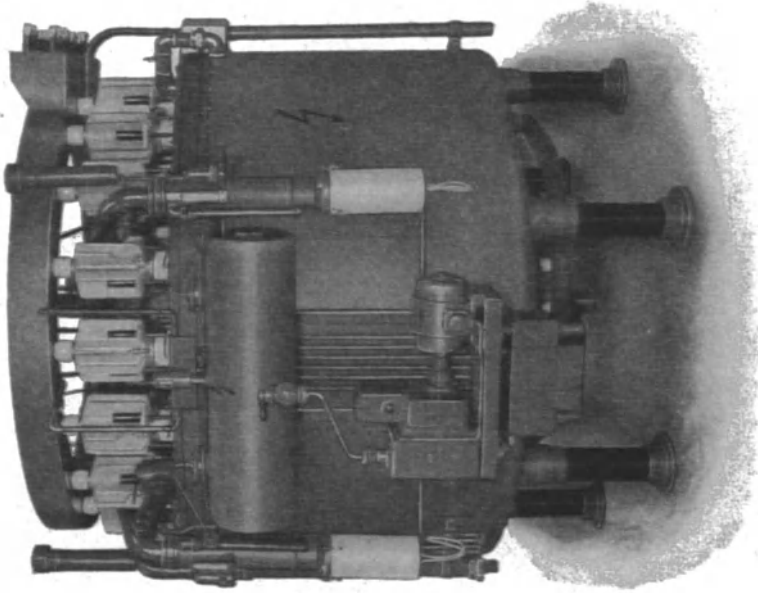


Bild 135. Eisengeleicher 2500 A, 1200 V mit doppelter Hochvakuumtreppe, einer Grobgruppe und Vorvakuumbehälter (ASEA.)

standen durch mühsame Forschung und unterstützt von zahlreichen wichtigen Erfindungsgedanken aus dieser Anfangsausführung die in den Bildern 92 bis 99, 134 bis 140 dargestellten neuesten Konstruktionen. Die Entwicklung wurde besonders durch die Rückzündungen erschwert, doch im Laufe der Zeit erkannte man ihre Ursachen. Seit etlichen Jahren bestehen in der Gleichrichtertechnik durch gelegentlich auftretende Rückzündungen keine schädlichen Auswirkungen mehr.

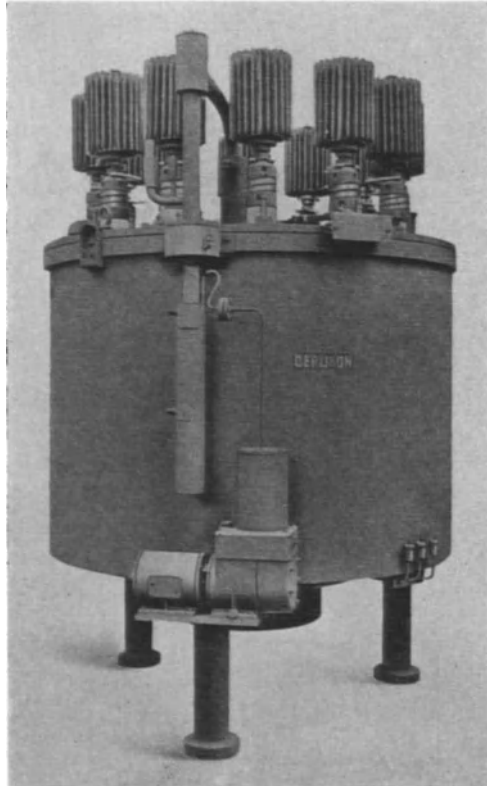


Bild 136. Ein größerer Eisengleichrichter mit vorn erkenntlichem Vakuumpumpensatz

- Im allgemeinen werden heute folgende Bauteile zu einer Einheit vereinigt
1. Das Vakuumgefäß mit den eingebauten Anoden, Zünd- und Erregeranoden sowie der Kathode.
 2. Der Innenkühler oder Kühlraum.
 3. Der Kühlwasserbehälter, in den das Vakuumgefäß gesetzt wird.
 4. Die Hochvakuumpumpe (Feinpumpe). Diese befindet sich wohl immer im oberen Teil des Gleichrichters, weil die Fremdgase zweckmäßig an der höchsten Stelle des Gefäßes abgesaugt werden.

5. Die Vorvakuumpumpe. Sie ist im allgemeinen als rotierende Pumpe ausgebildet, die durch einen Motor angetrieben wird. Beide Teile sind am Fuß der Stromrichter befestigt.
6. Der Zwischen- oder Vorvakuumbehälter. Dieser wird von der AEG. in einem der Tragfüße des Stromrichtergefäßes vorgesehen. Andere Firmen bilden das Saugrohr zwischen Hochvakuum- und Vorvakuumpumpe stärker aus, um einen Vorvakuumraum zu schaffen.
7. Sämtliche Rohre für den Kühlwasserumlauf zum fertigen Anschluß an die Kühlwasserleitung des Erstellungsortes mit Hilfe isolierender Wasserleitungen (Gummischläuche).

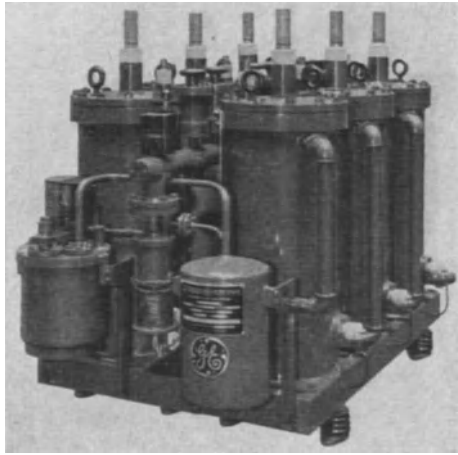


Bild 137. Ein wassergekühlter Eisengleichrichter, bestehend aus sechs einanodigen Gefäßen mit gemeinsamem Vakuumpumpensatz (GEC., USA.)

8. Vakuummeßanordnung (elektrische Fernmessungen oder Handmeßapparate).

Sämtliche übrigen Bauteile, wie Meßinstrumente, Schaltapparate, Vakuummeßinstrumente, Hilfstransformatoren, Erregerdrosselspulen und Gitterregel-Einbauteile, werden im allgemeinen getrennt vom Gleichrichter angeordnet. Wie die Bilder am Schluß des Buches zeigen, sind hierzu besondere Schalttafeln vorgesehen. Je nach der Größe der Stromrichteranlagen müssen ein oder mehrere Schaltfelder zur Unterbringung dieser Bauteile vorgesehen werden. Die Schnellschalter werden an einem passenden Platz auf dem Leitungswege der Gleichstrom-Sammelschienen angeordnet. Hierzu wird bei vorhandenen Kellerräumen häufig ein Platz unmittelbar unter dem Gleichrichter gewählt. Die Kühlung sowie die Art der Rückkühleranlagen sind im letzten Abschnitt erläutert. Auch sind dort Schaltungen handbedienter und selbsttätiger Gleichrichterwerke angegeben. Die

klargezeichneten Abbildungen der einzelnen Herstellerfirmen erübrigen eine weitere Beschreibung. Aus Bild 139 geht hervor, daß für die Reinigung der Wasserkühlbehälter am Standort oder in der Nähe desselben eine ausreichende Raumhöhe vorhanden sein muß. Im allgemeinen haben Eisengleichrichter Transportrollen. Die genauere Betrachtung der einzelnen Konstruktionselemente läßt erkennen, daß im heutigen Stromrichterbau gewisse einheitliche Richtungen vorhanden sind.

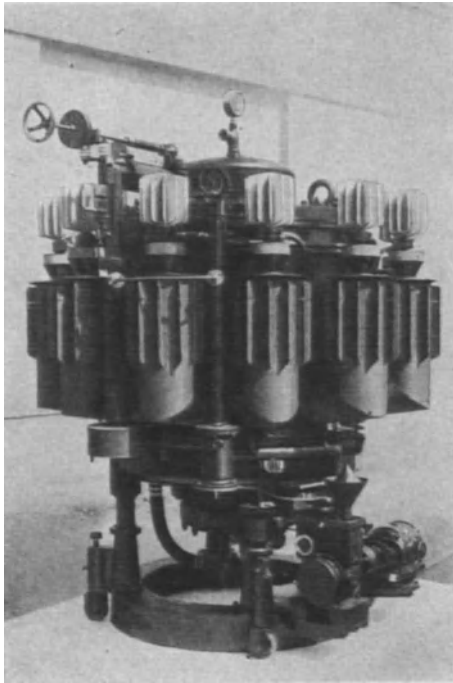


Bild 138. Ein Eisengleichrichter für 3000 A mit außersitzenden Lichtbogenführungen
(Kolben Dauek, Prag)

1. *Die Anodenschutzrohre und Führungsbleche.* Aus den Querschnittszeichnungen der Bilder 92 bis 99 geht hervor, daß in den Vakuumgefäßen Anodenschutzrohre und Führungsbleche für den Hg-Dampf sowie für die zurücklaufenden Hg-Tropfen angeordnet sind, die aus Eisenblech hergestellt werden. Im unteren Teil der isoliert vom Eisengefäß angeordneten Anodenschutzrohre befinden sich die Anoden vorgelagerte Entionisierungsgitter. Diese erfassen den Lichtbogen im vollen Querschnitt und sind den Steuergittern ähnlich. In Verbindung mit den Schutzrohren erzeugen sie eine entionisierende Wirkung und verhindern, daß während der Sperrzeit eine Rückzündung entsteht. Außerdem bilden die Schutzrohre zugleich einen

gekrümmten Weg für die Entladungsbahn. Die isolierte Anordnung des Anodenschutzrohres in Verbindung mit Entionisierungsgittern hat neben einer Verbesserung der Kühlung wesentlich dazu beigetragen, Rückzündungen in Eisengleichrichtern zu verhindern.

2. *Die Steuergitter.* Die Entionisierungsgitter sind für ungesteuerte Stromrichter eng- oder weitmaschig ausgeführt und lassen sich auch als Steuer-

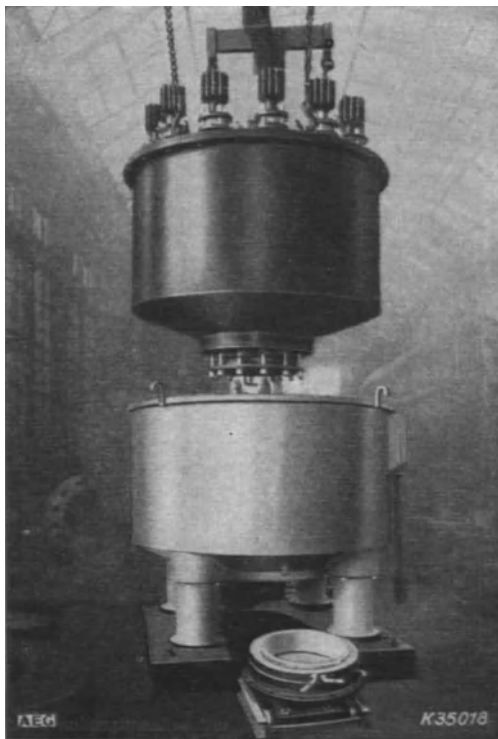


Bild 139a. Großstromrichter mit ausgefahrner Kathode und herausgehobenem Vakuumgefäß

gitter verwenden. Nach der Darstellung Bild 99 wird z. B. das Schutzrohr und Steuergitter gleichzeitig zum Entionisieren und Regeln der Ströme benutzt. Andere Ausführungen zeigen außer dem Entionisierungsgitter¹⁾ noch besondere Steuergitter, die den Anoden unmittelbar zugeordnet sind. Für die Gitter werden nach Bild 18 und 139 konzentrisch um den Anodenbolzen, jedoch von diesem isoliert angeordnete Gitterzuführungen verwendet, auch erhalten sie besondere Zuführungsstromleiter, Bild 95, die

¹⁾ L. Lebrecht, AEG.-Mitt. 1934, H. 1 u. 2.

neben der Hauptanode sitzen. Die Steuergitter bestehen aus Metall oder aus entsprechend durchbohrten Graphitscheiben. Mit Hilfe der Steuergitter lassen sich Eisenstromrichter für die im Abschnitt 11 erläuterten Schaltungen verwenden. Bild 140 zeigt einen genaueren Schnitt durch einen Eisenstromrichter.

3. *Die Kathoden.* Es ist heute Allgemeingut der Technik geworden, die Kathodenbecken isoliert vom Eisengehäuse zu dichten und zu befestigen.

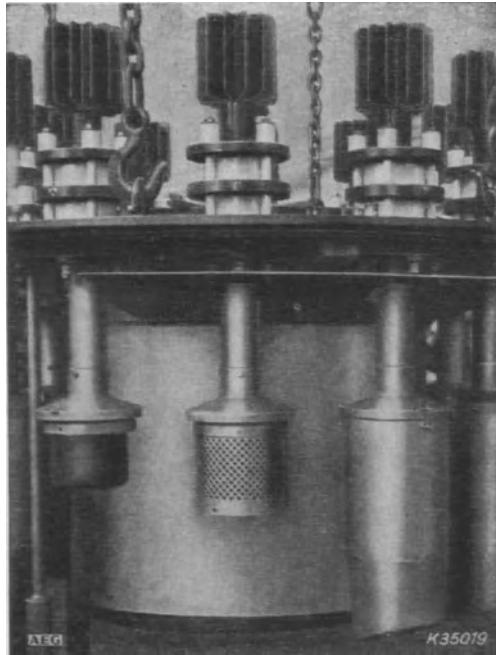


Bild 139b. Großstromrichter mit Gitteranoden in verschiedenen Zuständen des Zusammenbaues

In den Bildern 92 bis 99 sind Einsatzringe erkenntlich, die aus keramischem Material, meistens aus Quarz oder Sipa bestehen. Sie haben den Zweck, die im Lichtbogenansatz (Kathodenfleck) entstehende Temperatur von den übrigen Bauteilen fernzuhalten. Das an den Wänden kondensierte Quecksilber soll an der Seite dieser Einsatzringe in das untere Becken zurücklaufen. Einige Firmen sehen in den Ecken dieser Ringe auch Reinigungsflächen vor, damit der von den Eisenwänden mitgerissene Schmutz nicht in das Kathodenquecksilber gelangt. Für die Isolierung der Metallkathodenbecken vom Eisengehäuse werden geradgeschliffene Porzellanringe oder auch innen emaillierte Eisenringe verwendet. Im allgemeinen werden die

Flächen bei wassergekühlten Gleichrichtern mit Preßdichtungen (Gummi) gedichtet. Die Kathodenbecken werden auch aus einem geschlossenen, keramischen Körper gebildet.

4. Die Vakuumpumpen. Die Evakuierereinrichtungen größerer Eisengleichrichter bestehen aus Hochvakuumpumpe und Vorpumpe. Ersterer wird mit Feinpumpe bezeichnet. Ihre Ausführung entspricht den in den Laboratorien bekannten Quecksilberstrahl- oder Diffusionspumpen¹⁾. Die Vorpumpe

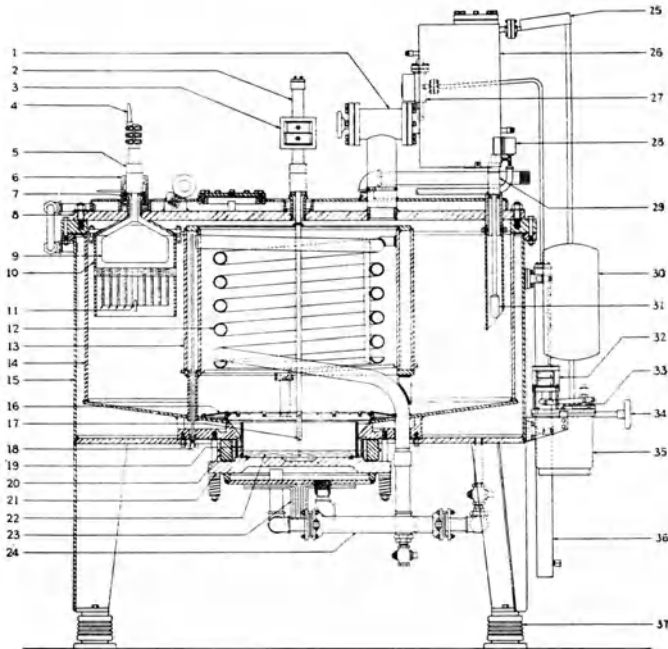


Bild 140. Schnitt durch einen Eisengleichrichter der GEC. (USA.), vgl. Bild 20 und 93
 2, 3, 17 = Zündung, 29, 31 = Erregung, 5—11 = Hauptanode, 18—23 = Kathode,
 12, 15, 24 = Wasserkühlung, 1, 25, 30, 34, 35 = Vakuumhaltung

wird auch mit Grobpumpe bezeichnet. Bild 141 zeigt das Schema der Vakuumhaltung eines größeren Gleichrichters. Auch sind Anlagen erstellt worden, in denen eine Evakuierereinrichtung für zwei Gefäße vorgesehen wurde²⁾, ferner ist versucht worden, für kleinere Gleichrichter mit einer Pumpe auszukommen, wie sie von *Leybold* und *Arthur Pfeiffer* für die Fabrikation von Hochvakuumröhren hergestellt werden. Diese in den letzten Jahren entwickelten rotierenden Pumpen erzeugen ohne Vorpumpe ein Vakuum von 0,0001 bis 0,001 Torr und haben eine Saugleistung bis zu

¹⁾ *Gaede*, Zeitschr. f. techn. Phys. 1923.

²⁾ Vgl. Bild 137.

25 m³ in der Stunde. Für größere Stromrichter wird eine Saugleistung von 100 m³ pro Stunde und darüber verlangt, daher ist für diese der Doppelpumpensatz unerlässlich, um einen rückzündungsfreien Betrieb sicherzustellen. Die Hochvakuumpumpe wird ein-, zwei- oder dreistufig ausgeführt. Bild 142 zeigt den Schnitt durch eine dreistufige Pumpe. Diese hat im unteren Teil einen bestimmten Hg-Vorrat, der durch elektrische Widerstands- oder Wirbelstromheizung mit Hilfe eines kleinen Heizumspanners ¹⁾

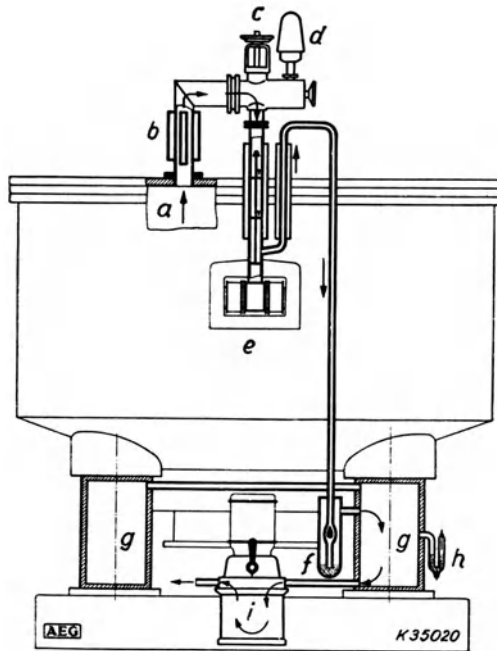


Bild 141. Anordnung der Vakuumhaltung eines Großstromrichters

a = Hochvakuumgefäß, *b* Absaugrohr mit Kühlmantel, *c* - Hauptventil, *d* = Vakuummeßlampe, *e* = Dreistufige Quecksilberdampfdiffusionspumpe (Hochvakuumpumpe), *f* = Rückschlagventil, *g* = Zwischenvakuumbehälter, *h* = Kontaktmanometer, *i* = Umlaufende Pumpe

zum Verdampfen gebracht wird. Der nach oben strömende Hg-Dampf ändert in den Düsen 1—2—3 seinen Weg. Nach der Umkehrung gelangt der Hg-Dampf gegen die mit Wasser gekühlten Wände und kondensiert. Bei den Strahlpumpen werden die Gasteile durch den entstehenden Unterdruck mitgerissen, ähnlich den Wasserinjektionspumpen. Doch bei den Diffusionspumpen diffundieren die Gasteile in den strömenden Hg-Dampf und werden auf diese Weise abgesaugt ²⁾. In den mehrstufigen Pumpen

¹⁾ AEG.-Sonderdruck, K 2, 1107, März 1934.

²⁾ S. Dushman, Die Grundlagen der Hochvakuumtechnik; G. Berthold, E. Reimann. Berlin, Jul. Springer, 1926.

sind Diffusions- und Strahlpumpen hintereinander geschaltet. Einstufige Pumpen werden je nach der Pumpleistung als Strahl- oder Diffusionspumpe gebaut. Die letzteren haben zwar eine geringere Saugleistung, sie können jedoch eine größere Luftleere erzeugen. Daher ergibt sich die Anwendung der beiden Pumpenarten durch die gestellte Aufgabe.

Die abgesaugten Fremdgas gelangen nach der Vorvakuumpumpe oder dem Vorvakuumraum. Der Druck in den Zwischenvakuumräumen oder Rohren beträgt etwa 0,02 Torr. Sobald dieser Druck stärker ansteigt, muß die

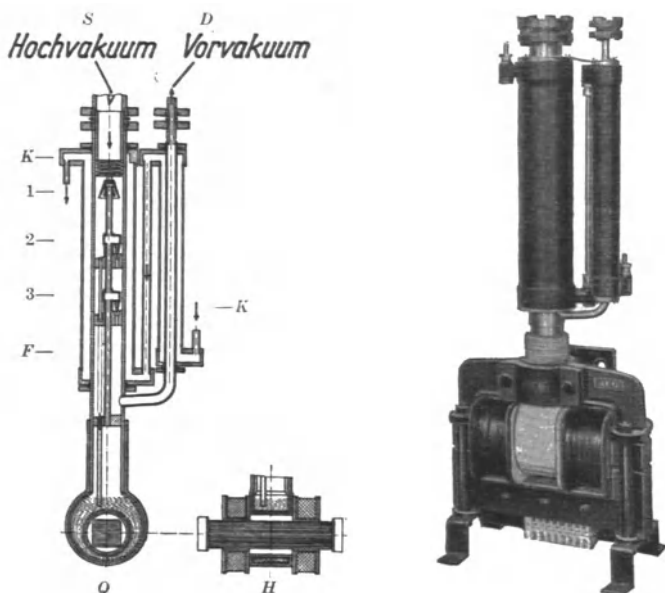


Bild 142a. Hochvakuumpumpe (Quecksilberdampfstrahlpumpe) (A.E.G.)
D = Druckstutzen, *H* = Heizvorrichtung, *K* = Kühlmantel, *Q* = Quecksilberbehälter,
S = Saugstutzen, *F* = Fallrohr

Vorvakuumpumpe in Tätigkeit gesetzt werden, um den Vorvakuumraum zu entleeren.

Eine Vorvakuumpumpe ist im Bild 142b im Schnitt dargestellt. Am häufigsten werden durch einen Motor angetriebene umlaufende Schieberölpumpen verwendet, deren Funktion als bekannt vorausgesetzt werden kann. Sie saugen die Gase aus dem Vorvakuumraum oder aus dem Verbindungsrohr zwischen Hochvakuum und Vorvakuumpumpe an und drücken sie in die freie Atmosphäre. Um zu verhindern, daß Quecksilber aus dem Gleichrichtergefäß abgesaugt wird, erhält das Hochvakuumsaugrohr einen von Kühlwasser umflossenen Kühlmantel *b* Bild 141. Der mitgerissene Hg-Dampf kondensiert in diesem Zuleitungsrohr und läuft in Tropfenform nach der Kathode zurück. Demnach werden nur Fremdgas

aus dem Eisengefaß abgesaugt und keine Hg-Dämpfe. Sobald die Vorvakuumpumpe außer Betrieb genommen wird, muß das Verbindungsrohr nach der Hochvakuumpumpe vakuumdicht gesperrt werden, damit durch den

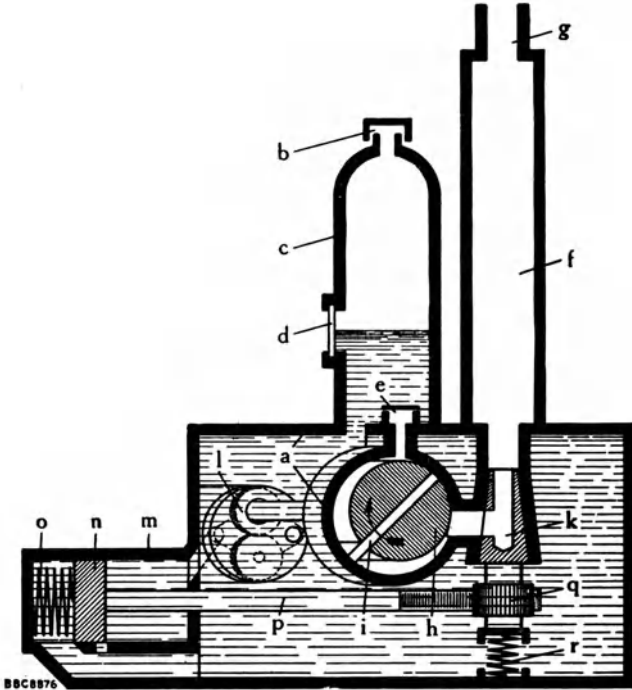


Bild 142b. Vorvakuumpumpe mit selbsttätigem Vakuumabschlußschieber (BBC.)
a = Pumpengehäuse, *b* = Auspuffdom, *c* = Auspuffkamin, *d* = Schauglas, *e* = Ventil,
f = Ölfänger, *g* = Vorvakuumleitung, *h* = Rotor, *i* = Schieber, *k* = Drehschieber,
l = Zahnradölpumpe, *m* = Steuerzylinder, *n* = Kolben, *o* = Rückführungsfeder,
p = Kolbenstange mit Verzahnung, *q* = Zahnritzel, *r* = Ausgleichsfeder

Außendruck der Luft kein Öl oder Fremdgas in das Gleichrichtergerätfäß gelangt. Zu diesem Zweck werden nach Bild 141 hand- oder selbsttätig bediente Abschlußschieber, Rückschlagventile oder Hähne verwendet. Das Hauptventil *c* wird bei Überholungsarbeiten der Feinpumpe von Hand geschlossen. Die AEG. hat für die Automatisierung eine Vakuumpumpe entwickelt, deren Motorgehäuse beim Anlaufen eine Vierteldrehung ausführt und hierbei einen Hahn öffnet. Bei abgestelltem Motor zieht eine Feder die Achse

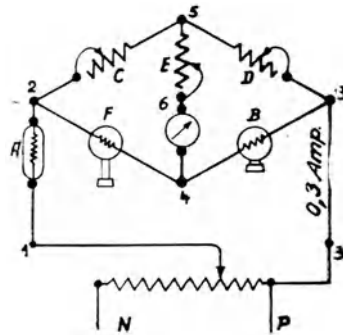


Bild 143.
F - B = Meßwiderstände im Vakuumgefäß, *C - D* = Außenwiderstände, *G* = Meßgerät, *A* = Vorwiderstand

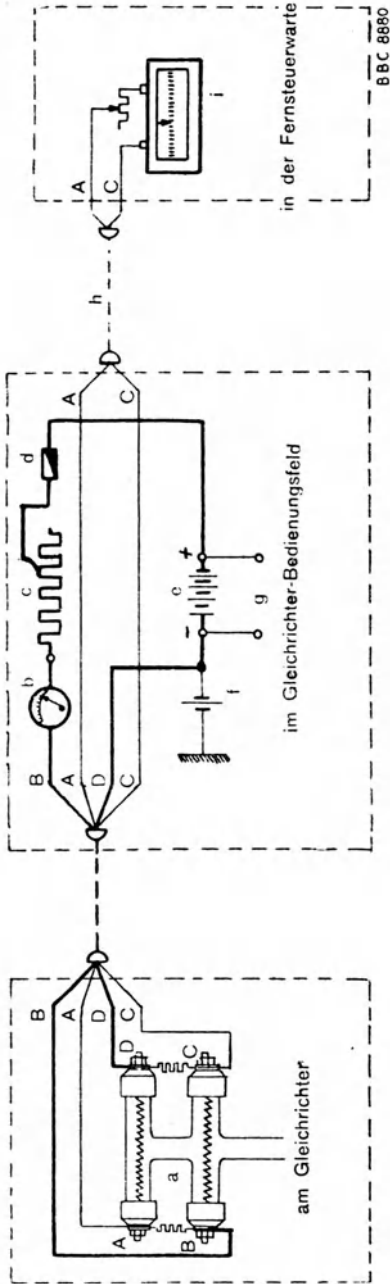


Bild 144. Schaltung der Vakuumfernmessung

a - Heizdrahtvakuummeter, b - Amperemeter für Heizstrom, c = Einstellwiderstand für Heizstrom, d - Sicherung, e - Batterie, f = Durchschlagsicherung, g - zur Ladeeinrichtung, h - Fernmeßkabel zwischen Gleichrichterwerk und Warte, i - Vakuummeßinstrument

um 90° zurück, wobei der Hahn wieder geschlossen wird. Von BBC. und anderen Firmen werden selbsttätige Abschlußschieber hergestellt. Bild 142 zeigt einen Drehschieber *k*, der beim Anlaufen des Motors gedreht wird und den Pumpweg freigibt, um ihn bei stillstehendem Motor wieder zu schließen.

5. Die Vakuummeßeinrichtung.

Die Vakuummeßeinrichtung soll nur die Fremdgase anzeigen. Daher wird sie in unmittelbare Nähe des Saugrohres, Bild 141, gesetzt. Für die selbsttätige Vakuum-Fernmeßeinrichtung wird eine Widerstandsbrückenschaltung verwendet. Es hat sich gezeigt, daß ein im Vakuumgefäß angeordneter Heizdraht seinen Widerstand mit dem Gasdruck ändert. Wenn demnach außen am Gleichrichter eine Brücken-anordnung nach Bild 143 befestigt wird und im Innern des Gefäßes ein Heizdraht, der ein Viertel dieser Brücke bildet, so zeigt ein Millivoltmeter jede Veränderung des Widerstandes eines Brücken-zweiges an, wobei vorausgesetzt ist, daß die außersitzenden Widerstandskörper ihren Widerstandswert nicht ändern. Das Meßinstrument wird auf der Bedienungs-tafel angeordnet. Es kann auch mit Kontakten ausgerüstet werden, die bei schlechtem Vakuum einen

Stromkreis schließen, der zur Signalisierung dient oder die Hochvakuum-
pumpe in Tätigkeit setzt. Die von den einzelnen Firmen verwendeten
Heizfäden bestehen aus Platin oder Wolframdrähten. Gut geeignet sind
Metalle mit hohem Temperaturkoeffizienten. Bild 144 zeigt die Schaltung
einer Vakuumfernüberwachung. Von der vierteiligen Brücke sind zwei
Widerstandskörper im Vakuumgefäß und zwei außerhalb befestigt. Der
Vakuumbestand läßt sich in der Fernsteuerwarte am Instrument kon-
trollieren. Diese Instrumente zeigen sowohl den Druck der Fremd-
gase als auch den Hg-Dampfdruck an, in den vom Kühlwasser umflossenen
Saugrohren wird jedoch der Hg-Dampf kondensiert, so daß praktisch nur der Fremd-
gasdruck gemessen wird.

Die handbedienten Vakuummeßeinrichtungen nach *McLeod*, Bild 145, bestehen aus einem Barometer-
rohr *B*, das oben einen Abzweig *D* hat. Dieses taucht am unteren Ende in ein mit Hg gefülltes Gefäß *Q* ein.
Die Verlängerung *R* ist oben geschlossen und kugelig erweitert. Rohr *D* steht mit dem Gleichrichtergefäß
in Verbindung. Infolge des Vakuums steht das Hg im Barometerrohr *B* um die Barometerhöhe *h* höher als
im offenen Gefäß. Sobald dieses gehoben wird, steigt das Hg im Barometerrohr um den angehobenen Betrag.
Dabei wird das blinde Rohr *R* abgeschnürt und die in ihm enthaltene Gasmenge zusammengedrückt. Der
Hg-Spiegel wird daher in diesem nicht so hoch ansteigen können wie in dem Rohrstück *D*. Der Unter-
schied zwischen den beiden gibt ein Maß für die Güte des Vakuums. Das Heben des Behälters *Q* geschieht
durch einen Handhebel. Der im Rohrstutzen *R* vorhandene Hg-Dampfdruck wird jedoch mitgemessen,
daher soll vor dem Ablesen eine gewisse Zeit gewartet werden, damit der Hg-Dampf kondensieren kann. Es sind Anlagen erstellt worden, in denen
beide Meßvorrichtungen vorhanden sind.

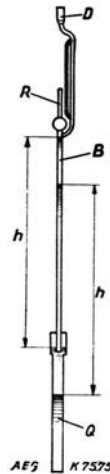


Bild 145. *Mac Leodsches*
Vakuummeßinstrument
B - Barometerrohr,
D - zum Gleichrichter,
Q - offenes Gefäß,
R - blindes Ende,
h : barometr. Höhe.

6. *Das Ausheizen der Vakuumgefäße und die Prüfung des Vakuums.* Nach
Fertigstellung der Eisengefäße mit den einzelnen Bauteilen erfolgt eine
Dichtigkeitsprüfung. Vor der Inbetriebsetzung muß ein Eisengefäß in
gleicher Weise wie Glasgefäße ausgeheizt werden. Um diesen Prozeß zu er-
leichtern, wird beim Zusammensetzen der einzelnen Bauteile mit größter
Sauberkeit gearbeitet. Daher haben die Monteure in den Gleichrichter-
werkstätten Handschuhe. Die kleinsten Handschweißreste können das Aus-
heizen erschweren. Die Graphitanoden werden vor dem Einsetzen unter
Abschluß der Luft bei hohen Temperaturen viele Stunden hindurch erhitzt,

um möglichst viele Fremdkörper aus ihnen zu entfernen. Eine weitere Reinigung und Austreibung der Fremdkörper aus sämtlichen Einbauteilen und Gefäßwänden erfolgt bei abgeschlossenem Gefäß durch das Absaugen der freigewordenen Gase mit den Vakuumpumpen. Fremdgase werden am besten von erwärmten Körpern abgegeben, daher wird der Gleichrichter bei kleiner Spannung und großen Stromstärken in Betrieb genommen, um sämtliche Bauteile sinngemäß zu erwärmen. Die Fremdkörper werden hierbei in Gasform ausgetrieben und durch die Vakuumpumpen abgesaugt. Das Ausheizen und gleichzeitige Evakuieren erfordert je nach Größe der Gefäße eine Zeit von 24 Stunden bis zu einigen Tagen. Ein gut evakuiertes Gefäß hat einen Druck von weniger als 0,0002 Torr.

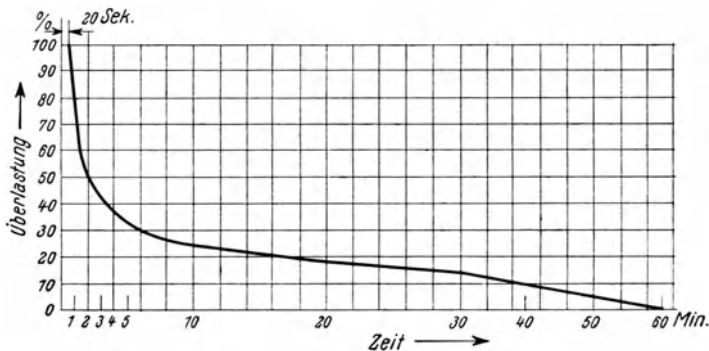


Bild 146. Zulässige Überlastung für Eisengleichrichter mit Wasserkühlung bis 4200 A Nennstrom

Nachdem das Vakuum hergestellt ist, erfolgt die Prüfung mit normaler Betriebsspannung und Stromstärke auf Rückzündungssicherheit. Eine vollkommene Dichtung wie bei pumpenlosen Gefäßen ist nicht bedingt, denn die fest angebauten Vakuumpumpen gestatten auch während des Betriebes ein Absaugen der später freiwerdenden oder eindringenden Fremdgase.

f) Die Überlastungsfähigkeit der Eisengleichrichter

Bei wassergekühlten Eisengleichrichtern sind die für die Praxis zugelassenen Überlastungswerte analog zu den luftgekühlten Glasgefäßen niedriger als die Grenzwerte der Ventilwirkung. So sind im Bild 146 die zulässigen Überlastungen für Eisengefäße angegeben. Sie entsprechen den vom VDE. herausgegebenen Richtlinien¹⁾ und sind anschließend an den Dauerbetrieb mit der Nennleistung zulässig. Die Kurve gilt nicht für mehrfach nacheinander erfolgende Überlastungen, wie sie beispielsweise in Bahnanlagen üblich sind, daher werden für diese von den Lieferfirmen den Betriebsverhältnissen angepaßte Werte angegeben. Es ist unmöglich, eine für alle

¹⁾ Regeln für Stromrichter 0555.

Überlastungsarten passende einheitliche Kurve zu schaffen, daher soll die Kurve nur als Richtlinie dienen, analog Bild 84.

g) Die Erhaltung der Luftleere, der mit Vakuumpumpen ausgerüsteten Eisengleichrichter

Die Bauweise der mit Schraubdichtungen und Wasserkühlung versehenen Eisengleichrichter macht zur Bedingung, daß die Gefäße von Zeit zu Zeit evakuiert werden müssen. Bei Großstromrichtern wird die Hochvakuumpumpe häufig dauernd in Betrieb gehalten, sie ist somit ein wichtiges Betriebsmittel¹⁾. Auch werden die Hauptumspanner mit Heizanzapfungen versehen, um bei kleinen Spannungen von 40 bis 50 V vor der Inbetriebnahme, nach längeren Betriebsunterbrechungen oder nach einer Überholung das Gefäß in gleicher Weise wie im Prüfraum der Lieferfirmen ausheizen und entgasen zu können. Zu diesem Zweck werden Ausheizbelastungswiderstände bereitgehalten. Die Gitterregulierung gestattet das Einstellen des Ausheizstromes auch ohne Widerstände bei kurzgeschlossenem Gleichstromkreis. Während der Betriebspausen behalten die Gleichrichter oft ihr Vakuum und können ohne Vorbereitung in Betrieb genommen werden. Andere erfordern je nach dem Grad der Dichtigkeit vor der Inbetriebnahme eine Evakuierung. Den besten Aufschluß gibt die Vakuummeßkontrolle.

h) Die Dichtigkeitsprüfung der Eisengleichrichter

Die Praxis hat bewiesen, daß genaue Angaben über die wirkliche Haltbarkeit der Luftleere kaum gemacht werden können. Für Glaskörper werden statistisch erfaßte Mittelwerte zugrunde gelegt und bei Eisengefäßen die Vakuumpumpen mehr oder weniger eingeschaltet. In neuerer Zeit sind für die Eisenstromrichter besondere Dichtigkeitsprüfverfahren entwickelt worden, um das Suchen auch sehr kleiner Undichtigkeiten zu ermöglichen²⁾. Man setzt das geschlossene Gefäß bzw. den zu prüfenden Teil desselben mit einem chemisch aktiven Gas unter Überdruck. Gleichzeitig wird die Außenfläche mit einem Reagens für das betreffende Gas versehen. Besonders geeignet ist Ammoniak und als Reagens eine Quecksilberverbindung. Das durch Ausströmen der Gase freiwerdende Quecksilber bildet an den Austrittsstellen auf einem Papier oder Stoff Farbflecke, die sich deutlich abheben. An Stelle von Papier und Tuch kann als Überzug ein Anstrich mit Mercuro-nitrat verwendet werden. In einer längeren Dauerprüfung lassen sich auch die allerfeinsten Poren im Gefäß feststellen; deren Beseitigung ist dann eine handwerksmäßige Maßnahme.

¹⁾ *Leidi*, Sul Collaudo dei Raddrizzatori, I. Elettrotecnica, Bd. 19, 1932. (Es wird der Vorschlag gemacht, die Vakuumhaltung als genügend zu betrachten, wenn die Vakuumpumpe nicht mehr als 25 % der Betriebszeit laufen muß.)

²⁾ *W. Dällenbach*, DRP. 503073 und 554038. (Von J. Pintsch angewendet.)

i) Die pumpenlosen Eisengleichrichter

Um einen pumpenlosen Eisengleichrichter herzustellen, muß eine Vakuumdichtung geschaffen werden, die bei allen auftretenden Betriebstemperaturen keinerlei Luft oder Gase durchläßt. Hierzu sind Preßdichtungen aus Gummi, Blei, Aluminium und auch Quecksilberdichtungen ungeeignet, da sich Schraubverbindungen bei häufigem Temperaturwechsel lockern. Auch können Dichtungseinlagen im Laufe der Zeit ermüden, so daß sie hin und wieder überholt, nachgearbeitet und erneuert werden müssen. Für eine auf viele Jahre hinaus abschließende Dichtung sind nur Verschmelzungen, Lötungen oder durch Sintern hergestellte Verbindungen zwischen einem isolierenden Stoff und Eisen verwendbar. Es sind besonders die im Abschnitt 2 aufgeführten Dichtungen bekanntgeworden. Die in diesen erkenntlichen Kappenränder werden mit dem eisernen Vakuumgefäß verschweißt. Diese Dichtungen gestatten in Verbindung mit der Dichtigkeitsprüfung eine zuverlässige Vakuumdichtung, so daß Vakuumpumpen überflüssig werden.

k) Die Vakuumerhaltung bei pumpenlosen Eisengefäßen während des Betriebes

Es ist in der Stromrichtertechnik bekannt, daß Vakuumgefäße durch mehrere Einflüsse eine Verschlechterung des Vakuums erleiden:

- a) Während des Betriebes werden aus den Elektroden ständig Fremdgase frei, deren Menge von der Güte der Ausheizung während der Entgasung abhängig ist. Je höher die Ausheiztemperatur getrieben werden kann, desto geringer ist die später im Betriebe freiwerdende Fremdgasmenge.
- b) Durch Undichtigkeiten der Glas- und Eisengefäße dringen Luftteilchen in das Gefäßinnere ein.
- c) Bei wassergekühlten Eisengleichrichtern diffundieren durch Eisenwände ionisierte Wasserstoffatome vom Kühlwasser nach dem Vakuumraum.

Durch die in den letzten Jahren entwickelten pumpenlosen Eisengleichrichter ist die Möglichkeit gegeben, die unter a bis c genannte Vakuumverschlechterung zu verhindern. Nach Abschnitt 8 findet eine Diffusion von ionisierten Wasserstoffatomen vom Vakuumraum nach außen statt, wenn das Gefäß mit Luft gekühlt wird; weil hierbei der Partialdruck des im Betriebe freiwerdenden und durch den Lichtbogen ionisierten Wasserstoffs im Gefäßinnern größer ist als in der umgebenden Luft. Die außer Wasserstoff noch freiwerdenden Fremdgase wie Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenoxyd und Kohlendioxyd gehen mit den Eisenwänden unlösliche Verbindungen ein, sie werden gewissermaßen aufgezehrt. Um zu klären, wie sich ein mit Luft oder einer wasserstofffreien Flüssigkeit gekühltes Gleichrichtergefäß über viele Jahre verhalten würde, sind in das Gefäß größere Mengen der praktisch vorkommenden Gase von außen eingeführt worden ¹⁾.

¹⁾ Dällenbach u. Gerecke, ETZ. 1934, H. 4. (Vgl. auch S. 98—100.)

Das Ergebnis war folgendes:

1. Sauerstoff und Wasserdampf werden durch ein bei 400° entgastes eisernes Vakuumgefäß ohne Betrieb des Lichtbogens in kurzer Zeit und in großen Mengen vollständig aufgezehrt und nicht wieder abgegeben.
2. Stickstoff, Kohlenoxyd und Kohlendioxyd werden durch das Vakuumgefäß bei ausgeschaltetem Lichtbogen nicht beeinflusst. Nach dem

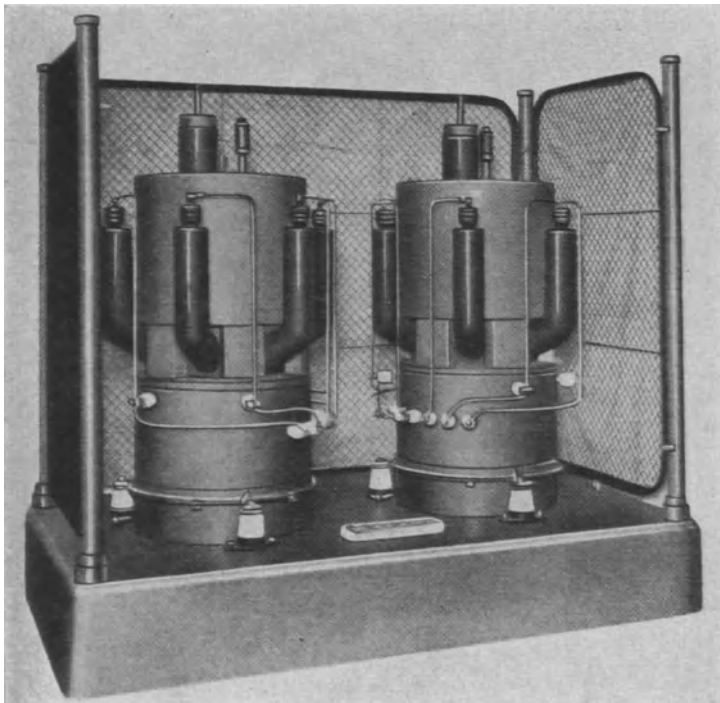


Bild 147. Pumpenlose Eisengleichrichter 250 kW mit im unteren Teil sitzenden Kühlventilatoren (GEC., London) ¹⁾

Einschalten des Lichtbogens verschwinden die Gase in kurzer Zeit und werden nicht wieder abgegeben. Man kann sich die Vorstellung bilden, daß der Stickstoff mit der Eisenwandung ein Nitrit bildet, das für Temperaturen unterhalb 800° stabil ist; ferner daß CO₂ und CO durch den Lichtbogen zerlegt werden, unter Ausscheidung von Kohlenstoff und Bildung von Eisenoxyden.

3. Wasserstoff bleibt in Übereinstimmung mit den Untersuchungen über Wasserstoffdiffusion vom eisernen Vakuumgefäß unbeeinflußt, solange der Lichtbogen nicht brennt. Mit Einschalten des Lichtbogens verschwindet der Wasserstoff in kurzer Zeit.

¹⁾ W. G. Thompson, J. Inst. electr. Eng. 1938, S. 437 (ETZ. 1939, H. 11, S. 339).

Aus diesen Beobachtungen geht hervor, daß eiserne Vakuumgefäße gegenüber allen im praktischen Betrieb vorkommenden Gasen, mit Ausnahme von Wasserstoff, als Getter wirken und eine Erhaltung des Vakuums ermöglichen. Nach den bis heute vorliegenden Betriebserfahrungen läßt sich die Schlußfolgerung ziehen, daß durch Herstellung dichter Gefäße, durch Entgasung derselben bei Temperaturen von 400° und durch Vermeidung der Zufuhr von Wasserstoffionen ein Eisengleichrichter ohne Pumpe betrieben werden kann und sein Vakuum dauernd behält. Selbst



Bild 148. Luftgekühlte pumpenlose Eisengleichrichter für 500 A (J. Pintsch)

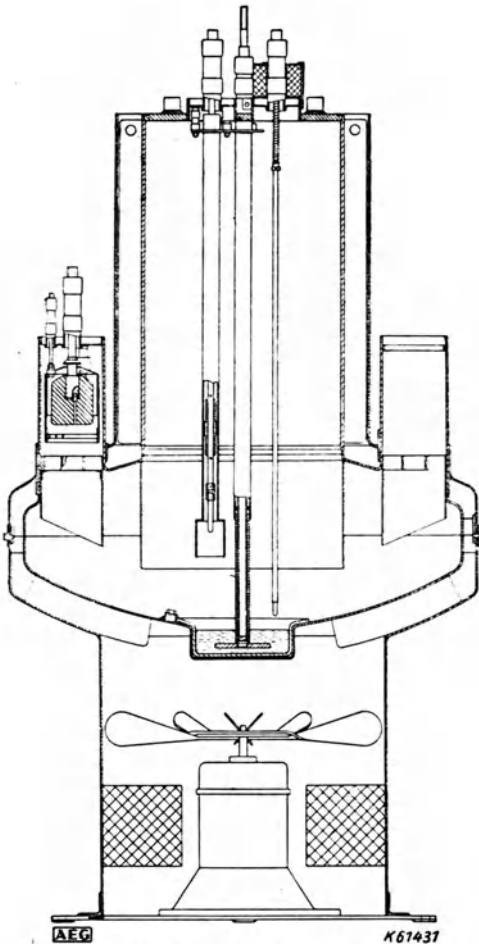
bei feuchter Kühlluft konnte während der Versuche eine Wasserstoffdiffusion in das Gefäßinnere nicht beobachtet werden. Man sollte annehmen, daß wegen der bekannten Wasserstoffhaut auf der Oberfläche des Eisens eine Strömung von Wasserstoff in das Gefäßinnere erfolgen müsse. Doch die Messungen brachten den Beweis, daß bei Luftkühlung kein Wasserstoff eindringt. Eine Begründung für diese neue Erkenntnis ist zur Zeit noch nicht bekannt. Nach bis heute vorliegenden, sich über 4 bis 5 Jahre erstreckenden Versuchs- und Betriebsergebnissen zu urteilen, verliert ein gutgedichtetes Eisengefäß sein Vakuum nicht, denn es kann durch die Getterwirkung der Eisenwände seine Luftleere aufrechterhalten.

Die verschiedentlich erwähnte Getterwirkung hat auch der Spiegelbelag von Rundfunkröhren. Dieser entsteht durch die Verdampfung von Barium oder Magnesium während der Entgasung der Röhren, er soll die nach dem Aus-

pumpen verbleibenden und während des Betriebes freiwerdenden Fremdgas aufzehren, um das Vakuum zu erhalten und zu verbessern.

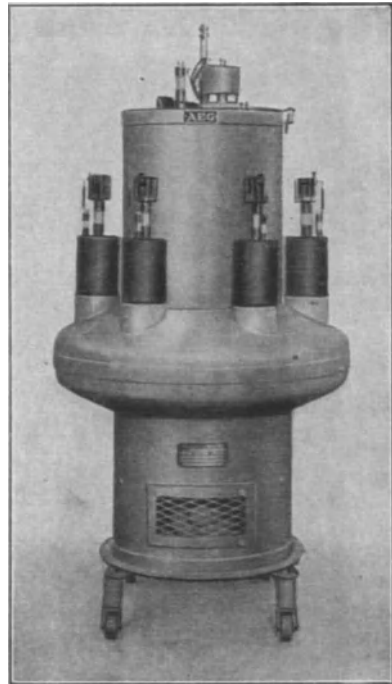
1) Ausgeführte pumpenlose Stromrichter

Die Bilder 147 bis 150 zeigen ausgeführte Stromrichter verschiedener Herstellerfirmen¹⁾. In der Schnittzeichnung Bild 149 ist der



Schnitt durch einen pumpenlosen Eisgleichrichter

Bild 149.



Außenansicht des Gleichrichters für 500 A (AEG.)

untersitzende Ventilator zu erkennen. Dieser treibt die Kühlluft durch den eng gefaßten Luftführungsschacht. Die Verwendung von Eisen als Baustoff gestattet eine genaue Einhaltung der Baumaße und gute Durchbildung der Luftwege, somit auch eine Luftkühlung mit hohem Wirkungsgrad. Eine weitere Schnittzeichnung zeigt Bild 103. Durch Parallelschaltung lassen sich Stromrichteranlagen größerer Stromstärken ausführen.

¹⁾ *Partzsch u. Dobke*, AEG.-Mitt. 1939, H. 2; *Baudisch u. Siemens*, E. u. M., H. 35/36 u. 37/38, 1939. BBC. teilte dem Verfasser mit, daß sich ein pumpenloser Gleichrichter in der Entwicklung befindet.

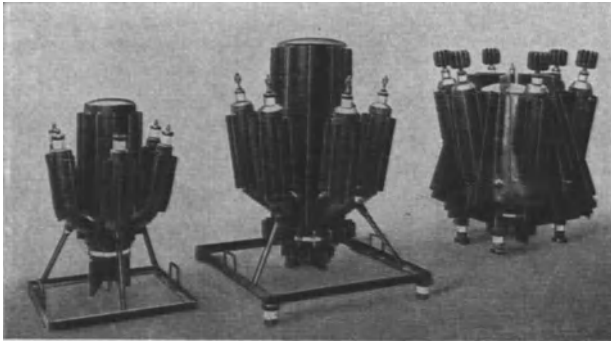


Bild 150. Pumpenlose Kleisenstromrichtergefäße für Spannungen bis 1200 V, 200, 400 und 600 A (SSW.)



Bild 151a.
Einzelne Röhre

m) Die wassergekühlten Eisengleichrichter von Philips-Rectron

In Holland wurde ein aus Chromeisen hergestellter wassergekühlter Hg-Gleichrichter ¹⁾ entwickelt. Die Bilder 21 und 151 zeigen den Querschnitt und die äußere Ansicht eines einanodigen Gefäßes. Chromeisen läßt nach Abschnitt 8 keine Wasserstoffatome durchtreten. Trotz der geringen Entfernung von Anode nach Kathode eignen sich diese Gleichrichter für Gebrauchsspannung bis 300 V. Das Chromeisengefäß ist mit einem Glasstutzen *G* verschmolzen, der auch die von außen durch einen Magneten bewegliche Zündanode *s* trägt. Das Wasser tritt bei *W_z* ein, durchläuft den Kühlmantel und tritt bei *W_a* erwärmt aus. Der Wasserverbrauch wird für 250 A mit 2 Liter/Minute angegeben und der Spannungsverlust mit 11,5 V bei 20 bis 100% Belastung. Für die Zündung ist Gleichstrom erforderlich, der von einem besonderen Erregergleichrichter *Gl* geliefert wird. Die einanodigen Gefäße werden analog den Glühkathodengleichrichtern zu mehranodigen Einheiten zusammengefügt.

¹⁾ Philips Technische Rundschau, 1936, H. 3.

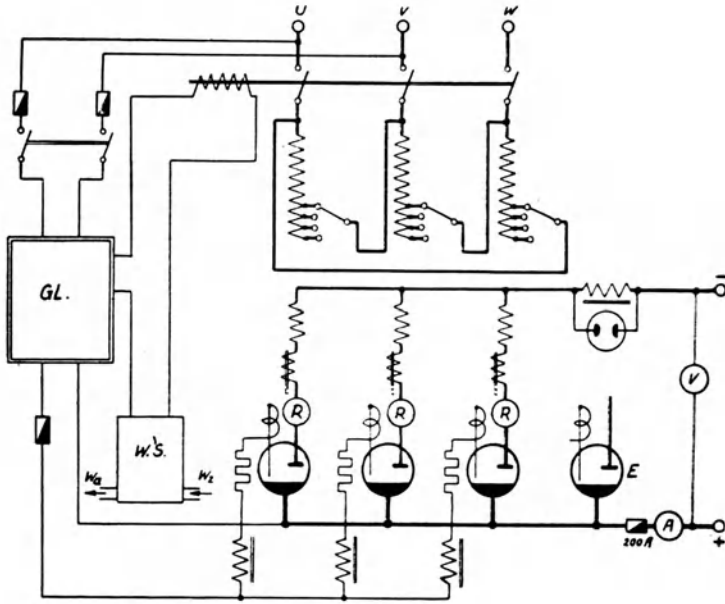


Bild 151 b. Schaltung. E = Ersatzröhre, GL = Gleichrichter, R = Zündrelais



Bild 151 c. Ein Gleichrichter nach Schaltung b)

Bild 151 a-c. Kleineisengleichrichter mit Wasserkühlung (Philips-Rectron)

10. Stromrichter ohne Entladungsgefäße

Die bisher beschriebenen Stromrichter arbeiten mit Entladungsgefäßen. Außer diesen gibt es jedoch noch einige Abarten, die erwähnt werden sollen, um sie in der Zusammenstellung aller Stromrichter nicht fehlen zu lassen.

a) Der mechanische Stromrichter

Die bekannten Pendelgleichrichter wurden vor Jahren für Batterieladezwecke viel verwendet, doch sind sie von den Trocken- und Glühkathodengleichrichtern verdrängt und heute bedeutungslos geworden.

In neuerer Zeit werden mechanische Wechselrichter hergestellt, um aus einem Gleichstromnetz, beispielsweise von einer Starterbatterie aus, einen für Wechselstrom erbauten Rundfunkempfänger speisen zu können. Die mechanischen Stromrichter sind einfache Pendelapparate, in denen Taktgeber in einer beliebigen Frequenz schwingen. Dieser Schwingungsvorgang erfolgt nach dem Prinzip eines *Wagner*schen Hammers durch eine Magnetspule und einen hin- und herschwingenden Anker. Dem Anker ist eine Feder zugeordnet. Je nach der Stärke der Federspannung läßt sich die Frequenzzahl verändern. Der Anker unterbricht bei jeder Schwingung einen Kontakt, wodurch aus dem Gleichstrom ein pulsierender Wechselstrom entsteht. Diese kleinen Wechselrichter werden auch für normale Lichtstromkreise passend hergestellt und gestatten den Besitzern von Wechselstromempfängern den Anschluß an Gleichstromnetze von 110 bis 230 V.

b) Der mechanische Gleichrichter mit schwingendem Quecksilberstrahl

Dieser von Prof. *Hartmann* in Kopenhagen mit viel Mühe entwickelte und sogenannte Wellenstrahlgleichrichter hat bis heute offenbar nur eine geringe Bedeutung bekommen, daher sei auf die Literatur hingewiesen¹⁾. Das Prinzip des Strahlgleichrichters besteht darin, daß ein durch eine Umlaufpumpe erzeugter feiner Quecksilberstrahl, kein Lichtbogen, mit Hilfe eines von der Netzfrequenz des Wechselstromnetzes erregten Magneten synchron hin und her schwingt. Hierbei trifft der Wellenstrahl auf Wolframkontakte, wenn das Wechselstromnetz analog zu den Entladungsgefäßen ein positives Potential hat. Beim jedesmaligen Auftreffen des Quecksilberstrahls auf einen Wolframkontakt fließt ein Stromimpuls aus dem Wechselstromnetz durch den Quecksilberstrahl in die Plusleitung des Gleichstromnetzes. Der Austrittspunkt des Quecksilberstrahls ist mit der Kathode und die Wolframkontakte mit den Anoden vergleichbar. Zur Verhütung von Kontaktabbränden wird der geschlossene Apparat mit Wasserstoff gefüllt. Der Vorzug dieser Stromrichter ist ein hoher Wirkungsgrad, denn der Spannungsverlust im Hg-Strahl ist kleiner als im Lichtbogen.

¹⁾ *J. Hartmann*, The Jet-Wave-Rectifier 1931, Buchausgabe 296 Seiten. Kopenhagen, Danmarks Naturvidenskabelige Samfund.

c) Der mechanische Hochspannungsgleichrichter

Diese Gleichrichter sind von verschiedenen Firmen bis zu einigen 100000 V zum Speisen kleiner Ströme für Röntgenröhren verwendet worden. Auch für Entstaubungsanlagen, zum Reinigen¹⁾ von Heizgasen und dergleichen haben sie eine praktische Bedeutung bekommen. Der Strom darf jedoch einige MA kaum übersteigen. Als Höchstleistung wird bei 100000 V Spannung 50 kW angegeben. Der Gleichrichter besteht aus einer umlaufenden Kontaktscheibe oder Nadel. Diese wird durch einen Synchronmotor angetrieben und beim Scheitelwert der gleichzurichtenden Wechselstromhalbwellen in die Nähe von Kontakten gebracht, so daß von diesen ein Überschlag nach der Nadel erfolgt²⁾. Beim Entfernen der Nadel von den Kontakten reißt der Lichtbogen wieder ab und in der Nähe des nächsten Kontaktes erfolgt eine neue Zündung. So sind entsprechend der Phasenzahl des Wechselstromnetzes mehrere Kontakte, kreisförmig und gleichmäßig verteilt, angeordnet. Die Nadel ist mit der Kathode und die Kontakte mit den Anoden vergleichbar. Der entstehende pulsierende Gleichstrom wird durch Drosselspulen und Kondensatoren geglättet. Die feststehenden Kontakte sind kugelförmig ausgebildet, da der Überschlag von einer Spitze zur Kugel bekanntlich am leichtesten erfolgt. Mit Ausnahme der genannten Anwendungsgebiete haben diese Gleichrichter für die Starkstromtechnik keine Bedeutung bekommen, so daß auf eine weitere Erläuterung und Abbildungen verzichtet werden kann.

d) Die Elektrolytgleichrichter

Vor Jahren wurden für kleinere Leistungen vielfach Elektrolytgleichrichter verwendet. Der Gleichrichtereffekt entsteht beispielsweise durch die Anordnung von Elektroden aus Aluminium und Eisen mit einem Elektrolyten aus Ammoniumcarbonat (Hirschhornsalz). Andere verwendeten Tantal oder Wolfram, denen eine Bleielektrode gegenübersteht. Die Gleichrichter wurden in Amerika unter dem Namen Balkitegleichrichter verkauft, wobei Schwefelsäure mit Ferrosulfat als Elektrolyt zur Anwendung kam³⁾. Um den Gleichrichter besser transportieren zu können, wurde der Elektrolyt mit festen, von der Säure nicht angreifbaren Baustoffen vermengt. Die flüssigen Gleichrichter sind heute von den Trockengleichrichtern verdrängt worden. Durch den elektrolytischen Vorgang findet eine dauernde Zersetzung der Elektroden statt, so daß eine lange Lebensdauer nicht erreicht werden konnte.

e) Die Trockengleichrichter

Im Gegensatz zu den Elektrolytgleichrichtern besteht der Trockengleichrichter aus festen Bauteilen, daher wird er wohl auch Trockengleichrichter

¹⁾ R. Heinerich, ETZ. 1930, H. 27. — ²⁾ Koch u. Sterzel, Dresden. — ³⁾ Güntherschulze, a. a. O., S. 166.

genannt. Es gibt unter ihnen Bauarten, die eine ausgeprägte elektrolytische Wirkung haben und infolgedessen sehr bald verbraucht sind. Hierzu gehören offenbar die Kupfersulfür- und Sulfidgleichrichter. Es sind

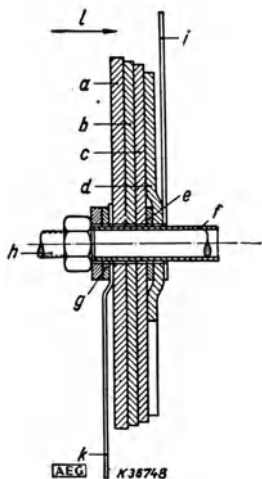


Bild 152.

Aufbau einer Trockenventilzelle

- a* = Eisenscheibe,
- b* = Aktive Gleichrichterschicht,
- c* = Aufgespritzte Gegenelektrode,
- d* = Abnahmeelektrode,
- e* = Zwischenscheibe,
- f* = Isolierrohr,
- g* = Isolierscheibe,
- h* = Haltebolzen mit Verlängerungen zum Befestigen des Gleichrichterelementes,
- i* = Gleichstromanschlußfahne,
- k* = Wechselstromanschlußfahne,
- l* = Durchlaßrichtung.

noch andere Trockengleichrichterarten auf dem Markt erschienen, doch in der neuesten Zeit haben sich in der Hauptsache zwei Systeme durchgesetzt. Dies sind die Kupferoxydulgleichrichter und die Selengleichrichter. Bild 152 zeigt den Querschnitt eines Selengleichrichters. Auf die vernickelte Eisenscheibe *a* ist eine Selenschicht *b* aufgetragen, auf dieser befindet sich die aufgespritzte Gegenelektrode, beispielsweise aus Weichmetall, um den Strom von der Selenscheibe abnehmen zu können, was mit Hilfe der Metallscheibe *d* geschieht. Selen ist ein Halbleiter mit verhältnismäßig hohem Widerstand und wird nur dünn aufgetragen. Hiernach wird die Eisenscheibe mit der aufgetragenen Schicht in einem Ofen bis auf etwa 220° erhitzt, wobei aus der Selenschicht ein kristallinisches Gebilde entsteht¹⁾. Dieses hat eine Sperrwirkung in der Richtung Selen—Eisen. Die Stromdurchlaßrichtung besteht umgekehrt vom Eisen zur Selenschicht. Die Sperrwirkung ist nicht vollkommen, sondern es fließt noch ein kleiner Rückstrom, der im Verhältnis zum Vorwärtsstrom als Güteziffer in den Bildern 153 und 154 dargestellt ist. Das Verhältnis des Vorwärtsstromes zum Rückstrom ist beispielsweise bei 3 V Spannung 9000 : 1. Die Selenschicht ist

demnach mit einem Widerstand vergleichbar, der in beiden Stromrichtungen verschieden große elektrische Werte hat.

Der Kupferoxydulgleichrichter besteht aus einer Kupferscheibe, die in einem Ofen zur Rotglut erhitzt wird. Dann entsteht durch ein bestimmtes Abschreckverfahren auf der Kupferplatte eine Kristallschicht (Kupferoxydul). Der Stromfluß erfolgt in der Richtung Kupferplatte—Oxydschicht und die Sperrwirkung besteht in der umgekehrten Stromrichtung²⁾. Bild 155 zeigt den Zusammenbau von einigen Sperrschichtplatten, die auf einem

¹⁾ *W. Ch. Geel*, Philips Technische Rundschau, April 1939, S. 110.

²⁾ Die ersten Veröffentlichungen erfolgten von *L. O. Grondahl* u. *P. H. Geiger*, A new Electronic Rectifier J. Am. Electr. Engs. 1927, S. 215; *F. Waibel*, Wiss. V. Siemens, Bd. 10, 1931, H. 4.

kräftigen Bolzen zu einem festen Ventilkörper zusammengepreßt werden¹⁾. Die im Bild erkennbaren Kühlfahnen sind bei den verschiedenen Kühlungsarten für die Leistung und den Platzbedarf entscheidend. Besonders stark tritt der Einfluß der Fremdkühlung beim Gewicht in Erscheinung.

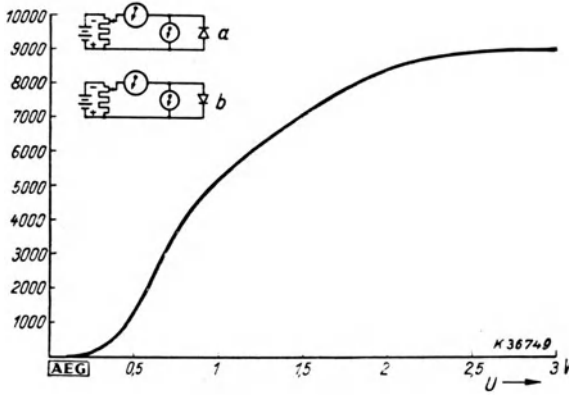


Bild 153. Gütezahl von Trockengleichrichtern. *a* - Vorwärtsstrom, *b* = Rückstrom Verhältnis des Vorwärtsstromes zum Rückstrom

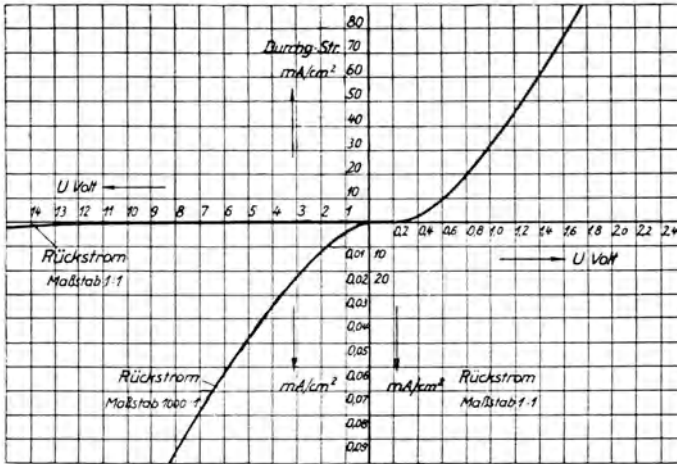


Bild 154. Die Veränderung des Rückstromes im Verhältnis zum Vorwärtsstrom in Abhängigkeit von der Spannung. (Der Rückstrom ist in 1000facher Vergrößerung aufgetragen, S.A.F.)

Über die Ventilwirkung der Sperrschicht bestehen verschiedene Auffassungen. Physikalisch scheint der Gleichrichtervorgang auch heute noch nicht genügend erforscht zu sein. Der Trockengleichrichter wird oft mit einem Kristalldetektor verglichen, der in der Rundfunktechnik zum Gleichrichten von Antennenströmen verwendet wird. Offenbar entsteht die Gleichrichter-

¹⁾ K. Baudisch u. W. Kafka, Siemens-Zeitschr. Bd. 18, 1938, S. 217–229.

wirkung durch eine Spitze, die einer größeren Platte gegenübersteht. In dieser Gegenüberstellung erfolgt der Elektronenaustritt von der Platte nach der Spitze zu leichter als umgekehrt, wodurch der verschieden große Widerstand in beiden Stromrichtungen verständlich erscheint. Es wurde auch be-


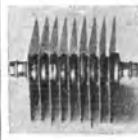
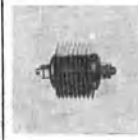
			
Durchmesser der Gleichrichter-Scheiben	40 mm	40 mm	40 mm
Anzahl der Gleichrichter-Scheiben	16	16	16
Belüftung	selbst	selbst	fremd
Kühlung	gering	gut	sehr gut
Leistung	3,6W = 100 %	26,6W = 740 %	48W = 1350 %
Raumbedarf/W	100 %	90 %	16 %
Gewicht/W	100 %	28 %	13 %
Preis/W	100 %	30 %	15 %

Bild 155. Drei verschiedene Ausführungen der zwischen den Gleichrichterplatten befestigten Kühlfahnen. Die Gleichrichterplatten haben in drei Beispielen gleiche Größe (SSW.)

hauptet, daß die Ventilwirkung dem Elektrolytgleichrichter vergleichbar ist, wobei eine dünne Wasserstoffhaut zwischen Kristall und Metall den Elektrolyten bildet. Die Kupferoxydul- und Selengleichrichter erreichen

jedoch eine so außerordentlich hohe Lebensdauer, daß die Annahme der reinen Elektronenströmung die richtigere zu sein scheint. Beide Trockengleichrichterarten haben sich seit vielen Jahren gut bewährt, so daß man von ihnen eine praktisch unbegrenzte Haltbarkeit erwarten kann.

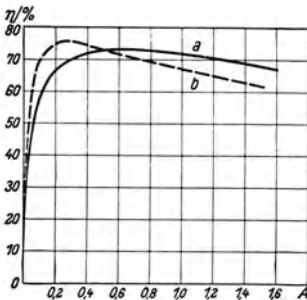


Bild 156. Wirkungsgrad einer Kupferoxydulgleichrichtersäule für 24 V, 0,7 A (SSW.)

a = Widerstandsbelastung
b = Batterieladung.

1. Die technischen Daten der Trockengleichrichter. Jede Metallplatte hat eine Sperrspannung, die je nach der Beanspruchung mit 5 bis 20 V als Höchstwert angegeben wird. Der Verlust jeder einzelnen Sperrschicht wird von den Firmen mit 20 bis 30 % angegeben. Die Wirkungsgradwerte sind in

Bild 156¹⁾ und 238 wiedergegeben für einphasige Graetzschaltung, sie liegen bei mehrphasigen Schaltungen etwa 10 % höher. Durch die engbegrenzte Sperrspannung ist der Konstrukteur darauf angewiesen, für

¹⁾ Vgl. S. 240.

Gleichrichter höherer Betriebsgleichspannungen eine entsprechende Anzahl von Platten aneinanderzureihen, so daß der Wirkungsgrad bei höheren Spannungen, im Gegensatz zu den Gleichrichtern mit Entladungsgefäßen, nicht günstiger wird. Er entspricht annähernd bei allen Gleichspannungen den Kurvenwerten. Offenbar ist die Größe der Platten durch die Herstellungsverfahren begrenzt. Die Firmen stellen im allgemeinen selbstgekühlte Platten

in den Stromstärken von 0,1 bis 6 A her. Man ist daher gezwungen, bei größeren Stromstärken eine entsprechende Anzahl Platten durch Parallelschaltung zu vereinigen. Bei Gleichrichtern für größere Strom-

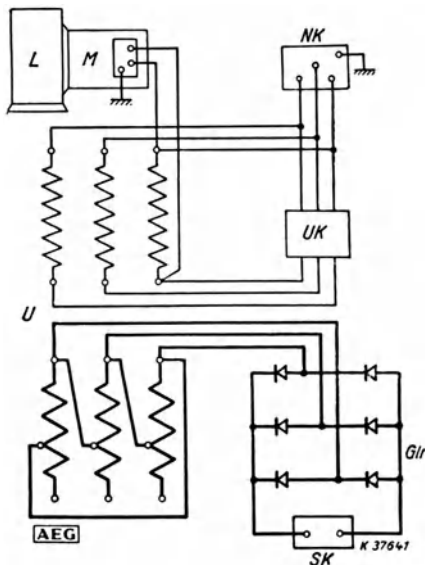


Bild 157 a. Schaltungsdiagramm des Schweißgleichrichters SGL 200

Glr = Trockengleichrichter, *L, M* = Lüfter und Motor, *NK* = Netzanschlussklemmbrett, *SK* = Schweißanschlussklemmbrett, *U* = Umspanner, *UK* = Umschaltklemmbrett



Bild 157 b. Schweißgleichrichter SGL 200

stärken und Spannungen erfolgt demnach einmal eine Reihenschaltung und zum andern eine Parallelschaltung von Platten. Eine Begrenzung entsteht nur durch die Wirtschaftlichkeit und nicht durch die praktische Ausführung. Um bei dieser Kombination an der Anzahl der Platten zu sparen, wurde neben der Verbesserung der Bauweise und Herstellungsverfahren eine Leistungssteigerung der einzelnen Platten durch die künstliche Kühlung angestrebt. Wie Bild 155 zeigt, konnte durch die Formverbesserung und Fremdbelüftung eine wesentliche Leistungssteigerung erzielt werden, die von *Baudisch* und *Kafka*¹⁾ mit dem 7,4fachen Wert angegeben wird. Für besondere Anwendungsgebiete konnte beispielsweise die wirtschaftliche Grenze der Kupferoxydulgleichrichter von 2—3 kW

¹⁾ Vgl. *Baudisch* u. *Kafka*, a. a. O.

auf 100 kW heraufgesetzt werden, so daß die Trockengleichrichter in immer größerem Ausmaße dort verwendet werden, wo früher kleinere Gleichrichter mit Entladungsgefäßen verwendet wurden. Die Bilder 157 und 158 zeigen einige Ausführungsbeispiele der Fremdbelüftung.

2. Die Konstruktion und Schaltung der Trockengleichrichter. In gleicher Weise wie einanodige Glühkathodengefäße bildet jede Trockengleichrichterplatte oder mehrere in Reihe geschaltete Platten ein Ventil¹⁾, das mit ein-

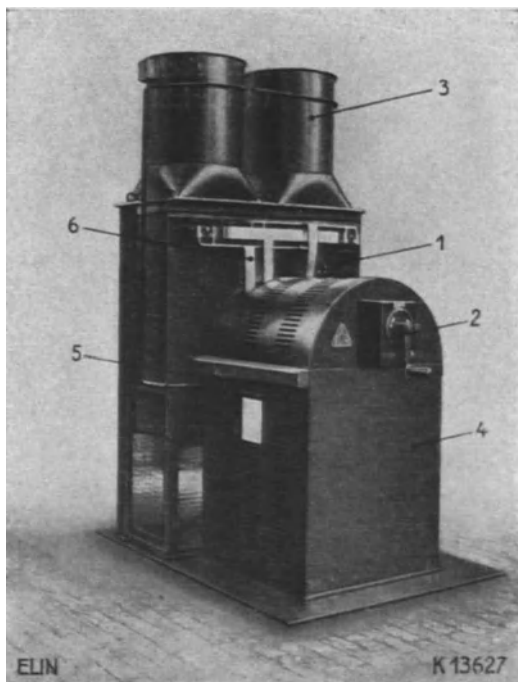


Bild 158. Trockengleichrichter 2000 A, von 3 4 V regelbar mit Stufenschalter
 1 Gleichrichterkühlmantel, 3 Lüfterkammine mit Ventilatoren, 2—4 = Transformator
 mit Regelschalter, 6 Stromverbindungen

anodigen Röhren vergleichbar ist. Die einzelnen Ventile lassen sich durch sinngemäße Aneinanderreihung auf einem Bolzen so zusammenschrauben, daß aus ihnen nach Bild 155 ein mehrpoliges Aggregat entsteht. Die Anordnung der Wechselstrom- und Gleichstromverbindungen mit diesen so gebildeten Aggregaten zeigt Bild 159. Im Gegensatz zu den mehranodigen Entladungsgefäßen können mit den Gleichrichterelementen in der bekannten Graetz-

¹⁾ SSW.-Sonderdruck, S. 90, 4182 8; AEG.-Sonderdruck O V 1099, 1107, 1113, 1114 a, 1115; K. Maier, AEG.-Mitt. 1937, H. 5; K. Maier, Trockengleichrichter, Verlag R. Oldenbourg, 1938; C. L. Kober u. F. Weiß, E. u. M. Wien 1938, H. 11.

Schaltung Vollweggleichrichter ohne Mittelanzapfung des Transformators hergestellt werden, auch sind mehrphasige Gleichrichter ausführbar. Auf diese Weise entsteht im Dreiphasen-Trockengleichrichter in Graetz-Schaltung ein Gleichstrom, der einer Welligkeit des Sechsfasengleichrichters entspricht und beim Sechsfasengleichrichter entsteht die Welligkeit eines Zwölfphasengleichrichters¹⁾. Die einfache Schaltungsweise gestattet nach Bild 159 die Herstellung umschaltbarer Gleichrichter für verschiedene Gleichspannungen und Stromstärken, um den Gleichrichter für verschiedene Verbraucher benutzen zu können.

Um die Strom- und Spannungs-kurven kennenzulernen, ist im Bild 160 eine Zusammenstellung der wichtigsten Kurven wiedergegeben, es zeigt auch die Gegenüberstellungen der Stromkurven i bei Batterieladung mit und ohne Glättungs-drossels-pule. Zur besseren Erläuterung zeigt Bild 161 die Kurven genauer. Wegen der Batterie-gegenspannung kann der Lade-strom J nur dann fließen, wenn die positive Halbwelle der erzeugten Gleichspannung die Höhe der Batterie-spannung überschritten hat. Auf diese Weise entsteht ein nur kurzzeitig fließender Strom (Bild 161 b). Die Stromkurvenveränderung entsteht nicht nur bei Trockengleichrichtern, sondern bei sämtlichen Gleichrichterarten, wenn keine Glättungs-drossels-pule verwendet wird. Ein kurzzeitig fließender und pulsierender Strom ist für den Ladebetrieb keinesfalls nachteilig, er schadet durch seine kurzzeitige Beanspruchung nicht. Mit Rücksicht auf die

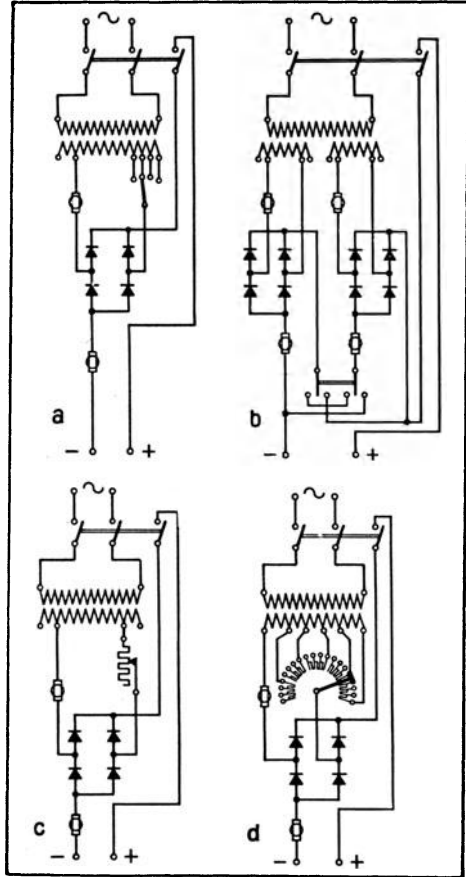


Bild 159.

Regelschaltungen für Kupferoxydulgleichrichter (SSW.)

Auf diese Weise entsteht ein nur kurzzeitig fließender Strom (Bild 161 b). Die Stromkurvenveränderung entsteht nicht nur bei Trockengleichrichtern, sondern bei sämtlichen Gleichrichterarten, wenn keine Glättungs-drossels-pule verwendet wird. Ein kurzzeitig fließender und pulsierender Strom ist für den Ladebetrieb keinesfalls nachteilig, er schadet durch seine kurzzeitige Beanspruchung nicht. Mit Rücksicht auf die

¹⁾ Vgl. auch *O. Werner*, ETZ. 1940, H. 2; *H. Hoffmann*, Zeitschr. d. VDI. 1940, Nr. 4.

Oberwellen der Wechselstromseite verbieten sich Gleichrichter ohne Glättungsdrosselspulen über eine bestimmte Leistung hinaus von selbst. Der Aufbau der Trockengleichrichter geht aus den Bildern bis 164 hervor. Die einzelnen

	<i>Einphasen - Anschluß</i>		<i>Drehstrom - Anschluß</i>		
	<i>a</i> <i>Einweg-Schaltung</i>	<i>b</i> <i>Grätz-Schaltung</i>	<i>c</i> <i>Nullpunkt-Schaltung</i>	<i>d</i> <i>Grätz-Schaltung</i>	
<i>Schaltbild</i>					
<i>Spannung</i>	<i>Spannungskurve</i>				
	<i>natürliche Welligkeit %</i>	120	48	18	4
<i>Ohmsche Belastung</i>	<i>Stromkurve</i>				
	<i>Formfaktor</i> $\frac{I_{eff}}{I_{mittel}}$	1,8	1,15	1,05	1,0
<i>Batterieladung</i>	<i>Stromkurve</i>				
	<i>Formfaktor</i> $\frac{I_{eff}}{I_{mittel}}$	2,2	1,5	1,2	1,02
<i>Batterieladung über Glättungsdrossel</i>	<i>Stromkurve</i>				
	<i>Formfaktor</i> $\frac{I_{eff}}{I_{mittel}}$	—	≈ 1,05	≈ 1,0	1,0

Bild 160. Gleichrichterschaltungen (SSW.)

Bauteile werden in gekapselten Gehäusen untergebracht oder in schalttafelähnlichen Gerüsten anschlussfertig hergestellt, so daß eine einfache Montage möglich ist. Eine Regulierung der Gleichspannung erfolgt nach Bild 159

mit Hilfe von Schiebewiderständen oder Regulierschaltern. Auch wird die Ladedrosselspule als Vorschaltung für Batterieladegleichrichter mit Erfolg angewendet. Allgemein läßt sich wohl sagen, daß Trockengleichrichter für Batterieladewecke bevorzugt verwendet werden.

3. Die Verwendungsgrenze der Trockengleichrichter. Es sind Kurven errechnet worden, um die Verwendungsgebiete der Glühkathoden-Hg-Dampf- und Trockengleichrichter abzugrenzen, denn es fällt dem unbefangenen Interessenten oft schwer, sich für die eine oder andere Gleichrichterart zu entscheiden. Ferner zeigt Bild 238 die Wirkungsgradkurven der Trockengleichrichter in Gegenüberstellung zu denen der Glühkathoden und Hg-Dampfgleichrichter.

Im Interesse einer Stromersparnis sollte man, nach dem Wirkungsgrad zu urteilen, über etwa 70 V Gleichspannung keine Trockengleichrichter verwenden. Doch neben dem Wirkungsgrad ist der Verbrauch an Glasgefäßen sowie die mechanische Festigkeit zu bewerten, also die Art der Verwendung. Neben dem Vergleich der technischen Werte müssen ferner die Beschaffungspreise

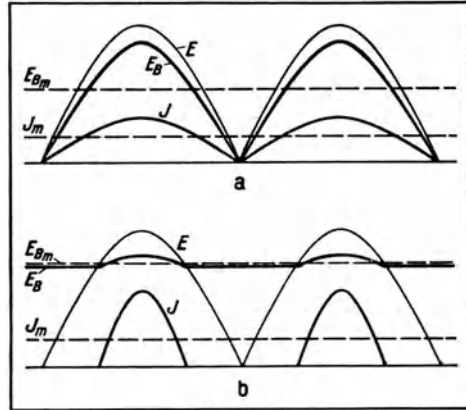


Bild 161. Strom- und Spannungsverlauf eines Kupferoxydulgleichrichters in Grätzschaltung. a) bei Ohmscher Belastung, b) bei Belastung auf Batterie (SSW.)

E = Leerlaufspannung des Gleichrichters, E_B = Spannung bei Belastung, E_{Bm} = Mittelwert der Spannung bei Belastung, J = Belastungsstrom, J_m = Mittelwert des Belastungsstromes

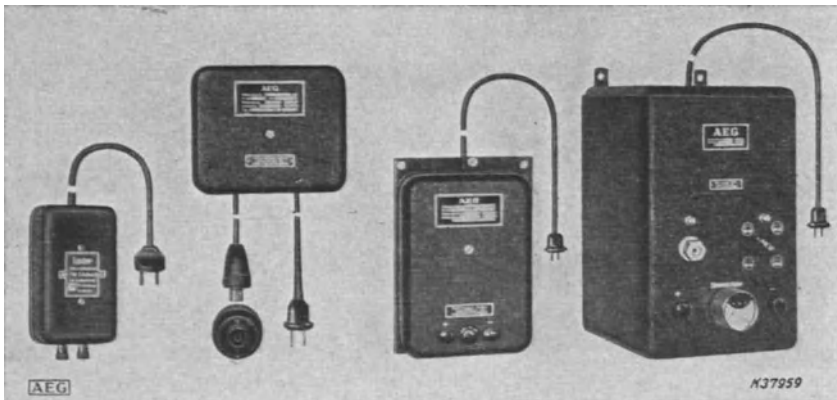
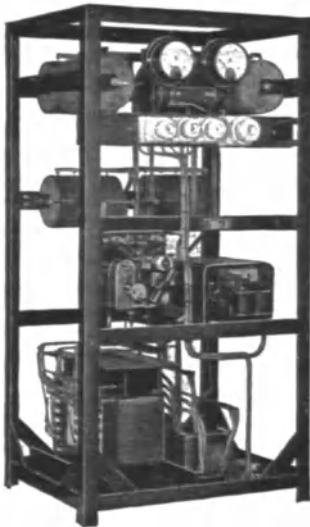


Bild 162. Trockengleichrichter in ihrer äußeren Form von 1—12 A, 6—30 V

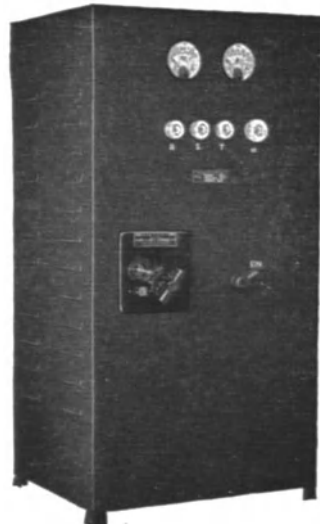
in Rechnung gestellt werden. Für robuste Betriebe, z. B. auf Kränen und Fahrzeugen, verdient der Trockengleichrichter wohl immer den Vorzug. Trockengleichrichter wurden für Spannungen unter 20 V bis zu



Bild 163. Kupferoxydulgleichrichter für 2000 V, 0,25 A (SSW.)



offen



geschlossen

Bild 164. Ein Selentrockengleichrichter zum Laden von Elektrokarren 40 A, 80 --110 V (SAF.) Stromstärken von 30000 A hergestellt und für kleinere Stromstärken bis zu Spannungen von 4000 V und mehr¹⁾.

4. Die Berechnung der Trockengleichrichter. Unter Berücksichtigung des Spannungsverlustes von 20 bis 30 % in den Ventilschichten erfolgt die

¹⁾ H. Hoffmann, Zeitschr. d. VDI. 1940, Nr. 4; K. Mair, a. a. O.

Berechnung der Umspanner und Drosselspulen für Trockengleichrichter nach den gleichen Formeln, wie sie im Abschnitt 12 für Gleichrichter mit Entladungsgefäßen angegeben sind. Kleinere Gleichrichter erhalten oft Umspanner mit großer Streuung, wodurch Vorschaltdrosselspulen zur Erzeugung einer abfallenden Charakteristik für selbsttätige Ladung von Batterien in Fortfall kommen. Trockengleichrichter können für Batterieladezwecke ohne Rückstromschalter in Betrieb genommen werden, weil nach Bild 153 der Rückstrom so gering ist, daß eine nennenswerte Entladung der Batterie bei angeschlossenem Gleichrichter und ausgefallenem Wechselstromnetz nicht stattfindet.

f) Die Hochspannungsgleichrichter

Für Hochspannung bestehen folgende Anwendungsgebiete:

1. Gleichrichter zur Speisung von Bahnen bis zu 5000 V.
2. Gleichrichter zum Speisen von Sendeanlagen für Rundfunkbetrieb bis zu 15000 V.
3. Gleichrichter zum Speisen von Hochspannungsüberlandnetzen.
4. Gleichrichter für Röntgenröhren und Entstaubungsanlagen.

Mit Ausnahme der höheren Isolation und der erhöhten Sperrwirkung unter-

scheiden sich die Hochspannungsgleichrichter von den übrigen Gleichrichterarten nicht. Für Bahnbetriebe sind Quecksilberdampfglas- und Eisengleichrichter bis zu 3000 V und mehr verwendet worden. Um an den Gleichrichtergestellen oder Gefäßen eine möglichst geringe Berührungsspannung zu bekommen, wird in Bahnanlagen die Kathode häufig an die Fahrchiene gelegt und der Minuspol an den Fahrdraht. Unter den zahlreichen Veröffentlichungen über Hochspannungsgleichrichter seien folgende aufgewiesen:

- Fr. Mertens*, ETZ. 1930, H. 9. -- *A. Glaser*, ETZ. 1931, H. 52.
C. Brynhildsen, BBC.-Nachr. 1935, H. 1. - *A. Rachel* u. *K. Rissmüller*,
 Elektr. Wirtschaft 1932, H. 31. - *A. Gottschalk* u. *W. Kluge*, AEG.-Mitt.
 1934, S. 67. -- *R. Heinerich*, ETZ. 1930, H. 27. - *E. Wenzel*, AEG.-Mitt.
 für Bahnbetriebe 1932, H. 13. - *H. Kother*, El. Bahnen, Sept. 1939. --
H. Grünwald, Zeitschr. d. VDI. 1935, Nr. 46.

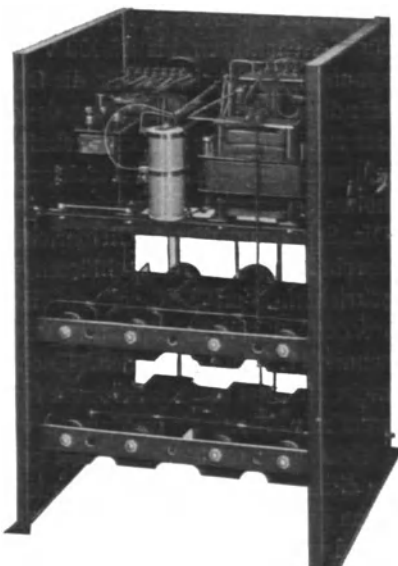


Bild 165. Ein Kupferoxydulgleichrichter für 100 A und 40 V (Westinghouse)

Die bekanntesten und aussichtsreichsten Verwendungsgebiete der Stromrichter bestehen wohl für Sendeanlagen und die zukunftsreiche Übertragung großer Energien über Gleichstrom-Hochspannungsnetze. Für Rundfunksendeanlagen sind vielfach Eisenstromrichter erstellt worden. Verschiedentlich wurden auch Quecksilberdampf-Glasgleichrichter¹⁾ bis zu Spannungen von 13000 bis 14000 V verwendet. In Rußland²⁾ und Frankreich schaltete man 2 Glasgefäße in Reihe. Verschiedentlich wurden vor Jahren Glasgleichrichter für Telegraphiesender bis zu 5000 V erstellt. Doch in der letzten Zeit werden, wegen der sicheren Sperrwirkung, quecksilbergefüllte Glühkathodenröhren für Sendeanlagen bis 15000 V in vielen Ländern bevorzugt. Die Hochspannungsgleichrichter für die Deutsche Reichspost bestehen aus zwei selbständigen Gleichrichtern, von denen einer in Betrieb gehalten wird, während der zweite in Betriebsbereitschaft steht. Bild 134 zeigt einen mit Vakuumpumpen ausgerüsteten Hochspannungs-Eisengleichrichter. Dieser hat der hohen Spannung entsprechend Anodenisolatoren mit großen Abmessungen. Die Schaltung dieser Gleichrichter, unter Berücksichtigung der Gitterabschaltung bei Kurzschlüssen in Senderöhren, ist im Abschnitt 13 beschrieben. Von BBC. ist ein Eisengleichrichter für 50000 V entwickelt worden, er soll zur Speisung von Hochspannungs-Gleichstromnetzen, Abschnitt 11, benutzt werden. Hochspannungsgleichrichter für 100000 V und mehr sind bei kleinen Strömen für Röntgen- und Entstaubungsanlagen verwendet worden. Es werden für diesen Zweck Hochvakuum-Glühkathodengleichrichter nach Abschnitt 2 hergestellt, die sich für Sperrspannungen bis zu einigen 100000 V ausführen lassen, ohne daß Rückzündungen entstehen. Eine gut zusammengefaßte Veröffentlichung über die Erzeugung und Verwendung hochgespannten Gleichstromes erschien von *Grünwald* in der VDI-Zeitschr. 1935, Nr. 46. Wegen der zur Zeit noch eng begrenzten Anwendung der Hochspannungsgleichrichter soll auf eine weitere Erläuterung verzichtet werden.

g) Die Lichtbogengleichrichter von Marx

Die Versuche von Professor *Marx* waren in der Literatur oft Gegenstand von Erörterungen, weil mit ihnen bewußt nur die Verwendung für Zwecke der Gleichstrom-Kraftübertragung angestrebt wurde. Es sei auf die Veröffentlichungen von *Marx*, *Buchwald* und anderen Verfassern hingewiesen: ETZ. 1930, H. 51; 1932, H. 53; 1933, H. 54; 1934, H. 55; 1935, H. 33; Arch. f. Elektrot. 1930, H. 24; VDI-Zeitschr. 1934, Nr. 78; Lichtbogen-Stromrichter von *E. Marx*. Berlin, Jul. Springer, 1932.

¹⁾ Radio Wien 1935, H. 35, ELIN.

²⁾ *Wologdin*, Elektrizschestow 1928, Okt.

Nach den Vorschlägen von *Marx* wird der Lichtbogen in Luft oder einem Gas von Atmosphärendruck periodisch gezündet und gelöscht. Die Zündung wird durch eine hohe Spannung eingeleitet, die den Hauptelektroden vorgelagerten, kappenartig ausgebildeten Zündelektroden periodisch zugeführt wird. Nach der Zündung fließt der Hauptstrom in Form einer Bogenentladung von Anode nach Kathode, die aus Wolfram hergestellt sind. Das Verlöschen der Entladung nach dem Zündeinsatz der Folgeanode wird durch einen künstlich erzeugten Luftstrom unterstützt. Die Versuche wurden bis 400000 V durchgeführt, der höhere Lichtbogenverlust gegenüber den Hg-Dampf-Gefäßen ist bei hohen Gleichspannungen vernachlässigbar. Ein abschließendes Urteil über die praktische Verwendung liegt jedoch noch nicht vor.

h) Die Glimmgleichrichter

Vor der Einführung von Trockengleichrichtern wurden vielfach Glimmgleichrichter zum Laden kleiner Batterien benutzt. Die Glimmgleichrichterröhre ist mit Neon oder anderen Edelgasen gefüllt und hat eine klein ausgebildete Graphitanode, der eine große Metallfläche in zylindrischer Form als Kathode gegenübersteht. Man stellte diese Röhren für Stromstärken bis 0,2 A und Wechselstromnetzspannungen von 220 bis 240 V her. Der Bogenverlust beträgt bei einem bestimmten Gasdruck etwa 160 bis 170 V, so daß die Restspannung von 70 bis 80 V mit Hilfe von Vorschaltwiderständen zum Laden kleiner Batterien angewendet werden kann. Ein Transformator ist nicht erforderlich. Es wurden bis zu fünf Röhren parallel geschaltet, um höhere Ladeströme zu erreichen. Die Glimmgleichrichter wurden vor Jahren viel zum Dauerladen von Betätigungsbatterien benutzt. Der Gleichrichtereffekt ist nicht vollkommen, doch bei den geringen Leistungen können die Rückstromverluste vernachlässigt werden. In der Rundfunktechnik versuchte man, mit Glimmgleichrichtern ¹⁾ die Anodenstromkreise der Empfängerröhren zu speisen, doch hier sind sie von den Glühkathodenröhren verdrängt worden.

11. Stromrichter mit Steuergittern

Die Steuergitter in den Stromrichtern ähneln der Gitteranordnung an Rundfunkapparaten. In beiden Fällen beeinflußt die Gitterspannung den Strom der Hauptanoden. Doch besteht zwischen ihnen ein markanter Unterschied, der durch die inneren Vorgänge gegeben ist. Die Verstärkeröhre ist eine Hochvakuumröhre. Der Stromfluß erfolgt nur durch Elek-

¹⁾ *G. Seibt*, ETZ. 1928, H. 29, S. 1077.

tronen, wobei jedoch eine Raumladungswirkung und ein verhältnismäßig hoher Spannungsverlust (Bild 2) entsteht. Die Entladungsgefäße dagegen haben durch ihre Edelgas- oder Quecksilberdampfzuführung eine wesentlich günstigere Strombahn, die im Gegensatz zur reinen Elektronenröhre aus Elektronen und ionisierten Gasteilchen besteht. Die Hochvakuumröhren haben also einen hohen Verlust und sind für Starkstrom-Niederspannung nicht verwendbar, doch ihre Steuerung ist wegen der einfachen inneren Vorgänge günstiger gegenüber den gasgefüllten Gefäßen.

Die positiven Ionen erschweren die Steuerung der Ströme und die Übertragung der Rundfunk-Verstärkerschaltungen auf die Starkstromtechnik. Wird beispielsweise bei einem Quecksilberdampfgleichrichter in einer üblichen Verstärkerschaltung ein Gleichstrom an die Anoden und Wechselstrom an das Steuergitter gelegt, dann läßt sich durch das Einschalten der Gitterspannung nur das Zünden des Lichtbogens beherrschen. Die Gitter sind jedoch nicht imstande, den einmal fließenden Strom zu unterbrechen, wie dies bei Verstärkerröhren möglich ist. Bei Wechselrichtern, die gleich den Verstärkern aus Gleichstrom einen Wechselstrom erzeugen sollen, wurde die Unterbrechung des Gleichstromes durch Kunstgriffe erreicht. Wird jedoch an Stelle des Gleichstromes ein Wechselstrom an die Hauptanoden gelegt, so ist eine Steuerung und Regelung der erzeugten Gleichspannung möglich, wie die weitere Beschreibung erkennen läßt.

a) Die Steuerung der reinen Elektronenröhren (Hochvakuumröhren)

Um die Unterschiede der inneren Vorgänge genauer zu erklären, sind im Bild 166 die beiden Steuerungsarten gegenübergestellt, und zwar die Hoch-

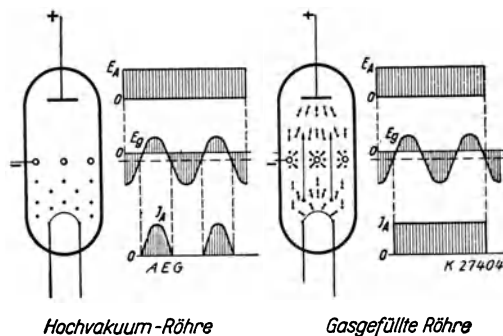


Bild 166. Gittergesteuerte Ventile, Einfluß des Gitterpotentials auf den Anodenstrom

vakuummöhre links und das dampf- oder gasgefüllte Gefäß rechts. Die durch Punkte angezeigten Elektronen werden von der Kathode emittiert und wandern im linken Bild bei negativer Gitterspannung E_g von der

Kathode bis in die Nähe der Gitter. Das negative Gitter stößt die negativen Elektronen ab, so daß sie beim Herausfliegen aus der Kathode sofort wieder zurückgeschleudert werden. Sie tanzen gewissermaßen im Raum zwischen Kathode und Gitter auf und ab. Der Gleichstrom J_A kann infolgedessen nicht fließen. Erst wenn das Gitter positive Spannung bekommt, werden die Elektronen von ihm angezogen, sie wandern dann mit der bekannten hohen Geschwindigkeit auf die Anode zu, und der Gleichstrom J_A fließt in einer Form, die der Halbwelle der Gitterwechselspannung angepaßt ist. Bei kleinerem Momentanwert der Gitterspannung werden weniger Elektronen aus dem Kathodenraum herausgerissen und bei höherem mehr, so daß die Dichte der Elektronen mit der Höhe der Gitterspannung schwankt, also auch die Momentanwerte der Anodenströme. Sobald die Gitterspannung wieder negativ wird, hört die Elektronenströmung auf und der Anodenstrom ist gesperrt, um bei der nächsten positiven Halbwelle der Gitterspannung wieder zu fließen. Die Reihenfolge der Halbwellen ergibt sich aus der Frequenz der Gitterspannung. Der Energieverbrauch am Gitter ist praktisch Null. Die Steuervorgänge werden durch das Feld der Gitterspannung beherrscht. Der Gitterstrom wird in bekannter Weise durch hochohmige Gitterwiderstände begrenzt. Die Schaltung entspricht in dieser Form einem idealen Wechselrichter, denn es entsteht aus dem Anodengleichstrom ohne besondere Hilfsmittel ein sinusförmiger Wechselstrom, wenn zwei Röhren in Gegentakt geschaltet werden.

b) Die Steuerung dampf- oder gasgefüllter Stromrichtergefäße

Im Gegensatz hierzu sind die Verhältnisse in dampf- oder gasgefüllten Gefäßen wesentlich komplizierter. Die Elektronen wandern beim Einschalten zuerst in gleicher Weise wie im linken Bild, nur bis in die Nähe des Gitters. Wird dagegen die Gitterspannung Null bzw. positiv, so erfolgt durch die Elektronen die Ionisierung der Gasatome bis zur Anode und der Anodenstrom fließt ohne Rücksicht auf die Anzahl der freigewordenen Elektronen plötzlich und steil ansteigend in der vollen Höhe J_A . Das Gitter hat nunmehr auf die weiteren Vorgänge keinen Einfluß mehr, denn bei der Umkehrung des Gitterpotentials vom positiven zum negativen Wert wird die Elektronenströmung von der Kathode nach dem Gitter nicht unterbrochen, weil das negative Gitter die positiven Ionen anzieht, wodurch das Gitter an seiner Oberfläche von einer Ionenwolke eingehüllt wird. Dies entspricht einer Neutralisierung des Gitters. Die Elektronen finden durch die unvermeidbaren (Pfeile in der rechten Skizze) Öffnungen des Gitters den Weg zur Anode, und der Gleichstrom fließt ununterbrochen weiter, wie das im rechten Diagramm zu erkennen ist. Die Öffnungen der Gitter müssen einen festgelegten Mindestquerschnitt haben, sonst würde der Spannungsverlust im Gefäß zu hoch ansteigen.

c) Die physikalischen Vorgänge während der Steuerung mit Gleichstromanodenspannung

Zwischen der Anode *A*, Bild 167, und der geheizten Kathode *K* ist das Gitter *G* als Einlochgitter schematisch dargestellt. Der Anode wird die gegen das Gitter positive Gleichspannung von z. B. 100 V zugeführt. Das Gitter möge zunächst mit einer Spannung von 20 V negativ gegen die Kathode aufgeladen sein. Die aus der Kathode durch Glühemission austretenden Elektronen können gegen das Bremsfeld zwischen Gitter und Kathode nicht anlaufen. Sie lagern sich daher als Elektronenwolke vor die

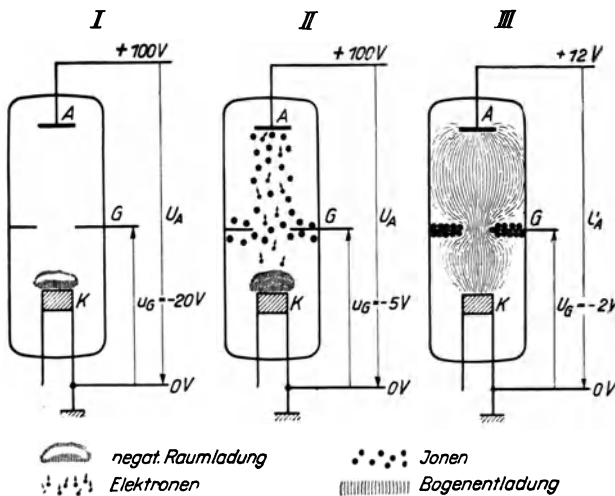
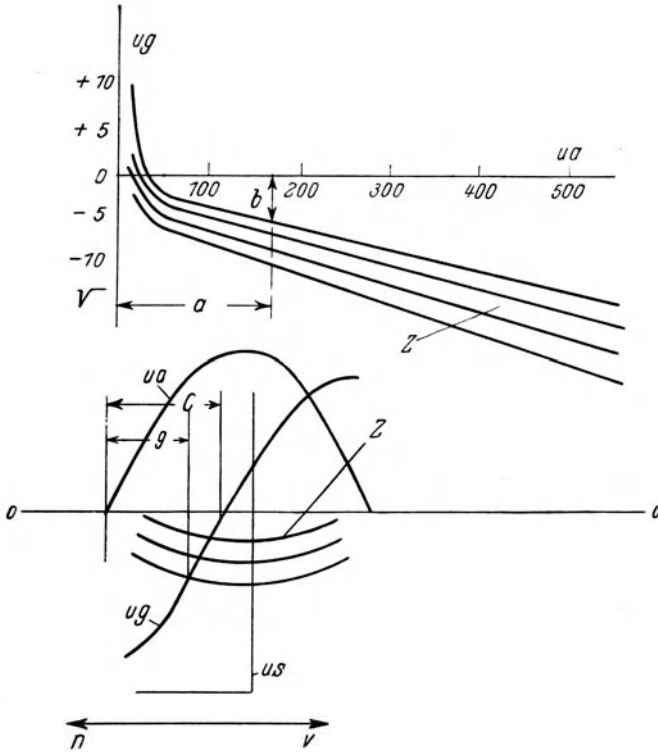


Bild 167. Steuerung einer Dampfentladung durch Gitter

Kathode. Einzelne Elektronen, die eine höhere Anfangsgeschwindigkeit haben, können etwas weiter gegen das Gitter vordringen. Der Raum zwischen Anode und Gitter bleibt jedoch elektronenfrei. Wird jetzt die negative Gitterspannung auf 5 V verkleinert, so dehnt sich die Elektronenwolke gegen das Gitter hin aus. Einzelne schnelle Elektronen gelangen schon durch das Gitterloch in den Raum zwischen Anode und Gitter und ionisieren dort den Quecksilberdampf. Da die zur Ionisation nötige kinetische Energie erst nach Durchlaufen eines genügend großen Weges erreicht wird, befinden sich durch Stoß gebildete Quecksilberdampfbionen vorzugsweise vor der Anode, wo sie wegen ihrer geringen Beweglichkeit eine positive Raumladung bilden. Einzelne Ionen haben sich auch schon vor das Gitter gelagert. Wenn das verwendete Rohr eine negative Gittercharakteristik (Bild 168) hat, wird bei einer geringen weiteren Senkung der negativen Gitterspannung oder beim Nullwert derselben eine so große Zahl von Ladungsträgern gebildet, daß der Lichtbogen zwischen Anode und Kathode

zündet. Der Strom wächst lawinenartig an und ist nur durch die Klemmenspannung und den äußeren Lastwiderstand bestimmt. Gleichzeitig bricht



u_a = Anodenspannung, u_g = Gitterspannung (Sinusform), u_s = steile Gitterspannung, Z = Zündkennlinien

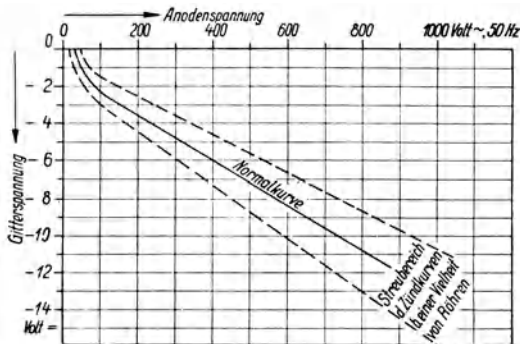


Bild 168. Zündcharakteristik an Entladungsgefäßen (vgl. auch Bild 2)

die Anodenspannung auf den geringen Betrag der Lichtbogenbrennspannung von 12 bis 15 V zusammen. Die Gitterspannung ist nunmehr positiv gegen-

über der Zündkennlinie. Der einmal brennende Hauptlichtbogen läßt sich jedoch durch eine einfache Umpolung der positiven in eine negative Gitterspannung nicht wieder zum Verlöschen bringen, denn die positiven Ionen hüllen das Gitter ein und schirmen das ursprüngliche Gitterfeld ab. Dadurch ist es aber für die Entladung unwirksam geworden. Auch wenn die negative Gitterspannung beliebig vergrößert wird, fließt der Anodenstrom ungehindert weiter. Es ändern sich allenfalls die Dimensionen der positiven Schicht vor dem Gitter. Das Gitter kann erst wieder wirksam werden, wenn die positive Hülle verschwindet und der Strom Null geworden ist. Dies erfolgt bei Wechselstrom bei jeder Halbwelle einmal von selbst. In der folgenden Vorwärtshalbwelle hat das Gitter also seine Steuerfähigkeit wiedergewonnen. Schickt man jedoch Gleichstrom durch das Rohr, so muß dieser zur Wiederherstellung der Steuerfähigkeit vorübergehend unterbrochen werden. Dies läßt sich durch Schalter im Anodenkreis oder durch dem Strom entgegengerichtete Entladungen elektrischer oder magnetischer Energiespeicher erreichen.

Im Bild 168¹⁾ sind oben und in der Mitte von einem solchen Rohr die zusammengehörigen Werte von einer Gitterspannung u_g und der Anodenspannung u_a bei verschiedenen Dampfdrücken in Kurven dargestellt. Durch eine negative Gitterspannung von beispielsweise 5 V kann das Rohr bei einer Anodenspannung von 170 V gesperrt werden. Legt man an das Rohr eine sinusförmige Spannung, so gehört zu jedem Momentanwert a dieser Spannung eine kritische Gitterspannung b . Durch Übertragen der oberen Werte entstehen die Zündkennlinien Z für eine Wechselspannung u_a . Die Zündkennlinie oder auch kritische Gitterspannung genannt, kann positive und negative Werte haben, sie ist von der Konstruktion des Gefäßes, von der Spannungshöhe, von der Temperatur und der verdampften Hg-Dampfmenge abhängig, sie ändert sich auch während des Betriebes mit zunehmender oder abnehmender Belastung²⁾. Solange nach Bild 168 die Gitterwechselspannung u_g unterhalb des Schnittpunktes mit der Zündkennlinie, z. B. g oder c , bleibt, erfolgt keine Zündung der Bogenentladung des Hauptstromkreises. Sie setzt jedoch plötzlich ein, wenn bei weiterem Abfallen der Gitterspannung der Schnittpunkt erreicht ist. Um Unregelmäßigkeiten bei diesen Vorgängen zu überbrücken, sind daher Gitterschaltungen mit besonders steilem Anstieg u_s der Gitterspannungen entwickelt worden.

Im Interesse einer möglichst geringen Gitterbeanspruchung soll die kritische Gitterspannung in der Nähe des Arbeitsbereiches der Hauptanoden negativ

¹⁾ Der Streubereich im unteren Bildteil wurde von *W. Kluge* (AEG.-Mitt. 1939, H. 2) für eine Röhrenserie gleicher Größe angegeben.

²⁾ Vgl. auch *A. Glaser* u. *K. Müller-Lübeck*, Theorie der Stromrichter, S. 14, Berlin, Jul. Springer, 1935.

sein, weil das positive Gitter bei nicht gezündeter Hauptstrombogenentladung Elektronen anzieht. Das Gitter soll die Elektronen möglichst vor dem Einsetzen der Bogenentladung abstoßen. Bei der Konstruktion der Gefäße oder Röhren muß demnach auf die kritische Spannung Rücksicht genommen werden.

d) Die Steuerung bei Gitter- und Anodenwechselspannung (gittergesteuerte Gleichrichter)

Aus dem vorherigen Abschnitt ging hervor, daß der Zündeinsatz der Anodenströme bei dampf- oder gasgefüllten Entladungsgefäßen sicher beherrscht wird, dagegen kann eine einmal gezündete Entladung, also der fließende Anodenstrom, durch das Gitter nicht wieder zum Verlöschen gebracht werden. Der Wechselstrom hat jedoch die Eigenschaft, daß die Lichtbogenentladung nach dem Abklingen der Wechselstromhalbwelle selbsttätig erlischt. Diese Eigenschaft erst ermöglicht die sichere Kommutierung aller beschriebenen Stromrichter, auch wenn sie keine Steuergitter haben. Die Größe der Anodenströme wird demnach durch die Gittersteuerung in der Weise verändert oder reguliert, daß der Zündeinsatz der Wechselstromhalbwellen in Pfeilrichtung n oder ν (Bild 168) verschoben wird. Der durch die Zündung eingeleitete Stromfluß klingt von selbst auf Null ab, oder er wird bei Mehrphasengleichrichtern dadurch Null, daß eine benachbarte Anode eine höhere Spannung erhält, so daß die vorher arbeitende Anodenentladung gesetzmäßig erlischt.

1. *Die Gitterregelmöglichkeiten.* Es bestehen mehrere Möglichkeiten, den Zündeinsatz und somit die im Gleichrichter erzeugte Gleichspannung in ihrer Höhe zu regulieren. Bei sämtlichen Regelschaltungen wird jedoch die Veränderung des Zündeinsatzes zugrunde gelegt. Wie Bild 168 erkennen läßt, erfolgt der gesetzmäßige Zündeinsatz des Hauptanodenstromes bei den Schnittlinien g , c oder u_s der Gitterspannung. Die verschiedenen Regelanordnungen sind Ausführungen, um diese Schnittlinien in der Pfeilrichtung n bzw. ν verschieben zu können.

2. *Die Gitterregulierung durch Drehregler.* Mit einem kleinen Phasenschieber¹⁾ in Form eines Drehstrommotors, auch Induktionsregler genannt, ist diese Aufgabe verhältnismäßig einfach zu lösen, denn die Achse dieses Phasengreglers oder Schiebers wird zum Zwecke der Regulierung um einige Winkelgrade in ihrer Achslage verstellt. Bild 169 zeigt die Schaltung für einen Anodenstromkreis, ferner die Anoden- und Gitterspannungen in vier verschiedenen Stellungen der Phasendreherachse. Die Kurve u ist die Anodenspannung, J der Anodenstrom, u_G die Gitterspannung und u_k Zündkennlinie

¹⁾ DRP. 415910, AEG., Toulon.

des Gitters. Der im Schaltbild gezeigte Phasendreher gestattet die Verschiebung der Phasenlage der Spannung u_g gegen die Anodenspannung u . In den Kurven I bis IV sind die ausgesteuerten Anodenströme bei verschiedenen Zündwinkeln α wiedergegeben. Der Strom fällt somit allmählich vom Maximalwert I auf den Nullwert IV ab.

Aus den vier Kurvenscharen ist folgendes zu erkennen:

1. Durch allmähliches Verdrehen des Phasenschiebers läßt sich stufen- und kontaktlos jeder Zwischenwert vom vollen Stromfluß bis zur völligen Sperrung des Anodenstromes einstellen.

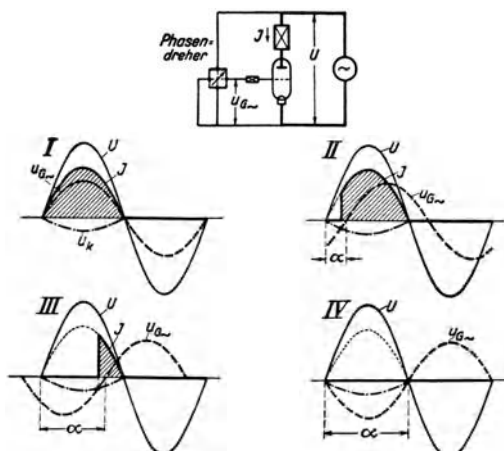


Bild 169. Steuerung durch Phasendrehung nach Toulon

2. Durch plötzliches Umschalten der Gitterspannung von Phasengleichheit (Pos. I) auf Phasenopposition (Pos. IV) ist das Entladungsgefäß ein Schaltapparat geworden, denn der Strom fließt in Pos. I in voller Größe und ist in Pos. IV völlig gesperrt.
3. Der an den Anoden vorhandene Wechselstrom wird selbsttätig Null, wenn die Anodenspannung sich der Nulllinie nähert, so daß die Löschung des Hauptlichtbogens sicher erfolgt.

Im Prinzip ist die Gitterregulierung hiermit definiert.

3. *Die Energieverhältnisse.* Bei den Verstärkerröhren wird das Verstärkerverhältnis ausgedrückt in Werten 1 : 5000 bis 1 : 10000, d. h. eine Gitterenergie im Werte von 1 ist imstande, eine Energie von 5000 bis 10000 zu steuern. Genau genommen kann man hier schlecht von einem Energieverhältnis sprechen, doch jeder Gitterkreis verbraucht durch die Gitterwiderstände eine bestimmte Energie, so daß dieser Übersetzungsausdruck eine gewisse Berechtigung hat. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei den Entladungsgefäßen, auch hier ist ein Drehregler von der Größenordnung 0,1 kW

im Schnittpunkt der Gittergleich- und Wechselfspannung. Das Umschalten von Stellung 1 auf 4 entspricht dem plötzlich völligen Öffnen oder Sperren der Lichtbogenentladung. Da dies in einfacher Weise durch einen Kontakt ausgeführt werden kann, eignen sich Schaltungen dieser Art gut für Entladungsgefäße, die Schaltzwecken dienen.

5. *Die steil ansteigende Gitterspannung.* Bei der Erläuterung der kritischen Zündspannung wurde erwähnt, daß sich deren Höhe bei den verschiedenen Belastungen ändert. Sie ist bei starker Belastung größer als bei kleiner Belastung. Somit wird beispielsweise nach Bild 168 der Anodenstrom des entlasteten Gleichrichters nicht mehr beim Zündverschiebungswinkel g , sondern erst beim Winkel c gezündet. Die Höhe der Änderung hängt von der Höhe und der Steilheit der Gitterspannung ug ab. Auch bei sehr hohen sinusförmigen Spannungshalbwellen ist noch mit einem schräg liegenden Anstieg zu rechnen, so daß beim Abnehmen der Belastung eine zusätzliche Veränderung der erzeugten Spannung zu erwarten ist. Diese kann unter Umständen erstrebenswert sein, trotzdem ist die Regelung mit einer mehr oder weniger schräg ansteigenden Gitterspannung etwas ungenau, denn die Hg-Gleichrichtergefäße ändern im Laufe der Zeit ihre kritische Spannung, so daß eine Änderung in der Stromaufnahme möglich ist. Ungleichheiten in der Zündcharakteristik und in der Stromaufnahme können auch eintreten, wenn ältere und neue Gefäße parallel arbeiten. Daher wurde angestrebt, eine steil ansteigende Gitterspannung zu erzeugen, die nach Bild 168 eine Zündung der Lichtbogenentladung stets auf der Senkrechten us ermöglicht.

6. *Der Phasendreher und die steile Gitterspannung.* Zu diesem Zweck werden zwischen Phasendreher und Steuergitter Mittel geschaltet, die der sinusförmigen Gitterwechselfspannung eine steile Form geben. Nach Bild 171 wird eine hochgesättigte Drosselspule, deren Querjoch beispielsweise aus Mu-Metall ¹⁾ aufgebaut ist, zur Erzeugung einer Spannungsspitze ausgenutzt. Die Phasendreherspannung wird an die Wicklung e_1 gelegt und die Wicklungen e_2 speisen die Gitterkreise. Das Oszillogramm Bild 171 zeigt die in der Wicklung e_2 entstehende Spannung. Für sechsphasige Gleichrichter sind drei der links gezeigten Transformatoren erforderlich. Die steile Form entsteht durch die große Permeabilität des Mu-Metalls, das eine Magnetisierungskurve mit scharfem Knick hat. Auch bei normalen Blechkernen würde durch eine Übersättigung eine gewisse Steilheit erzielt, doch reicht diese zu einer sicheren Steuerung nicht aus. Das Mu-Metall ist imstande, nach der erreichten Sättigung die Kraftliniendichte während nahezu einer Halbwelle konstant zu halten, sämtliche übrigen Kraftlinien, die vom größeren Nachbarkern aus durch den Mu-Kern strömen wollen, werden durch

¹⁾ H. Anschütz u. M. Stöhr, AEG.-Mitt. 1937, H. 5.

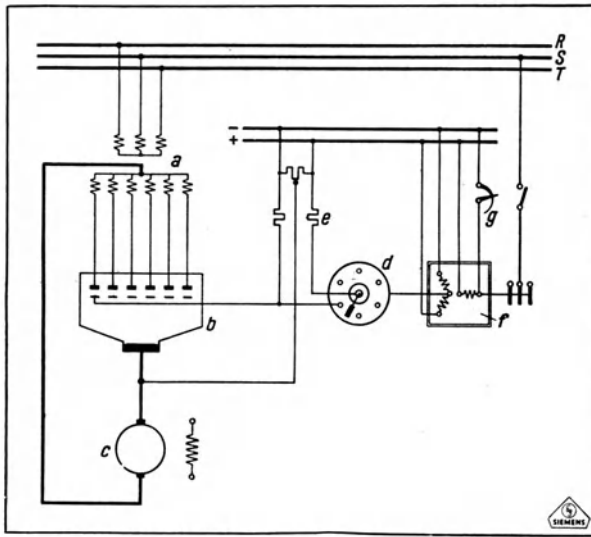


Bild 172. Stromrichter mit elektromechanischer Gittersteuerung
a = Haupttransformator, *b* = Stromrichter, *c* = Motor, *d* = Steuerscheibe, *e* = Widerstand,
f = Synchronmotor, *g* = Regelwiderstand

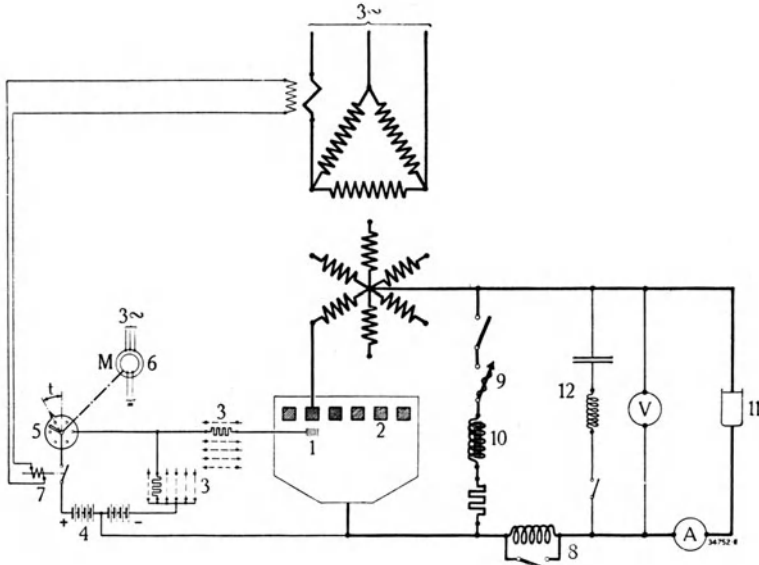


Bild 173. Einrichtung für die Spannungsregelung und Kurzschlußlöschung (BBC.)

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1 = Gitter, | 8 = Kathodendrosselspule mit Umgehungs- |
| 2 = Anoden, | schalter, |
| 3 = Gitterwiderstände, | 9 Kurzschlußvorrichtung, |
| 4 = Gleichstromquelle, | 10 = Drosselspule mit Eisenkern zur augen- |
| 5 = Kontaktgeber, | fälligen Anzeige des Kurzschlusses, |
| 6 = Synchronmotor zum Antrieb | 11 = Belastungswiderstand, |
| der Kontaktgeberbürste, | 12 = Umgehungsweg für die höheren |
| 7 = Überstromrelais, | Harmonischen. |

Kontakt ¹⁾ der Scheibe d schließt jedoch beim jedesmaligen Zündeinsatz den zur zündenden Anode gehörenden Gitterkontakt mit dem Pluspol der Gleichstromhilfsquelle kurz. Hierdurch wird das Gitter vorübergehend positiv geladen und der Anodenstrom freigegeben. Die Widerstände e dienen zur Begrenzung des Gittergleichstromes. Eine Verschiebung des Zündeinsatzes erfolgt durch Veränderung der Achslage des ständig umlaufenden Synchronmotors f , dessen 3 Schleifringe fest am Wechselstromnetz RST liegen. Die Gleichstromerregung des Motors besteht aus einem konstant und einem regelbar erregten Teil. Sobald der Regelwiderstand g verstellt wird, ändert sich die Feldstärke in der zugehörigen Wicklung. Gleichzeitig ändert sich das resultierende Feld um bestimmte Winkelgrade, also auch die Achslage des umlaufenden Systems. In einer ähnlichen Schaltung nach Bild 173 wird zum Zwecke der Spannungsregelung die Bürstenbrücke des umlaufenden Kontaktsystems 5 verschoben. Dies ist durch den Handhebel angedeutet. Die gleiche Wirkung entsteht durch die Anordnung eines Phasendrehers vor dem Synchronmotor, dessen Sekundärspannung zeitlich gegen die Spannung der Hauptanoden verschoben werden kann.

Durch die umlaufenden Kontakte entstehen an den Steuergittern steil ansteigende Spannungsänderungen vom größten negativen zum größten positiven Wert. Im Oszillographen werden zwischen den Gittern und Kathode Spannungsbilder ähnlich Bild 170 angezeigt, die einen sicheren Zündeinsatz ermöglichen. Mit solchen Steuereinrichtungen lassen sich auch andere interessante Aufgaben der Steuertechnik lösen, beispielsweise die Steuerung der weiter hinten beschriebenen Hüllkurvenumrichter.

8. Die magnetische Stoßsteuerung arbeitet nach Bild 174 ²⁾ ohne bewegliche oder umlaufende Schaltmittel. Die Wicklung 1 ist über Widerstände R_k an die verkettete Spannung der Sekundärwicklung des Stromrichtertransformators angeschlossen und Wicklung 2 über Regelwiderstände R_v an die Phasenspannung. Der Magnetisierungsstrom i_v hat daher gegenüber i_k eine Phasenverschiebung von 30 elektrischen Graden. Die Wicklungen 3 sind an die zugehörigen Gitter des Stromrichters angeschlossen. Eine Hilfsspannung, die aus einer Batterie d oder aus einem Trockengleichrichter gewonnen wird, liefert die negative Sperrspannung. Die Amperewindungen $i_k \cdot w_k$ und $i_v \cdot w_v$ (Bild 175) haben eine Phasenverschiebung von 150° , und dort, wo die beiden Ströme entgegengesetzt gleiche Größe erhalten, erfolgt durch das resultierende Feld eine plötzliche Kraftlinienänderung, so daß in der Wicklung 3, die an das Gitter angeschlossen ist, ein scharfer positiver Spannungsstoß entsteht. Hierdurch wird die betreffende Anode freigegeben. Ein gleich großer negativer Spannungsstoß entsteht um 180° verzögert.

¹⁾ Siemens-Zeitschr. 1933, Bd. 13; BBC.-Nachrichten 1932, H. 5.

²⁾ K. Baudisch, Siemens-Zeitschr. 1933, Bd. 13, Oktoberheft.

Das Bild zeigt Zündwinkel von 30 und 60°. Die Regelung, also die seitliche Verschiebung der Zündspitzen auf der Nulllinie erfolgt durch das gleich-

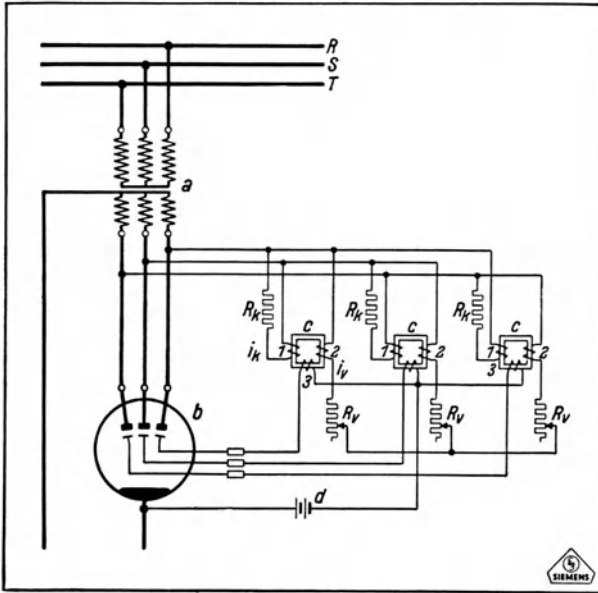


Bild 174. Schaltung der magnetischen Stoßsteuerung
 a Haupttransformator, b Stromrichter, c Steuertransformator, d Hilfsbatterie

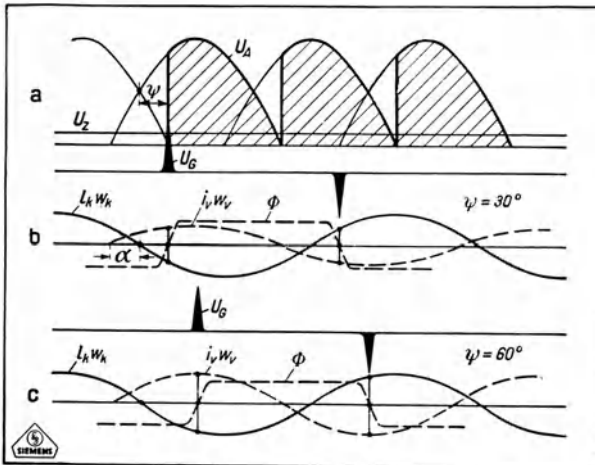


Bild 175. Wirkungsweise der magnetischen Stoßsteuerung

mäßige Verschieben der 3 Widerstände R_v . Eine oszillographische Aufnahme der Gitterspannung ist im Bild 176 dargestellt.

9. Die Zündkennliniensteuerung soll vorteilhaft für die sichere Steuerung von Stromtorröhren¹⁾ sein. Das Gitter U_{g1} , Bild 177, ist an das Netz b angeschlossen und erhält durch Kondensator C und Widerstand R eine fest eingestellte Phasenverschiebung gegenüber der Anodenspannung U_a , Bild 177 a. Das zweite Gitter U_{g2} wird Verlagerungsgitter genannt. Mit Hilfe des regelbaren Spannungsteilers Sp kann der Spannungswert der Zündkennlinie in den erkennbaren Grenzen geändert werden. Im Schnittpunkt beider Gitterspannungen

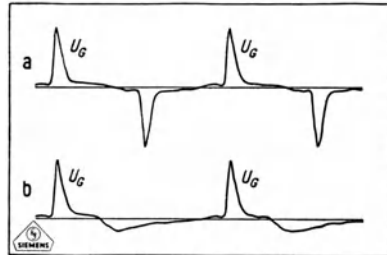


Bild 176. Magnetische Stoßsteuerung: Verlauf der Gitterspannung

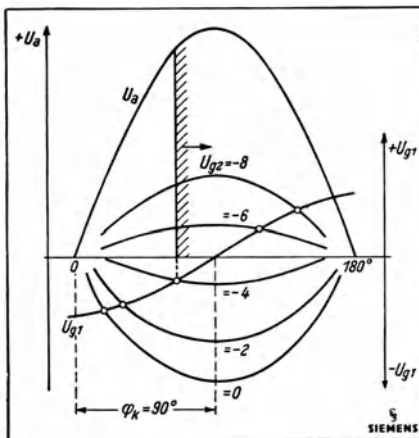


Bild 177 a. Zündkennliniendiagramm eines Doppelgitterstromrichters, Einfluß der Verlagerungsgittersteuerung auf die Zündkennlinie

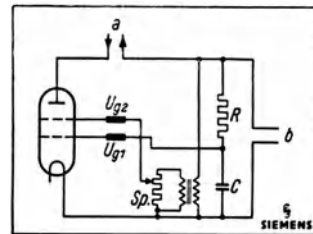


Bild 177 b. Schaltbild einer Regelanordnung mit Zündkennliniensteuerung a = zum Verbraucher, b = vom Netz

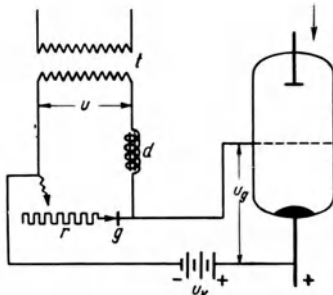


Bild 178. Gitterregulierung mit Steuerkreisgleichrichtern (BBC.)

t Steuertransformator, d = Drosselspule, r = Regelwiderstand, g = Sperrventil, u_g = Gitterspannung, u_v = Gittervorspannung

¹⁾ W. Jacobi u. H. Kniepkamp, Siemens Zeitschr. S. 197, Mai 1935.

gen setzt die Zündung des Hauptlichtbogens ein, so daß eine Regelung von 0 bis 180° möglich ist. Wie die Kurvenschar erkennen läßt, ist die Spannung U_{g_2} des Überlagerungsgitters zum Teil positiv gegen die Nulllinie, hierdurch wird jedoch nach K. Baudisch der Sperrinfluß der beiden Gitter nicht gestört.

10. Die Stoßsteuerung mit einem regelbaren Wechselstrom und in Reihe geschaltetem Steuerkreisgleichrichter. Die Schaltung für einen Hauptanodenkreis zeigt Bild 178. Der Regelwiderstand r , Drosselspule d und ein kleiner Gleichrichter g sind in Reihe geschaltet und werden von einem Transformator t gespeist. Beim Verändern des Regelwiderstandes ändert sich die Phasenlage des Gitterkreises und die Größe des Stromes. Wie die Kurven erkennen lassen, wird der Stromanstieg durch die Drosselspule

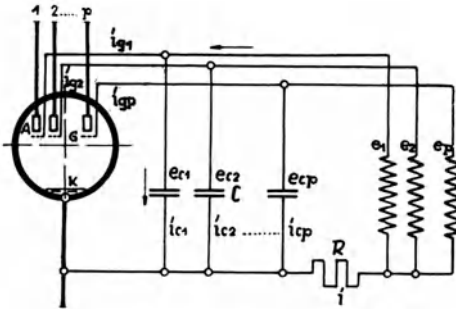


Bild 179. Dämpfungssteuerung (ELIN.)
 e_1, \dots, e_p = Gitterspannung, C = Dämpfungskondensatoren, G = Steuergitter, R = Regelwiderstand

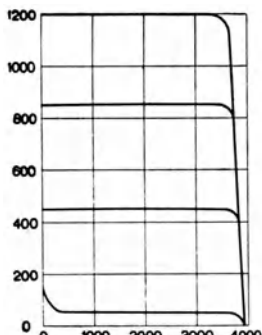
folgerichtig nachgeschleppt. Dies entspricht der normalen Phasenverschiebung in Wechselstromkreisen. Der Steuerkreisgleichrichter jedoch sperrt den Stromfluß in einer Richtung, infolgedessen schwingt sich die Stromhalbwelle i mit dem angefangenen Verschiebungswinkel nicht in einen Dauerzustand ein, sondern fällt bei jedem Stromimpuls auf Null zurück. Die beim Stromfluß

verschobene Spannung u_g erhält sodann plötzlich den Wert der nicht verschobenen Normalspannung u , so daß eine steile Wand u_s entsteht, die mit Hilfe einer Gittervorspannung u_v mit der Zündkennlinie in den richtigen Zusammenhang gebracht wird. Die zeitliche Verschiebung in beiden Pfeilrichtungen erfolgt durch Verstellen des Regelwiderstandes r , also durch Veränderung der Stromgröße i . Für die Steuerkreisgleichrichter werden Glühkathodenröhren oder Trockengleichrichter verwendet.

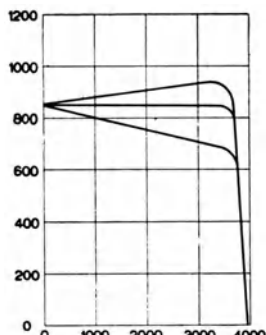
11. Die Dämpfungssteuerung. Die Dämpfungssteuerung beruht im Prinzip auf der durch einen vorgeschalteten Widerstand verzögerten gedämpften Ladung und Entladung eines zur Ventilstrecke Gitter-Kathode parallel geschalteten Kondensators. Je nach der Größe der Dämpfung, die durch die Veränderung des Regelwiderstandes R , Bild 179, einstellbar ist, wird der Zeitpunkt, in dem die Gitterspannung von negativen Werten aufsteigend Null erreicht, früher oder später eintreten und damit der Zündmoment verändert. Die Dämpfungssteuerung wird in zwei Arten ausgeführt, und zwar wird entweder jedem Gitter sein eigener Regelwiderstand

zugeordnet oder für mehrere Gitter ein gemeinsamer Widerstand vorgesehen. Die erste Art wird als Phasensteuerung, die zweite als zwei- oder mehrphasige Nullpunktssteuerung bezeichnet¹⁾. Es ist möglich, Phasensteuerung und Nullpunktssteuerung auch zu gemischten Steuerverfahren zu kombinieren.

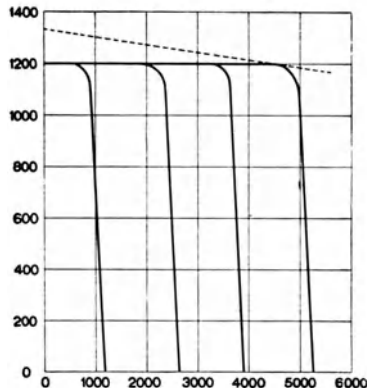
Die mit den soweit beschriebenen Regelverfahren möglichen Regelgrenzen sind in ihrer Spannungs- und Stromabhängigkeit im Bild 180 in Kurven



A = bei verschiedenen Einstellungen der Spannung



B = bei verschiedenen Einstellungen der Kompoundierung



C = bei verschiedenen Einstellungen der Strombegrenzung

Bild 180. Spannungs- und Stromkennlinien eines gittergesteuerten Gleichrichters (Lamm, ASEA.)

dargestellt²⁾. Die markanten Eigenschaften sind die Regelung der Spannung von Null bis zum Sollwert und die Strombeeinflussung durch Kompoundierung bzw. durch Stromregelung. Der Fortschritt besteht außerdem in der Anwendung kleinster Steuerapparate zur Erreichung der im Bild 180 gezeigten Grenzen.

¹⁾ A. Micza, E. u. M. 1934, H. 40.

²⁾ Lamm, ASEA. Nr. 4891/815.

e) Die historische Entwicklung der Gittersteuerung

Nach der Erfindung des Hg-Dampfgleichrichters durch *Cooper Hewitt* haben sich namhafte Physiker mit der Steuermöglichkeit von Strömen in evakuierten Gefäßen beschäftigt. Man erkennt aus der Patentliteratur eine gewisse Parallele zwischen der Entwicklung der Rundfunkverstärkerröhren und den Gleichrichtern, wobei zu beachten ist, daß die ersten gesteuerten Röhren noch kein Hochvakuum besaßen, weil es zu der Zeit wegen Mangel an guten Pumpen und Reinigungsverfahren nicht möglich war, ein Vakuum nach heutigem Maßstab herzustellen, um eine einwandfreie Steuerung ausführen zu können. Da die Gittersteuerungen der Stromrichter und die der Rundfunkverstärkerröhren verwandt sind, ist es unerlässlich, auf einige ältere Ideen einzugehen.

Das Bild 181 zeigt einen Röhrenverstärker von *Cooper Hewitt* mit flüssiger Hg-Kathode. Die Beeinflussung des Lichtbogens erfolgt durch eine Magnetspule 5, die vom Mikrophon 4 beeinflusst wurde. Im Jahre 1904 erfand *Wehnelt* die mit Oxyden pastierte Glühkathode, und 1906 meldete *Lieben* sein erstes Röhrenpatent an, nach dem die Röhre eine oxydierte Kathode und einen außen sitzenden Steuer magneten besaß. Hier wurde zum erstenmal der Kathodenstrahl gesteuert. Etwa gleichzeitig meldete *de Forest* ein Patent in den USA. an, nach dem eine Elektrode den Stromkreis von Anode nach Kathode beeinflussen soll. In der gleichen Zeit wurden noch Vorschläge ähnlicher Art von anderen Erfindern gemacht. So entstand 1910 das zweite, wichtigere *Lieben*-Patent DRP. 249142. Nach diesem wird eine Glühkathodenröhre mit einer Oxydkathode, ein den ganzen Röhrenquerschnitt ausfüllendes Steuergitter und eine Hg-Dampffüllung mit einem Druck von etwa 0,001 Torr verwendet. Die Röhre arbeitete angeblich für die Verstärkung von Telegraphieströmen gut, doch bereitete die Änderung des Dampfdruckes bei wechselnden Temperaturen Schwierigkeiten. Daher wurde in der späteren Entwicklung die Hochvakuumröhre angestrebt.

Kaum war jedoch die Hochvakuumröhre in ihren ersten Anfängen vorhanden, da entstanden neue Ideen, um den hohen Spannungsverlust der Hochvakuumröhren zu verringern und die Kathodenheizung zu sparen. Verschiedene Forscher versprachen sich Vorteile von den gesteuerten Glimmlichtverstärkerröhren. Im Bild 181 sind verschiedene Ausführungen schematisch dargestellt ¹⁾. Die Erfinder versuchten ohne geheizte Kathode auszukommen, doch als die Kathodenlebensdauer durch die in den letzten Jahren erfolgten Verbesserungen wesentlich erhöht werden konnte, wurden die Versuche in dieser Richtung mehr oder weniger aufgegeben. In der neuesten Zeit hat *Nienhold* ²⁾ durch außerordentlich kurze Abstände zwischen den

¹⁾ Von *C. Braband* zusammengestellt.

²⁾ ETZ. 1938, H. 13, S. 329.

der Zündverschiebung verstellt wird. In den Gefäßen wurde jedoch kein Erregerlichtbogen aufrechterhalten, sondern jede Stromhalbwelle mußte mit Hilfe des Anlaßbandes neu gezündet werden. Diese Schaltanordnung

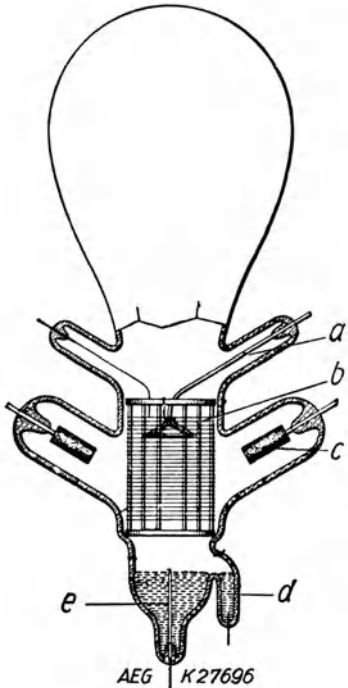


Bild 183. Erstes Gleichrichtergefäß mit eingebautem Steuergitter von Langmuir (1914)
 a = Erregeranode, b = Gitter, c - Hauptanode, d Zündanode, e Kathode

wurde in neuester Zeit mit der wesentlich sicherer arbeitenden Ignitronzündung in den USA. wieder aufgegriffen. Als dann später der Einfluß in die Lichtbogenbahn eingesetzter Steuergitter auf die Lichtbogenentladung bekannt wurde, entstanden noch weitere Erfindungen, um mit Hilfe von Steuergittern die Rückzündungen zu vermeiden, doch dienten die Gitter nicht zu Regelzwecken.

Erst Langmuir hat 1914 die erste grundlegende Schaltung zum Regeln der Betriebsgröße angegeben, die durch das DRP. 294641 bekannt wurde. Zwischen Anode a und Kathode e , Bild 183, wird ständig ein Lichtbogen aufrechterhalten. Mit Hilfe des Gitters b wird der Hauptlichtbogen in Abhängigkeit von der Gitterspannungshöhe beeinflusst und der Zündensatz verändert. Bild 184 zeigt in Gegenüberstellung die drei Grundformen der Regelarten. In der Kurvenschar ist der Einfluß der Gitterspannungshöhe P_{g1} und P_{g2} auf den Zündensatz der Anodenspannung U_A erkenntlich.

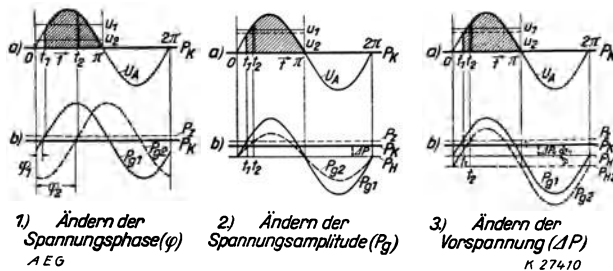


Bild 184. Arten der Gittersteuerungen

Die Regelung nach Ausführung 1 erfolgt durch einen Phasendreher, sie wird nach dem Erfinder Toulon-Steuerung genannt. Ausführung 3 entspricht der Regelung bei fester Phasenlage des Wechselstromes durch veränderliche Gittergleichspannung. Der Erfinder ist G. W. Müller, und

Ausführung 2 erläutert den Vorschlag von *Langmuir*. Wenn auch mit der *Langmuir*-Steuerung Regelungen in weiten Grenzen ohne eine zusätzliche Phasenverschiebung nicht ausführbar sind, muß sie immerhin als die erste brauchbare bekannte Schaltung zum Regeln der Spannung in Gleichrichtern mit Hilfe von Steuergittern bezeichnet werden. Gleichzeitig mit der Entwicklung der in der Lichtbogenbahn sitzenden Steuergitter wurde auch verschiedentlich versucht, den Lichtbogen durch in der Nähe der Bogenentladung angeordnete Magnetfelder zu steuern. *Fr. Hellmuth* berichtete ¹⁾ über einen Versuch, bei dem die Anode von einer Hülle umgeben ist, um das steuernde Magnetfeld in seiner Wirkung zu unterstützen.

f) Die Löschung einer Lichtbogenentladung zur Leistungsfaktorverbesserung

Durch die einseitige Sperrung von Teilströmen einer Halbwelle entsteht eine Leistungsfaktorverschlechterung. Daher wurden von verschiedenen Seiten Versuche unternommen, den einmal eingeleiteten Anodenstrom nach Belieben wieder löschen zu können. Es ist der von *Marx* in der ETZ., 1938 ²⁾ veröffentlichte Vorschlag erwähnenswert. Nach diesem dient ein Löschkondensator, Bild 185, dazu, den Lichtbogen vor der gesetzmäßigen Zeit zu unterbrechen, um den Leistungsfaktor zu verbessern. Nach dem Verlöschen speist der Kondensator seine aufgespeicherte Energie in das Gleichstromnetz. Für alle Phasen ist nur ein Kondensator vorhanden. Häufig werden auch Kondensatoren als Phasenschieber in das Wechselstromnetz geschaltet, um einen sinngemäß voreilenden Strom zu erhalten. Diese Aufgabe kann in idealer Weise jedoch nur gelöst werden, wenn es steuertechnisch gelingt, den Lichtbogen beliebig zum Verlöschen

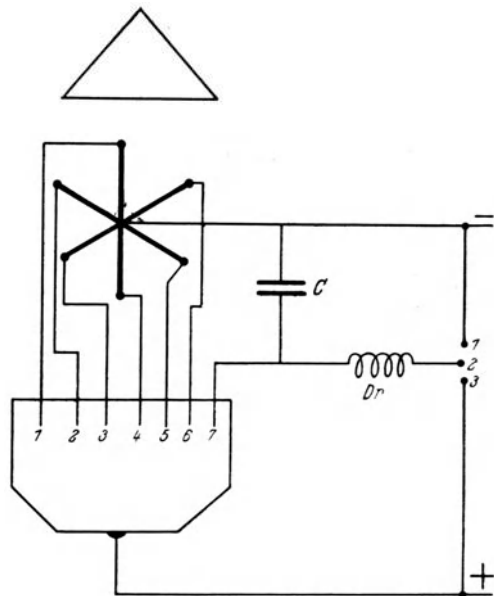


Bild 185. Anordnung eines Kondensators zur Blindstromverringernach Prof. *Marx*
 1 -- Wechselrichterbetrieb, 2 - Neutral, 3 - Gleichrichterbetrieb

¹⁾ Magnetische Steuerung von Lichtbogen, *Helios* 1938, S. 845.

²⁾ H. 14, S. 359. Vgl. auch *Babat*, *J. Inst. electr. Eng.* **82**, 1938; ferner *ETZ.* 1939, H. 11.

zu bringen. *E. Kobel*¹⁾ hat vor einigen Jahren Versuche ausgeführt, die bei Verwendung neuartiger Anodenrohre und Steuergitter einen Fortschritt zeigten. Aus den verschiedenen Versuchen geht hervor, daß die Wissenschaftler ständig damit beschäftigt sind, das Problem der idealen Gittersteuerung für Entladungsgefäße zu lösen, dann lassen sich offenbar Gitterschaltungen bei gutem Leistungsfaktor auch wesentlich vereinfachen.

g) Die Wirkungsweise und Schaltungen der Wechselrichter

Die Schaltungen aller Stromrichter müssen so durchgeführt sein, daß der Stromfluß stets in der Richtung Anode—Kathode erfolgt. Bei der Betrachtung der Steuerung in Stromrichtergefäßen ist darauf zu achten, daß die Gittersteuerung nur den Zündensatz der Anodenströme zu steuern vermag. Das Verlöschen bei der Kommutierung, also der Stromwechsel von einer Anode auf die andere, erfolgt bei Gleichrichtern selbsttätig mit dem Abklingen der Wechselstromhalbwellen auf den Nullwert, dagegen müssen bei Wechselrichtern Kunstschaltungen angewendet werden. Um den einmal fließenden Gleichstrom in Wechselrichtern zum Verlöschen zu bringen, werden Löschkondensatoren in einer sinnreichen Anordnung verwendet, die zuerst von *Prince*, USA. ²⁾ veröffentlicht wurde. Obwohl die Wechselrichter noch keine abgeschlossene Entwicklung zeigen, sollen sie trotzdem kurz gestreift werden, um sie in der Gesamtdarstellung der Stromrichter nicht fehlen zu lassen.

Je nach der Art der Steuerung gibt es:

Selbsterregte oder freie Wechselrichter.

Fremderregte Wechselrichter.

Netzgeführte Wechselrichter.

Der Rundfunkverstärker oder Sender ist ein fremderregter Wechselrichter.

1. Der fremderregte Wechselrichter. Das Bild 186 zeigt drei verschiedene Arbeitsvorgänge, um den Stromwechsel zu erläutern. Der Gleichstrom fließt vom Pluspol über eine Drosselspule in die Mitte eines Umspanners. Von diesem führt je eine Leitung an ein gittergesteuertes Entladungsgefäß. Die Kathoden der beiden Entladungsgefäße sind miteinander verbunden und führen zum Minuspol. Um aus dem Gleichstrom einen Wechselstrom zu erzeugen, muß der Gleichstrom abwechselnd durch die linke oder rechte Wicklung des Umspanners fließen, dann entsteht auf der Sekundärseite eine Wechselspannung. Der Rhythmus dieser Pulsationen wird durch Gittertransformatoren gegeben, die von einer beliebigen fremden Stromquelle gespeist werden. Eine wichtige Aufgabe erfüllt der Kommutierungs- oder Löschkondensator *C*. In der links gezeigten Schaltung sei beim Einschalten

¹⁾ BBC.-Nachrichten, Jan./März 1935, S. 28.

²⁾ ETZ. 1929, H. 25, S. 902.

das Gitter im Gefäß 1 positiv und in 2 negativ. Dann fließt der Gleichstrom über die linke Umspannerhälfte durch das Gefäß mit positivem Gitter, also durch Gefäß 1 zum Minuspol. Hierbei lädt sich der Kondensator C auf. Durch den Stromfluß in Röhre 1 bricht die Gleichspannung an ihr auf den Lichtbogenabfall von 10 bis 15 V zusammen. An Röhre 2 besteht jedoch eine Spannung in der Höhe der Netzspannung und beim eingeschwungenen Wechselrichter in doppelter Höhe. In der mittleren Schaltung hat das Gitter 1 ein negatives und 2 ein positives Potential. Hierbei zündet auch die Röhre 2 und es fließt für kurze Zeit der Strom durch beide Röhren. Gleichzeitig entlädt sich der Kondensator C über Gefäß 2 und 1. Der Strom fließt also stoßartig dem Lichtbogen

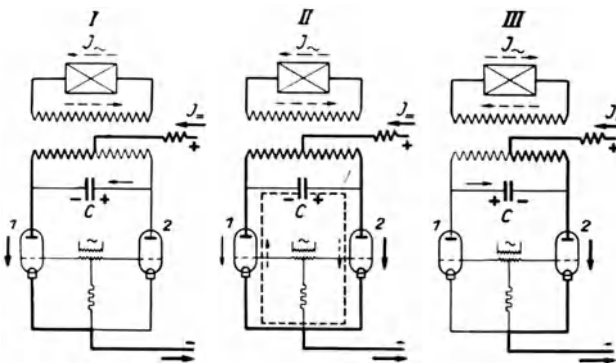


Bild 186. Der Stromverlauf in Wechselrichtern
 I = Stromfluß im Rohr 1, II = Kommutierung, III = Stromfluß im Rohr 2

entgegen, wodurch der Lichtbogen erlischt. Eine Wiederzündung ist nicht möglich, weil das zugehörige Gitter negative Spannung hat. Demnach fließt der Betriebsstrom im rechten Bild durch Gefäß 2 zum Minuspol. Während dieser Stromhalbwellen lädt sich der Kondensator C umgekehrt auf. Beim nächsten Wechsel entsteht der analoge Löschvorgang für die Röhre 2 usw. Die Periodenzahl des erzeugten Wechselstromes ist von der Periodenzahl der Gitterwechselspannung abhängig und kann leicht geändert werden, weil die Gitterleistungen gering sind. Die Drosselspule im Gleichstromkreis soll im Gegensatz zur Gleichrichter-drosselspule Bild 8 nicht glätten, sondern die rechteckförmigen Stromimpulse der Sinuskurve anpassen. Auch ist sie für den Kommutierungsvorgang erforderlich.

2. Der selbsterregte oder freie Wechselrichter. In Bild 187 ist die Prinzipschaltung¹⁾ und Kurvenform der erzeugten Wechselspannung bei Ohmscher und induktiver Last zu erkennen. Die Kurvenform ist von den Blind- und Wirkwiderständen der Belastung des Wechselstromnetzes abhängig. Im

¹⁾ H. Laub, E. u. M., Wien 1932, H. 22 u. 23.

Gegensatz zu fremderregten entsteht die Gitterwechselspannung im selbst-erregten Schwingungskreis $u-R-C$, dessen Frequenz durch den Regelwiderstand R geändert werden kann. In dieser Anordnung eignet sich ein Wechselrichter zur Drehzahlregelung eines frequenzabhängigen Wechselstrommotors. Der Spannungsteiler des Schwingungskreises sitzt als dritte Wicklung auf dem Hauptumspanner. Das Diagramm zeigt schematisch die Änderungsmöglichkeit des Schwingungskreises, dessen Brücken-anordnung einem Phasendreher ähnelt. Der Einschaltstromstoß der Wechselrichter entspricht etwa dem 3- bis 5fachen Wert des Normalstromes; es dauert aber nur einige Halbwellen, bis der Wechselrichter auf

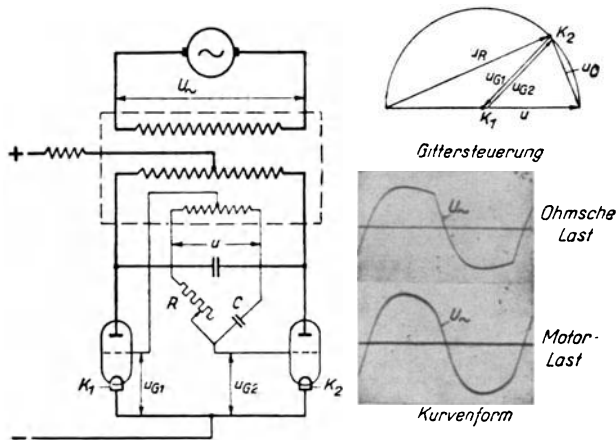


Bild 187. Selbst-erregter Wechselrichter mit Selbststeuerung
 $U-R-C$ = Selbst-erregter Gittersteuerkreis, R - Regelwiderstand zum Verändern der Frequenz

seine Normalfrequenz eingeschwingen ist. Der erste Einschaltstromstoß läßt sich durch einen Widerstand begrenzen, der nach einigen Sekunden mit Hilfe eines Umschalters überbrückt wird.

3. Die Speicherwechselrichter¹⁾ gehören zu den selbst-erregten Wechselrichtern, sie erhalten ihren Namen durch den Speicherkondensator. Der Wechselstromkreis verbraucht hierbei eine aus dem Gleichstromnetz fließende Energie, die beim Laden und Entladen des Kondensators auftritt. Wegen der Ventilwirkung der Entladungsgefäße können sich nur die Vorwärtshalbwellen von Lade- und Entladestrom ausbilden. Die Gleichspannung ist die treibende Spannung der ersten Halbschwingung des Ladestromes nach dem Einlegen des Gleichstromschalters. Die Speicherwechselrichter erinnern an Kippschwingschaltungen, die ebenfalls zur Erzeugung einer Wechselspannung benutzt werden. Sie werden mit Hochvakuumröhren und

¹⁾ Jahrbuch d. F. J. der AEG. 1931/32, S. 23 - 46; insbesondere F. Hauffe, Arch. f. El. 1935, Bd. 39, S. 395 - 416.

Steuergittern zur Erzeugung von Schwingen bestimmter Frequenz für den Bildfunk benutzt. Es lassen sich auch Kippschwingungen mit gasgefüllten Röhren, beispielsweise mit Glimmgleichrichterröhren, ohne Steuergitter erzeugen ¹⁾).

4. *Die netzgeführten oder netzerregten Wechselrichter.* Am einfachsten arbeiten wohl die netzerregten Wechselrichter. Wie der Name sagt, werden sie von einem zweiten Wechselstromnetz abhängig gemacht, in das sie Strom liefern sollen. Dies muß jedoch von einer Kraftquelle einer gegebenen Phasenzahl, Spannung und Periodenzahl, gespeist werden, es muß also ein Netz sein, das unter Spannung steht und mit mindestens der Energie belastet ist, die vom Wechselrichter in das Netz geschickt wird, sonst treibt der Wechselrichter den Netzgenerator als Motor an. Mit Rücksicht auf den Blindstrom, der im Wechselstromnetz hin und her fließt, muß der Netzgenerator auch groß genug sein, den Netzblindstrom zu übernehmen, denn der Wechselrichter kann den Blindstrom nicht ohne weiteres übernehmen, weil infolge der Ventilwirkung der Strom nur in einer Richtung fließt. Jeder Gleichrichter, der eine Gitterregulierung in den Regelgrenzen von 0 V bis zum Höchstwert hat, läßt sich als Wechselrichter betreiben, um aus dem Gleichstromnetz Energie in das unter Spannung stehende Wechselstromnetz zu liefern. Die Aufgabe des Löschkondensators übernimmt das spannungsführende Wechselstromnetz.

Der Gleichstrom soll beim idealen Wechselrichter nur fließen, wenn die Wechselspannung an den Arbeitsanoden negativ ist, im Gleichrichterbetrieb dagegen muß die Spannung an den Anoden beim Stromfluß aus dem Wechselstromnetz positiv sein. Der Wechselrichter ist demnach das Spiegelbild eines Gleichrichters, denn es fließen beim Wechselrichter sinngemäß Stromimpulse aus dem Gleichstromnetz über den Umspanner ins Wechselstromnetz. Diese an sich rechteckigen, kurzzeitigen Ströme erhalten durch eine in den Gleichstromkreis geschaltete Drosselspule eine sinuskurvenähnliche Form. Durch die Verwendung einanodiger Stromrichter in Graetz-Schaltung ²⁾ besteht die Möglichkeit, einen Wechselrichter ohne Zwischenumspanner zu betreiben.

Das bekannteste Anwendungsgebiet für netzgeführte Wechselrichter ist der Leistungsaustausch mit einem Stromrichter in beiden Stromrichtungen. Der Richtungswechsel ist im Bild 188 ³⁾ dargestellt. In Anordnung I besteht Gleichrichterbetrieb. Der Strom fließt aus dem Wechselstromnetz über die Stromrichtergefäße in die Batterie. Den Wechselrichterbetrieb zeigt Anordnung II. Die Pfeile und Vorzeichen lassen die Umkehrung erkennen.

¹⁾ Vom Verfasser in einem Versuch durchgeführt.

²⁾ R. Tröger, Elektr. Bahnen 1932, H. 3.

³⁾ H. Laub, ETZ. 1933, H. 29. Vergleiche auch K. Baudisch u. W. Leukert, ETZ. 1936, H. 45.

Der markante Unterschied ist die Umpolung des Gleichstromkreises, was im praktischen Betrieb durch Umschalter erfolgt. Die unerläßliche Drosselspule U_D im Gleichstromkreis nimmt die Differenzspannung U_D zwischen der kommutierten Sinusspannung U_T und der konstanten Gleichspannung U_{\pm} auf. Nach der Umpolung der Gleichstromquelle erfolgt Wechselrichterbetrieb. Die Batteriespannung hat jetzt das umgekehrte Vorzeichen wie vorher. Während der nicht arbeitenden Halbwelle befindet sich an der zugehörigen Anode eine sinusförmige Umspannersekundärspannung mit positivem Potential, diese Anode muß daher durch eine negative Gitterspannung gesperrt werden; dagegen führt die gegenüberstehende zweite

Anode während dieser Zeit Strom und hat negative Wechselspannung. Die Unterschiede zwischen Gleich- und Wechselrichterbetrieb gehen am besten aus den Kurven *b* und *c* hervor. Der Strom fließt in beiden Fällen im gleichen Rhythmus der Pulsationen, die von der Netzfrequenz bestimmt werden.

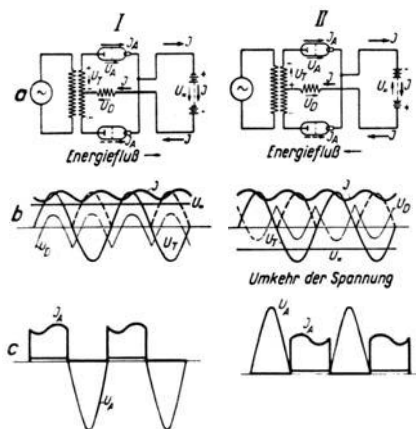


Bild 188. Netzerregter Wechselrichter (AEG.)
I = Gleichrichterbetrieb, II = Wechselrichterbetrieb

5. Die Kommutierung beim Wechselrichter. Bisher war bei allen Wechselrichtern angenommen, daß die Kommutierung stets im Nulldurchgang der Wechselspannungen erfolgt. Durch die Induktivität im Wechselstromkreis¹⁾ und durch die Einhaltung der Entionisierungszeit muß die Kommutierung im

praktischen Betrieb jedoch bereits vor dem Nulldurchgang beendet sein. Nach Abschnitt 12 b klingt der Anodenstrom eines Gleichrichters langsam ab und erlischt in der Zeit des Überlappungswinkels, der von der Größe der Induktivität des Stromkreises abhängt. Im Bild 189 sind die Vorgänge am netzgeführten Wechselrichter beim Stromübergang von einer Anode auf die andere — für Gleich- und Wechselrichterbetrieb — in Kurvenform erkennbar. Die Verhältnisse sind im Gleichrichterbetrieb einfacher. Beide Anoden arbeiten während des Überganges von t_1 — t_2 parallel, die eine mit abklingendem, die andere mit ansteigendem Strom. Beim Wechselrichterbetrieb ist der Verlauf der abklingenden und ansteigenden Kurven umgekehrt, weil die Stromrichtung um 180° verschoben ist. Um den Strom

¹⁾ R. Glaser u. K. Müller-Lübeck, Theorie der Stromrichter. Berlin, Jul. Springer, 1936.

einer Anode beim Gleichrichterbetrieb zu verlöschen, steht die große Zeit bis zum nächsten Arbeitsvorgang zur Verfügung, die jedoch bei wachsenden Strömen kürzer wird, so daß eine Überlappung aller Anodenströme beim Kurzschluß zu erwarten ist. Für den Wechselrichter dagegen steht nur die viel kürzere Zeit von etwa t_1-t_3 zur Verfügung, auch ist zu beachten, daß der Überlappungswinkel t_1-t_2 mit wachsender Belastung größer wird und das Verlöschen des abklingenden Arbeitsstromes verzögert. Wenn der Strom der Arbeitsanode bei t_3 nicht erloschen ist, fließen während der nächsten Halbwelle beide Anodenströme und der Wechselrichter fällt

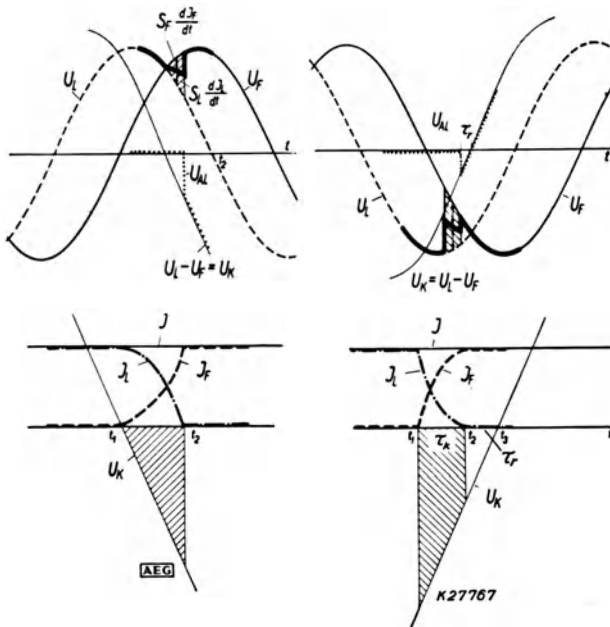


Bild 189. Die Kommutierung mehrphasiger netzgeführter Wechselrichter

U_L = Anodenspannung der Arbeitsanode, U_F = der Folgeanode, U_K = Gitterspannung,
 J_L = abklingender Strom, J_F = ansteigender Strom, t_1-t_2 = Überlappungswinkel,
 $t_1-t_2-t_3$ = Bedingter Voreilwinkel zum sicheren Verlöschen der Arbeitsanode

durch Kurzschluß aus. Um das Verlöschen zu erzwingen, wird die Gitterspannung U_K so einreguliert, daß der Zündeinsatz der Folgeanode vor dem Verlöschen der Arbeitsanode etwa bei t_1 erfolgt. Beide Anoden arbeiten dann kurzzeitig parallel, die Folgeanode jedoch mit höherer Spannung, so daß die Arbeitsanode bei t_2 gesetzmäßig erlöschen muß. In der Zeit von t_2-t_3 muß der Lichtbogenweg entionisiert sein. Durch das frühzeitige Öffnen der Gitter fließt zusätzlich in Gleichrichterwirkung ein schnell auf Null abklingender Stromstoß aus dem Wechselstromnetz ins Gleichstromnetz zurück. In derselben Richtung fließt jedoch der ebenfalls frei-

gegebene Betriebsgleichstrom durch die Folgeanode und liefert Strom ins Wechselstromnetz. Der Stromübergang auf die nächste Folgeanode erfolgt in der gleichen Weise. Bild 190 zeigt ein Oszillogramm der geschilderten Vorgänge analog Bild 189. Eine Verschiebung der Gitterspannung zur Phasenlage der Hauptanodenspannung verändert den Zündwinkel und gestattet eine Regelung der Wechselrichterleistung und Spannung. Diese Regelvorgänge entsprechen der Gitterregulierung an Gleichrichtern. Der kurzzeitig in Gleichrichterwirkung fließende Stromstoß wird zusätzlich zum Löschen der Arbeitsanode benutzt. Er ist klein im Verhältnis zum Arbeitsstrom, auch wird der Stromstoß in einem Zähler nicht gemessen, denn er führt einen Kreislauf aus und wird im Gleichstromnetz wieder nutzbar gemacht. Mit Rücksicht auf die komplizierten Kommutierungsvorgänge werden Stromrichtergefäße für Wechselrichter etwa 30% größer gewählt

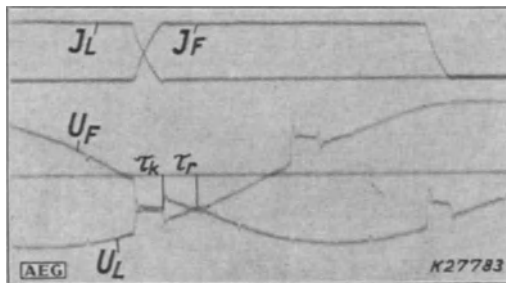


Bild 190. Oszillogramm der Kommutierung eines Dreiphasen-Graetz-Wechselrichters

als für Gleichrichterbetrieb. Auch in der Charakteristik ist der Wechselrichter ein Spiegelbild¹⁾ vom Gleichrichter, denn die Gleichspannung steigt in Wechselrichterbetrieben mit zunehmender Belastung nach Bild 195 an.

6. Berücksichtigung der Entionisierungszeit in der Lichtbogenbahn. Bei Wechselrichtern müssen nach Bild 189 Mittel vorgesehen werden, um ein Neuzünden der erloschenen Anode zu verhindern; es muß eine Zwischenzeit bestehen, in der sich die Entladungsbahn entionisieren kann. Diese Aufgabe erfüllt für nicht netzgeführte Wechselrichter der Löschkondensator im Bild 186. Er muß den Lichtbogen früher zum Verlöschen bringen, ehe die zugehörige Anodenspannung positiv wird. Daher muß der Löschkondensator so groß sein, daß seine Aufladezeit länger andauert, als die Entionisierung der erloschenen Entladungsbahn erfordert. Die Anodenspannung wird nach dem Erlöschen durch den entladenen Kondensator zuerst kurzgeschlossen, dann lädt sich der Kondensator C allmählich auf und die Anodenspannung wächst wieder an, bis der Zündwert und später der Scheitelwert erreicht ist. In dieser Zeit müssen die Ionen aus der Entladungsbahn entfernt sein.

¹⁾ Glaser u. Müller-Lübeck, a. a. O., S. 283.

Die Kurvenform entsteht durch die Drosselspule im Gleichstromkreis. Diese bewirkt außerdem einen allmählichen Anstieg der Spannung und eine gewollte Zeitverzögerung zugunsten der Entionisierung. Die Drosselspule gehört neben dem Löschkondensator zur sicheren Funktion des Wechselrichters. Die wichtigere Aufgabe des Löschkondensators ist demnach die Kommutierung, daher wird er auch Kommutierungskondensator genannt. Er muß jedoch so groß bemessen sein, daß die Stromlöschung in jedem Falle sicher erfolgt.

Seine Größe ist demnach nicht nur durch die Löschenenergie sondern auch durch die Entionisierungszeit bestimmt. Diese beträgt 1 bis 20 % einer Halbwelle bei 50 Hz, das sind 0,0001 bis 0,0020 sec. Die Zeit hängt ab von der Temperatur, vom Dampfdruck und von der Art des Stromrichtergefäßes. Bei Überlastung ist die Entionisierungszeit größer.

Die Wechselrichter erzeugen mit Hilfe einer genügend großen Gleichstromdrosselspule eine Stromkurve, die nach den VDE.-Vorschriften nicht mehr als 5 % von der Sinuskurve abweicht.

7. Der Leistungsfaktor und Wirkungsgrad der Wechselrichter. Der Leistungsfaktor der Wechselrichter ändert sich beim Regeln der Last in ähnlicher Weise wie bei gittergesteuerten Gleichrichtern. Er ist am günstigsten, wenn die Kommutierung nach Bild 189 während der Zeit $t_1 - t_3 = 0$ erfolgt. Die Entionisierungszeit jedoch verlangt eine zusätzliche Verschiebung des Kommutierungseinsatzes um die Zeit $t_1 - t_3$, so daß der Strom eine zusätzliche Nacheilung erfährt. Je schneller ein Gefäß entionisiert werden kann, desto besser ist der Leistungsfaktor. Auch verschlechtern Reaktanzen der Umspanner, wie bei Gleichrichtern, den Leistungsfaktor. Die Schaltung der netzgeführten Wechselrichter weicht von den mit Gitterregulierung ausgerüsteten Gleichrichtern nicht ab. Um die Wechselrichter mit gutem Leistungsfaktor betreiben zu können, sollen sie wie Gleichrichter nur wenig angesteuert werden.

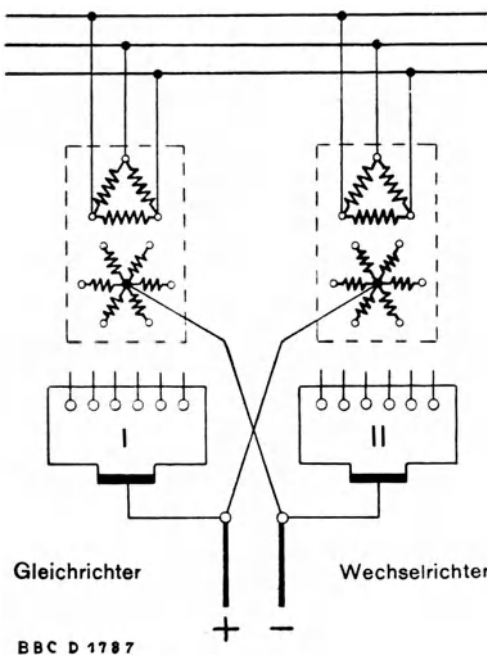
Der Wirkungsgrad ist bei Vollbelastung kaum geringer als der Wirkungsgrad im Gleichrichterbetrieb. Mit zunehmender Leistungsverminderung durch Gitterregulierung entsteht demnach analog zum Gleichrichterbetrieb eine Verminderung des Leistungsfaktors.

8. Die Blindleistungswechselrichter. Die bisher beschriebenen Ausführungen können einen in jeder Richtung hin und her fließenden Blindstrom nicht führen, weil die Ventilwirkung der Gefäße den Stromweg teilweise absperrt. Um den Blindstrom nicht zu unterbrechen, sind rotierende Synchronspeicher vorgeschlagen worden, die dem größten vorkommenden Blindstrom entsprechen müssen und die parallel zum Wechselstromnetz in Betrieb gehalten werden. In gleicher Weise läßt sich diese Aufgabe durch eine sinnreiche Anordnung mehrerer Stromrichtergefäße lösen, die nach einem Vor-

schlag von Professor *Petersen*¹⁾ für beide Stromrichtungen in Antiparallelschaltung vorgesehen werden. Mit dem Gleichstromkreis ist ein kleiner Wechselstromgenerator in Reihe geschaltet, dessen Wechselspannung mit der Gleichspannung addiert, als Taktgeber für den Wechselrichter benutzt wird. Sie wurden bis heute in der Praxis nicht eingeführt, daher sei auf die Literatur verwiesen.

h) Der Leistungsaustausch in beiden Stromrichtungen mit zwei Stromrichtergeräten

Durch die Gegentaktschaltung zweier gittergesteuerter Stromrichter, auch Kreuzschaltung, Ahterschaltung oder Antiparallelschaltung genannt, er-



BBC D 1787
Bild 191. Gleich- und Wechselrichter in Kreuzschaltung für Stromumformung in beiden Richtungen. (Grundschaltung für Umkehrbetriebe, wie Förderanlagen, Walzenstraßen usw. sowie auch Umrichter)

geben sich einige interessante Anwendungsgebiete; beispielsweise die Stromrückgewinnung und der Stromrichtungswechsel eines Netzes oder Motors. Bild 191 zeigt die Prinzipianordnung einer Kreuzschaltung, die zum Speisen einer Bahnanlage mit Gleichstrom benutzt werden kann. Das GleichrichtergeräÙ speist Gleichstrom ins Fahrnetz. Dagegen wird der Wechselrichter mit umgekehrtem Potential angeschlossen. Er liefert beim Talfahren von Straßenbahnwagen die in den Wagenmotoren erzeugte Energie in das Drehstromnetz zurück, wobei der Gleichrichter den Rückstrom selbsttätig absperrt. Über der Nulllinie Bild 192²⁾ ist die aus dem Gleichrichter ent-

nommene Leistung für die Wagenfahrten in der Ebene, oder beim Befahren von Steigungen und unter der Nulllinie ist die bei der Talfahrt in das Netz zurückgelieferte Leistung zu erkennen. Für den geringen Rückstrom wird zweckmäßig ein kleinerer Stromrichter verwendet. Auch werden bei

¹⁾ ETZ. 1932, H. 32, S. 773.

²⁾ K. Baudisch u. W. Leukert, ETZ. 1936, H. 45.

mehreren parallel arbeitenden Stromrichtern z. B. drei für den Vorwärtsstrom und nur einer für den Rückstrom eingeschaltet. Da die Talfahrt in vielen Anlagen nur zu gewissen Zeiten erfolgt, sind auch Schaltungen für einen einzelnen Wagenzug entwickelt worden, die einen Umschalter enthalten, der durch ein Differentialrelais gesteuert wird. Beim Beginn der Talfahrt entsteht eine Spannungserhöhung an den Wagenmotoren, die

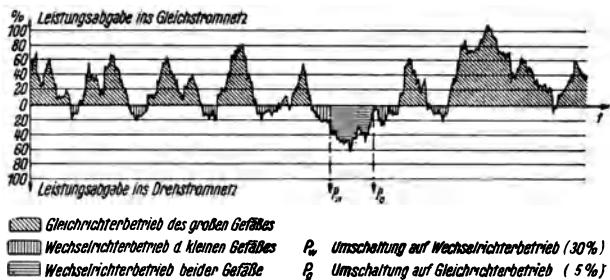


Bild 192. Über der Nulllinie Gleichrichterbetrieb, unter der Nulllinie Wechselrichterbetrieb

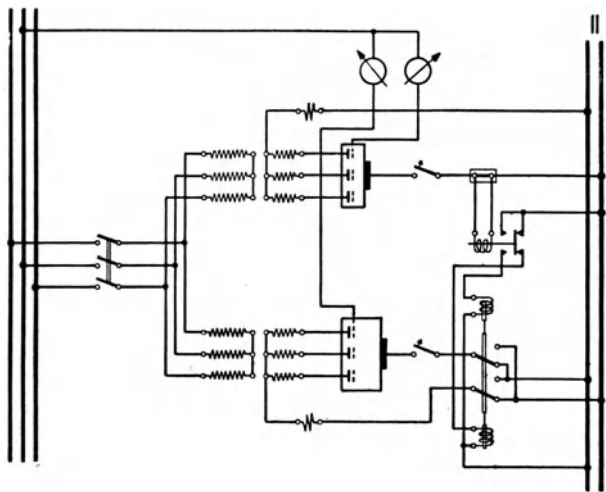


Bild 193. Stromrichterschaltung zum Leistungsaustausch im Bahnbetrieb. Der größere Gleichrichter speist den Strom in die Bahnmotore. Der kleinere Wechselrichter speist den Strom von den Bahnmotoren in das Drehstromnetz. (K. Baudisch u. W. Leukert, ETZ. 1936, H. 45)

zuerst das Differentialrelais beeinflusst und den Stromrichter auf Wechselrichterbetrieb schaltet, dann speisen die Wagenmotore bei der weiteren Talfahrt in das Netz zurück, bis der Wagen auf der Ebene anlangt. Das Differentialrelais hat eine Spannungsspule, die vom Wechselstrom- und Gleichstromnetz gespeist wird¹⁾. Je nach der Höhe der Gleichspannung schaltet

¹⁾ Vorschlag aus dem BBC-Konzern. Vgl. auch H. Kother, El. Bahnen 1939, Sept. S. 220; ferner A. Leuthold, ETZ. 1939, S. 1341 u. BBC-Nachr. 1938, S. 156.

das Relais den Stromrichter auf Wechselrichterbetrieb oder Gleichrichterbetrieb. Bild 193 zeigt die Schaltung zweier Gleichrichter, von denen der eine durch Händbetätigung oder Steuerorgane zeitweise auf Wechselrichterbetrieb umgeschaltet werden kann. Dies geschieht beispielsweise in Abhängigkeit von der Bahnnetzbelastung mit Hilfe eines Minimalstromrelais, das die Umschaltspulen sinngemäß beeinflusst.

1. Die Umkehrbetriebe. Ähnlich arbeiten auch Umkehranordnungen zum Speisen von Motoren mit Links- und Rechtslauf für Werkzeugmaschinen, Kran-, Förder- und Aufzugsbetriebe. Eine leicht verständliche Schaltung ist im Bild 194¹⁾ zu erkennen. Die aufgetragenen Kurven zeigen die Spannungs- und Stromvorgänge während der Kommutierung beim Gleichrichter und

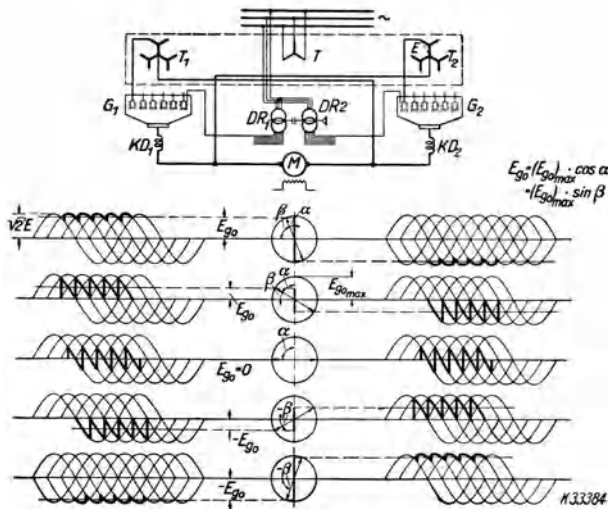


Bild 194. Umkehrstromrichter, Wirkungsweise der Gittersteuerung

Wechselrichterbetrieb ähnlich den Bildern 188 bis 189. Beide Stromrichtergefäße sind mit Steuergittern ausgerüstet. Ihre Drehregler DR_1 und DR_2 werden auf einer Achse vereinigt. Die Winkel α - β zeigen die jeweilige Stellung und die sich hieraus ergebenden positiven und negativen Spannungswerte E_{g_0} . In der Nullstellung sind die positiven und negativen Werte gleich, und der durch eine besondere Gleichspannung fremderregte Motor M steht still. Von dieser Nullstellung aus kann der Motor in beiden Drehrichtungen für jede Drehzahl bis zum Vollwert eingestellt werden. Beim Umsteuern einer Drehrichtung oder bei der Drehzahlerniedrigung speist der laufende Anker infolge seiner Schwungmasse, unterstützt durch die vom Motor bewegten Massen, Energie in das Drehstromnetz zurück und der Motor wird

¹⁾ A. Anschütz u. M. Stöhr, AEG.-Mitt. 1937, H. 5; W. Nowag, BBC.-Nachr. 1934, Juli/Sept.

hängigkeit von den Arbeitsvorgängen angetriebener Maschinen auszuführen. Wegen der großen magnetischen Remanenz der Feldwicklung arbeitet diese Schaltung träger als die des Bildes 194, weil bei diesen nur das kleinere Ankerfeld umgepolt wird. Feldumpolungen werden allenfalls für kleinere Motore verwendet oder für Antriebe, die eine längere Umpolungszeit gestatten.

2. Die Vernichtung der Rückströme und Überspannungen in Gleichrichteranlagen für Motorbetriebe. Sobald ein Gleichrichter allein einen Motor speist, der bei Entlastung zeitweise durch eine Schwungmasse oder durch eine nach abwärts schwebende Last als Dynamomaschine angetrieben wird, müssen Vorkehrungen getroffen werden, die hierbei erzeugte Energie oder Spannungsspitze zu verbrauchen oder unschädlich zu machen. Solche Einrichtungen sind erforderlich für Kran-, Förder- oder Aufzugsanlagen, in denen

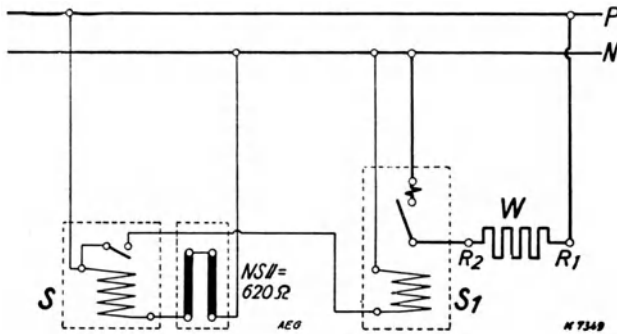


Bild 196. Prinzipschaltung für den Rückstromkreis
 P = Pluspol, N = Minuspol, R_1, R_2 = Widerstands-klemmen, S = Spannungswächter,
 S_1 = Zwischenschütz, W = Bremswiderstand

ein einzelner Motor mit Nebenschlußwicklung ohne mechanische Bremsvorrichtung arbeitet. Ferner Werkzeugmaschinen mit großen bewegten Massen, deren Drehzahl oft vermindert wird. Sehr kräftige Spannungsspitzen entstehen durch die Feldverstärkung an Gleichstrommotoren bei einer Drehzahlverminderung. Wenn von dem Netz gleichzeitig mehrere Motore gespeist werden, übernehmen andere Motoren die Energie des abzubremsenden Motors. Bei Einzelantrieben müssen jedoch Vorkehrungen getroffen werden, um die im Motor aufgespeicherte Energie verbrauchen zu können.

3. Die Widerstandschaltung mit einem Spannungswächter. Ein altes Hilfsmittel ist das Einschalten eines Widerstandes, der den Bremsstrom des Motors aufnimmt. Zu diesem Zweck wird nach Bild 196 ¹⁾ in den Gleichstromkreis ein Spannungswächter S geschaltet. Sobald die Gleichspannung

¹⁾ G. W. Müller, AEG.-Mitt. 1927, H. 7.

etwa 10 % über den Normalwert ansteigt, schließt der Wächter S seine Kontakte, die einen Belastungswiderstand W über Zwischenschütz S_1 solange einschalten, bis die Spannung ihren Normalwert wieder erreicht hat. In der Zwischenzeit wird der Motor M durch Widerstandsbelastung abgebremst und die Spannungsspitze vernichtet. Der Energieverlust dieser Anordnung ist zwar praktisch Null, denn der Stromstoß dauert nur einige Sekunden. Immerhin hat die Einrichtung eine gewisse Trägheit, so daß die Spannungsspitze bei schnellen Motorumschaltungen nicht unschädlich wird, was Durchschläge isolierter Bauteile und Betriebsstörungen im Gefolge haben kann.

4. *Der Bremswiderstand mit einer Relaisröhre.* Eine wesentlich kürzere Schaltzeit ist mit Relaisröhren erreichbar, da diese im Gegensatz zu den elektromagnetischen Wächtern nahezu masselos arbeiten. Aus Bild 197 ist die Anordnung ersichtlich¹⁾. Sobald ein Motor bei einem von Gleichrichtern gespeisten Netz im Leerlauf, beispielsweise durch das Senken einer Kranlast, eine höhere Spannung erzeugt als die Gleichspannung, wird diese Erhöhung auch im Gitterkreis $a-b-c$ wirksam. Das Gitter g der Röhre R , das im Normalbetrieb eine zur Kathode negative Spannung hat, wird hierdurch positiv und es fließt Strom durch Widerstand W , Spule S und Röhre R nach dem Minuspol. Gleichzeitig zieht Spule S den Anker K an, dessen Kontakte $O-P$ die Röhrenkreise überbrücken, so daß beim Absinken des Stromes und der Überspannung das Gitter wieder negative Spannung erhält, ehe Zeitrelais Z die Schützspule S unterbricht und die Kontakte $O-P$ wieder geöffnet werden.

Die Art dieser Gitterschaltung ist nur ein Beispiel, sie läßt sich auf verschiedene Weise ausführen.

5. *Wechselrichter zur Aufnahme der Rückströme.* In gleicher Weise wie bei Talfahrten elektrischer Bahnen lassen sich Motore von Kran- und anderen

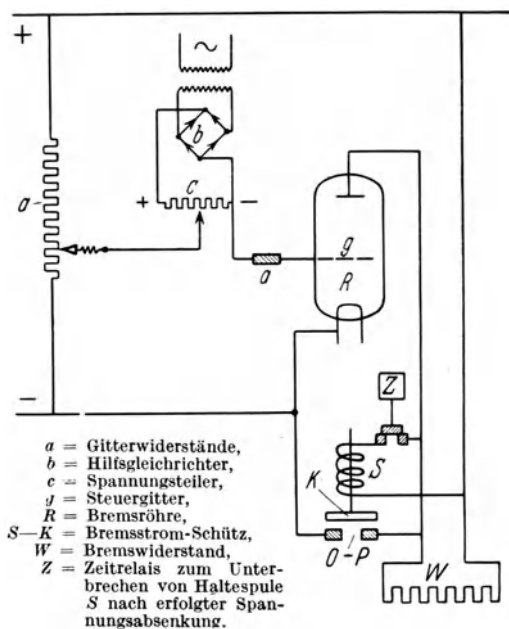


Bild 197. Schutzschaltung im Gleichrichterbetrieb

¹⁾ ETZ. 1939, H. 6, S. 172. Nach Electrician 1938, S. 409.

Anlagen durch Wechselrichter abbremsten. Die Wechselrichter haben wohl einen größeren Leerlaufstrom als Relaischaltungen, doch kann mit ihnen das Auftreten jeder Spannungserhöhung vermieden werden. Relaisröhren dagegen werden erst durch eine vorher bestimmte Spannungserhöhung eingeschaltet, wenn also bereits eine Spannungserhöhung eingetreten ist.

i) Die Umrichter

Mit diesen wird eine vorhandene Spannung einer bestimmten Phasenzahl und Frequenz in eine Spannung anderer Frequenz und Phasenzahl umgeformt. Es sind Gleichstrom- und Wechselstromumrichter entwickelt worden.

1. Die Gleichstromumrichter (Gleichstromumspanner). Mit Hilfe gittergesteuerter Stromrichter konnte diese in der Elektrotechnik bisher nicht ausführbar scheinende Aufgabe gelöst werden. Die Erläuterung hat für uns jedoch nur theoretisches Interesse in Verbindung mit den folgenden

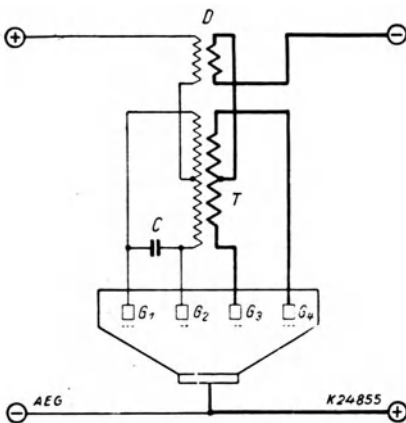


Bild 198. Gleichstromtransformator
(Schematischer Entwurf)

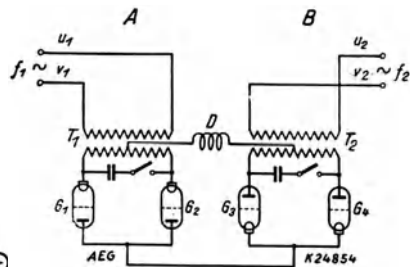


Bild 199. Universalumrichter
(Schematischer Entwurf)

Umrichtern für Wechselstrom. Bild 198 zeigt 1) die Schaltung eines Gleichstromumrichters, der eine bestehende Gleichspannung in eine beliebige andere Gleichspannung umwandeln kann. Das Stromrichtergefäß hat eine Kathode, vier Anoden und vier Steuergitter G_1 bis G_4 . Vom gegebenen, dünn gezeichneten Gleichstromnetz kommt der Gleichstrom an und fließt über eine Drosselspule D zum Umspanner T . In einer entsprechenden Gitterschaltung wird mit Hilfe des Kommutierungskondensators C und den Gittern G_1 bis G_2 aus dem Gleichstrom ein Wechselstrom erzeugt, der in der starken Wicklung des Umspanners T eine beliebige Wechselspannung induziert. Der Wechselstrom wird im Stromrichtergefäß wieder gleichgerichtet. Die Steuergitter G_3 bis G_4 dienen zum Regeln der erzeugten

1) R. Tröger, Elektr. Bahnen 1932, März.

Gleichspannung. Die Vereinigung beider Drosselspulen auf einem Eisenkern bietet den Vorteil, daß sich beide Gleichstrom-Kraftlinienflüsse aufheben, wodurch die Spule kleiner wird. Ferner kann für die Zwischenfrequenz im Wechselrichter ein möglichst hoher Wert gewählt werden, beispielsweise 100 bis 500 Hz, um auch die Eisenkerne der Drossel und des Umspanners kleiner zu halten.

2. *Die Wechselstromumrichter.* Mit Hilfe der bisher beschriebenen Stromrichterarten ist ein Wechselstromumrichter durch die Reihenschaltung eines Gleichrichters mit einem Wechselrichter ausführbar. Nach Bild 199 wird aus dem Wechselstrom im Gleichrichter *A* zuerst Gleichstrom erzeugt, der im Wechselrichter *B* in einen anderen Wechselstrom umgeformt wird, der eine andere Spannung, Frequenz und Phasenzahl hat als Netz f_1 . Die neu erzeugte Wechselspannung wird durch Gitterkreise G_3 bis G_4 in ihrer Größe und Frequenz beliebig geregelt und phasenverschoben, um den Umrichter in Parallelschaltung mit anderen Generatoren synchron betreiben zu können. Wegen dieser guten Angleichung an bestehende Netzverhältnisse wird diese Anordnung auch Universalumrichter ¹⁾ genannt. Die erkennbaren, ausschaltbaren Kommutierungskondensatoren werden für Gefäß *B* in Betrieb genommen, wenn Gefäß *A* als Gleichrichter und *B* als Wechselrichter arbeitet; umgekehrt jedoch für *A*, wenn die Leistung vom Netz f_2 über den als Gleichrichter geschalteten Stromrichter *B* und Wechselrichter *A* in das Netz f_1 gespeist werden soll. Ein Anwendungsgebiet wäre die Speisung von Einphasennetzen mit $16\frac{2}{3}$ Hz aus einem 50-Hz-Drehstromnetz und umgekehrt, denn der Leistungsaustausch ist in beiden Richtungen möglich.

3. *Umrichter für 50-Hz-Drehstrom- und $16\frac{2}{3}$ -Hz-Wechselstromnetze* (Hüllkurvenumrichter). Für Bahnanlagen mit $16\frac{2}{3}$ -Hz-Einphasennetzen sind besondere Umrichter ²⁾ entwickelt worden, die ein Speisen dieser Netze aus 50-Hz-Drehstromnetzen der Überlandwerke ermöglichen. Es hat sich gezeigt, daß die Stromimpulse der 50-Hz-Netze unter Benutzung zweier in Kreuzschaltung arbeitender Stromrichtergefäße oder Anodengruppen mit einem $16\frac{2}{3}$ -Hz-Netz gut zusammen passen.

Von den mit Gittersteuerung versehenen Stromrichtergefäßen, Bild 200, speist ein Gefäß während einer Halbwelle in das Einphasennetz, wobei das zweite Gefäß gesperrt wird. Während der nächsten Halbwelle arbeitet das zweite Gefäß. Zur Steuerung der Stromimpulse wird eine umlaufende Schaltwalze verwendet, die durch einen zur Netzfrequenz synchron laufenden Motor angetrieben ist. Die Schaltwalzenkontakte sperren das linke Gefäß, wenn das rechte Gefäß arbeitet und umgekehrt. Auf diese Weise entsteht

¹⁾ *M. Stöhr*, Arch. f. Elektrot. 1932, H. 3.

²⁾ *M. Schenkel*, *W. Petersen* u. *W. Löbl*, ETZ. 1932, H. 32; *Meyer-Delius*, VDE.-Fachbericht 1934, S. 111—114; *W. Wechmann*, Elektr. Bahnen 1934, H. 1; *R. Träger*, Elektr. Bahnen 1932, H. 3; 1934, H. 34.

bei gleichen Anodenspannungen ein trapezförmiger Wechselstrom. Die erste und letzte Anode muß während jeder Halbwelle zweimal arbeiten. Durch die Einschaltung entsprechender Siebkreise kann dieser trapezförmige in einen sinusförmigen Strom umgewandelt werden. Man nennt eine solche Einrichtung einen Hüllkurvenumrichter. Um mit einfachen Mitteln aus

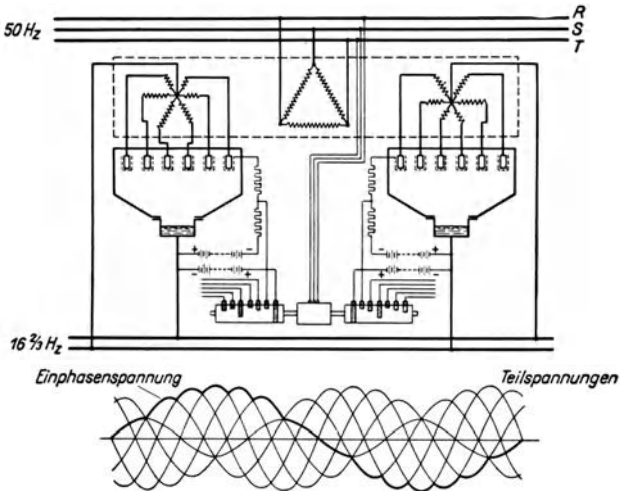


Bild 200. Hüllkurvenumrichter nach Löbl, starrer Umrichter. (Man achte auf die Nullpunkte in den sechsphasigen Systemen)

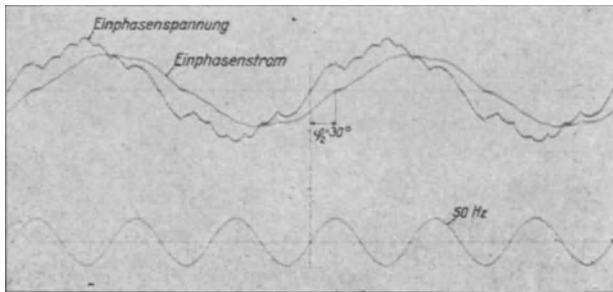


Bild 201. Oszillogramme von Strom und Spannung an Hüllkurvenumrichtern (AEG.)

der Trapezform eine der Sinuskurve angenäherte Stromform zu erhalten, wurde zuerst von Löbl vorgeschlagen, die einzelnen Wicklungen der Transformatoren nach bestimmten Spannungsgrößen abzustufen, so daß verschieden große Phasenspannungen entstehen, wie Bild 200 erkennen läßt. Die Teilkurven wachsen allmählich auf den Höchstwert an, um am Ende der geschlossenen Halbwelle wieder zu fallen. Während der Zeiten, in denen die Anoden nicht arbeiten dürfen, werden sie mit Hilfe der Steuerschaltwalze

in sinngemäßer Gitterschaltung gesperrt. Das Oszillogramm Bild 201 läßt erkennen, daß es mit einem Umrichter möglich ist, auch Blindleistung aus dem Drehstromnetz ins Einphasennetz zu liefern; es ist bei einer Phasenverschiebung von etwa 30° zwischen Einphasenspannung und Einphasenstrom aufgenommen. Die abgegebene Leistung ist jedoch beim Löbl-Umrichter auf die einzelnen Phasen des Drehstromnetzes ungleich verteilt, daher wurden Verbesserungen angestrebt.

4. *Die starren und elastischen Umrichter.* Der Umrichter Bild 200 ist ein sogenannter starrer Umrichter, weil die Phasenlage des erzeugten Wechselstromes starr an die Phasenlage des Drehstromnetzes gebunden ist. Infolgedessen eignen sich starre Umrichter nicht immer zum Parallelarbeiten mit anderen Umrichtern und Generatoren, die von einem anderen Netz gespeist werden. Um Hüllkurvenumrichter elastisch allen Netzverhältnissen anzupassen, sind verschiedene Schaltungen entstanden.

Die Sekundärwicklungen des Gleichrichtertransformators haben nach einem Vorschlag von *Ch. Krämer*¹⁾ zum Unterschied vom Löbl-Transformator gleiche Windungszahlen. Hierdurch entstehen trapezförmige Halbwellen. Diesen wird eine Zusatzspannung überlagert, die in einem Drehtransformator entsteht, dessen primäre Wicklung an das speisende Drehstromnetz angeschlossen ist. Die Sekundärwicklung des primärseitig dreiphasig gespeisten Drehtransformators ist einphasig ausgebildet und mit dem Einphasennetz in Reihe geschaltet. In der Sekundärwicklung wird demnach eine Spannung von der dreifachen Frequenz des Drehstromnetzes erzeugt, dessen Phasenlage durch Verdrehen des Rotors gegen die vom Haupttransformator erzeugten Teilspannungen beliebig verschoben werden kann. Die verschiebbare resultierende Einphasenspannung setzt sich aus den trapezförmigen Teilspannungen und der Zusatzspannung zu einer Kurve zusammen, die wieder annähernd sinusförmig ist.

5. *Elastische Umrichter durch Gitterregelung.* Unter der Berücksichtigung, daß die elastische Anpassung an Netze anderer Phasenlage lediglich eine Verschiebung der erzeugten Halbwellen bedeutet, ist eine Phasenverschiebung der Halbwellen auch durch Regelung der Teilkurven innerhalb einer Halbwelle mit Hilfe der Gittersteuerung und entsprechender Zündverzögerung einzelner Teilkurven möglich. Von diesem Gedanken ausgehend, sind Umrichter entwickelt worden, die mit synchron umlaufenden Kontaktwalzen bei gleichen Umspannerwicklungen eine Regelung der Hüllkurven gestatten²⁾. Es werden also nach Bild 202 nicht die fortlaufenden Teilkurven der Anoden 1, 2, 3, 4 . . . 1 für eine Halbwelle gewählt, sondern eine beliebige andere Zahlenreihe, die der gewünschten Phasenlage

¹⁾ *H. Laub*, E. und M., Wien 1932, H. 22 u. 23.

²⁾ *Meyer-Delius*, Elektr. Bahnen 1932, März; *M. Schenkel*, ETZ. 1932, H. 32.

entspricht, z. B. 5—6—1—2—3—4—5. Die Regelung ist durch eine Verschiebung der Steuerwalze erreichbar. Für jede Teilkurve muß ein der Größe entsprechender Zündwinkel gewählt werden, um den Gesamtwert der Halb-

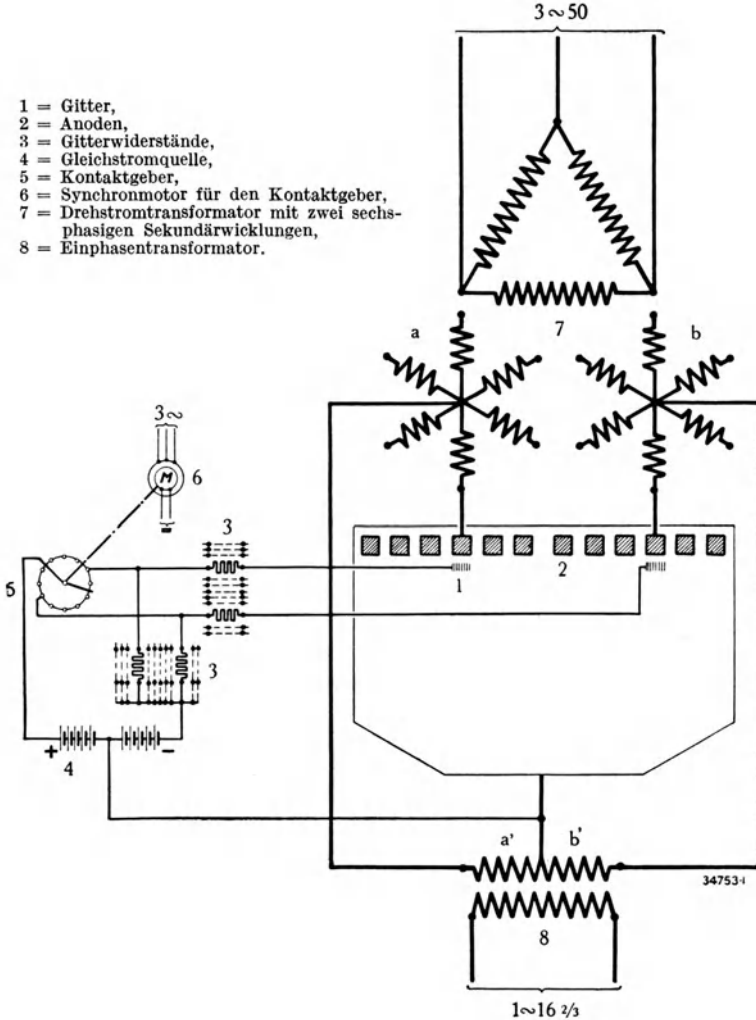


Bild 202

Schaltung einer Versuchsanordnung zur Frequenz- und Phasenumformung (BBC.)

welle einer Sinuskurve anzupassen. Durch die Zündverzögerung der einzelnen Anodenströme ist der $\cos \varphi$ auf der Primärseite 0,843 ¹⁾, er wird niedriger, wenn die erzeugte Wechselspannung durch Gitterregulierung vermindert wird.

¹⁾ Meyer-Delius, Elektr. Bahnen 1932, März.

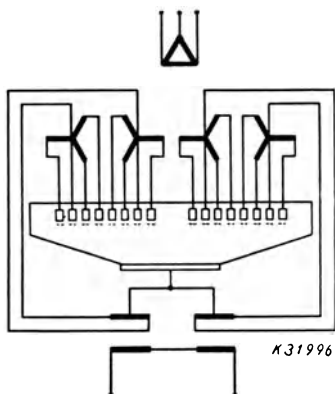
6. Die Zweispannungs- und Doppelumrichter. Zur Vermeidung ungleicher Netzbelastungen wird die sinusförmige Hüllkurve nach einem anderen Vorschlag durch Spannungsaddition erzeugt ¹⁾. Der Oberwellengehalt des erzeugten Wechselstromes und die Unsymmetrien werden hierbei kleiner als bei Verwendung verschieden großer Teilkurven. Der im Bild 203 gezeigte Doppelumrichter erzeugt auf der Sekundärseite drei Teilspannungen.

Die Kurve U_I entsteht durch die Anodenströme 1—3—5—1.

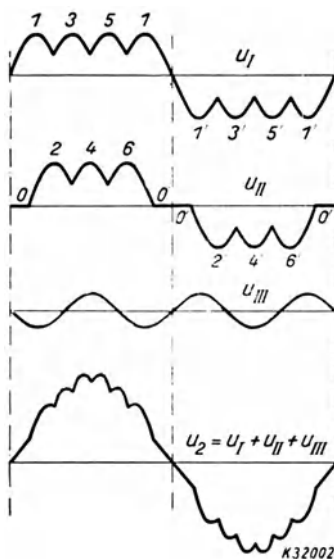
„ „ U_{II} „ „ „ „ 0—2—4—6—0.

„ „ U_{III} entspricht der normalen Netzfrequenz von 50 Hz.

Die Addition sämtlicher Teilkurven I—II—III ergibt die untere Kurve $U_2 = U_I + U_{II} + U_{III}$. Sämtliche



Grundsätzliches Schaltbild eines Doppelumrichters



Teil- und Gesamtspannungen eines Doppelumrichters für ein Frequenzverhältnis 3 : 1 mit Kompensation der dritten Oberwelle

Bild 203

Vorgänge wickeln sich in mehranodigen Stromrichtergeräten ab, in Verbindung mit den erkenntlichen Umspannern.

Es würde zu weit führen, sämtliche Umrichtermöglichkeiten aufzuführen, daher sei auf die Literatur verwiesen. Die Zukunft wird lehren, welche Umrichterarten sich am besten bewähren werden. Der die Wiesentalbahn ²⁾ speisende Umrichter von etwa 4000 kW Leistung ist ähnlich Bild 203 ausgeführt und speist dort ein Vollbahnnetz der Deutschen Reichsbahn.

¹⁾ K. Kettner u. G. Reinhardt, ETZ. 1935, H. 30 u. 31; K. Schmer, VDI. 1938, H. 4.

²⁾ R. Tröger, Elektr. Bahnen 1934, Jan. u. W. Wechmann, ebenda 1934, Jan.

k) Die Stromrichter zum Leistungsaustausch zwischen Wechsel- und Gleichstromnetzen

Es ist häufig erörtert worden, für die Stromfernübertragung hochgespannten Gleichstrom zu verwenden. Der hierdurch erreichbare Vorteil ist die Einsparung von Stromverlusten und die einfache Einschaltung und Parallelschaltung großer Netze, so daß sich die Beschaffung von Stromrichtern zur Erzeugung hochgespannter Gleichströme offenbar lohnt, wenn ihre Betriebssicherheit erwiesen ist. Die von *R. Thury* in der Schweiz erprobten Umformeranlagen, die in Reihenschaltung bis zu 100000 V erzeugen, haben wohl starke Beachtung gefunden, doch ist ihr Wirkungsgrad gering und die

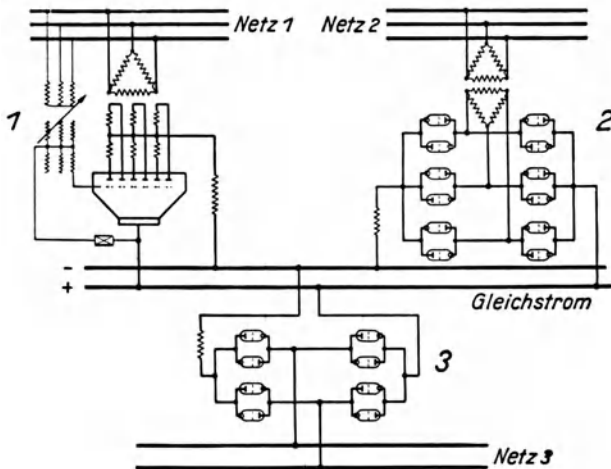


Bild 204. Kupplung von Wechselstromnetzen über Gleichstrom mit Stromrichtern (Schematischer Entwurf)

Bedienung nicht einfach genug, wenn sie in unbeaufsichtigten Umspannerwerken arbeiten sollen. Da der Lichtbogenverlust der Stromrichtergefäße unabhängig von der Spannungshöhe etwa 20 V beträgt, entsteht bei 30000 bis 50000 V Gleichstromspannung ein Wirkungsgrad, der mit Maschinen nicht zu erreichen ist. In den USA. sind Versuchsanlagen im praktischen Betrieb erprobt worden, in denen gittergesteuerte, mit Hg gefüllte Glühkathodenröhren zur Erzeugung von hochgespanntem Gleichstrom benutzt werden¹⁾. Am Ende der Gleichstromleitung sind Wechselrichter vorgesehen, die Energie aus dem Gleichstromnetz in andere Drehstromnetze speisen. Wie aus Bild 204, das wir als schematischen Entwurf bezeichnen wollen, erkenntlich ist, können an das Gleichstromnetz mehrere Wechselstromnetze angeschlossen werden, die beliebige Phasenzahl und Netzfrequenzen haben können so daß in dieser Anordnung eine vollkommen elastische

¹⁾ SEV. (Bulletin) Zürich, 30. 8. 1939; *C. Ehrensberger*, Mutatoren; *F. Grieb*, Netzkupplung.

Kupplung aller Netze untereinander entsteht. Bei sinngemäß gewählten Stromrichtergrößen kann die Energie von jedem Netz in ein anderes und umgekehrt gespeist werden. Der links im Bild gezeigte Drehregler gestattet die Regelung der Gleichspannung oder des Stromes auf einen konstanten Wert. Die Regelung auf konstanten Strom kann nur zur Anwendung kommen, wenn lediglich zwei Netze miteinander verkuppelt sind. Sie bietet den Vorteil, daß eine Regulierung nur am Gleichrichter nötig wird. Bei konstanter Spannung muß die Gleichspannung und die Last des Wechsel-

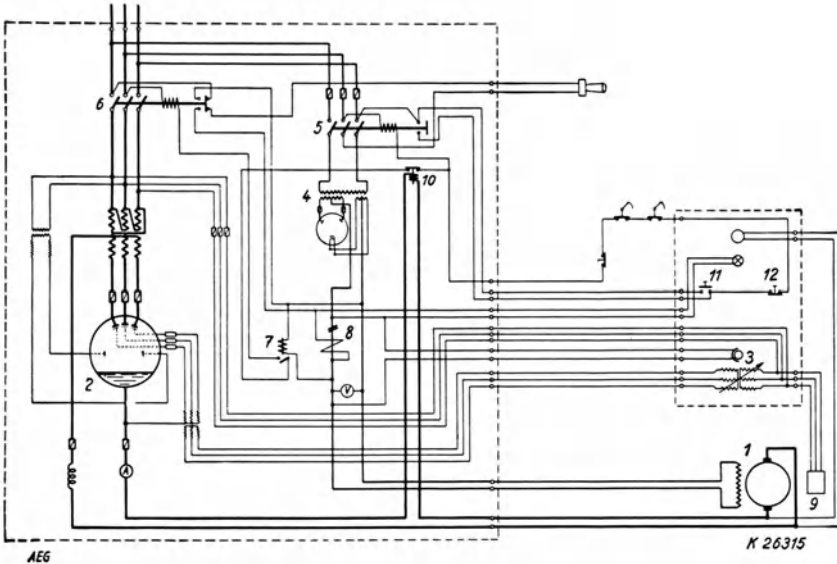


Bild 205. Schaltung eines gittergesteuerten Gleichrichters für die Regelung von Gleichstrommotoren

- | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 - Gleichstrommotor, | 6 = dreipol. Fernschalter für den |
| 2 = gittergesteuerter Quecksilber- | Haupt-Gleichrichter, |
| dampf-Gleichrichter, | 7 = Zwischenrelais, |
| 3 = Drehtransformator für die | 8 = Relais, |
| Gittersteuerung, | 9 = elektrohydraulisches Gerät |
| 4 = Glühkathoden-Gleichrichter | „Eldro“ (Brems), |
| für die Erregung, | 10 = Überstromrelais, |
| 5 = dreipol. Fernschalter für den | 11 = Druckknopf „Ein“, |
| Erreger-Gleichrichter, | 12 = Druckknopf „Aus“. |

richters geregelt werden. Schaltungen dieser Art sind heute noch im Versuchsstadium, so daß sich ein genaueres Eingehen auf ihren Aufbau erübrigt.

1) Gittergesteuerte Gleichrichter zum Betriebe von Gleichstrommotoren

Eine Schaltung für Motorantriebe mit einem Drehsinn zeigt Bild 205¹⁾. Für die konstante Erregung des Motorfeldes 1 ist ein ungesteuerter Gleichrichter 4 verwendet worden und dem Anker des Motors wird mit Hilfe des Drehreglers 3

¹⁾ H. Cypra, AEG.-Mitt. 1933, H. 2, S. 34.

und gittergesteuertem Hauptgleichrichter 2 eine regelbare Gleichspannung zugeführt. Sämtliche Steuer und Regelorgane sind auf einer Tafel vereinigt, die in der Nähe des Motors sitzt. Das Eldrogerät Pos. 9 dient zum hydraulischen Bremsen des Motors. Die Anlage besteht demnach aus dem Gleichrichtergestell mit Zubehör, der Reglertafel und dem Motor mit Bremsvorrichtung. Im Bild 206 sind die wichtigsten Grundschaltungen für Regelbetriebe und die getrennte Anker- und Feldspeisung zusammengestellt. Anordnungen ähnlicher Art sind heute vielfach in Verwendung und werden wegen des geringen Platzbedarfs, des guten Wirkungsgrades bei Teillasten

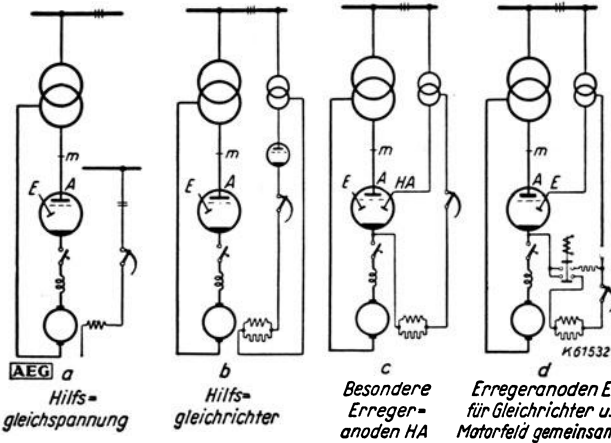


Bild 206. Erregerschaltungen für stromrichter gespeiste Gleichstrommotoren
(H. Anschütz u. Fischer, AEG.-Mitt. 1939, H. 2)
A = Hauptanoden, E = Erregeranoden, m = Phasenzahl des Gleichrichters

und der einfachen Fernsteuerung den rotierenden Umformern oft vorgezogen. Ein erfolgreiches Anwendungsgebiet ist der regelbare Antrieb für Walzenstraßen¹⁾, Bandisenstraßen, regelbare Luftbetriebe für Windkanäle, Stromrichterlokomotiven u. a. Sie werden von allen Herstellern bis zu den größten Leistungen errichtet. Häufig wird die Motorfelderregung von der Stromrichtererregung (Bild 206d) gespeist, so daß nur ein Gefäß zur Anwendung kommt. Auch werden die Hauptumspanner mit Grobanzapfungen versehen, um den Leistungsfaktor zu verbessern. Dies ist für Betriebe von Vorteil, die längere Zeit mit stark verminderter Drehzahl arbeiten (S. 230 ff.).

Gittergesteuerte Gleichrichter lassen sich für jeden regelbaren Gleichstrommotor verwenden, der von einem Wechselstromnetz gespeist werden soll. Von den ausgeführten Anlagen seien noch besonders die Stromrichterlokomotiven²⁾ der Deutschen Reichsbahn und die in der Literatur in der

¹⁾ H. Bauer, Zeitschr. Stahl u. Eisen 1939, S. 196; W. Nowag, Zeitschr. d. VDI. 1939, H. 28, S. 827.

²⁾ O. Michel, ETZ. 1936, S. 1114.

letzten Zeit häufig erwähnten Motorantriebe in Hüttenwerken und im Bergbau für Motorleistungen bis zu einigen 1000 kW erwähnt.

m) Regelbare Wechselstrommotore mit Stromrichtern

Gittergesteuerte Stromrichter gestatten die Herstellung von Wechselstrommotoren, die eine Charakteristik der fremderregten Gleichstrommotore haben und in ihrer Drehzahl in weiten Grenzen regel- und umsteuerbar sind. In dieser Anordnung werden die Anodenstromimpulse, also die Anodenströme, zum Speisen der Statorwicklungen benutzt. Der Rotor wird durch eine beliebige Gleichstromquelle fremd erregt (Bild 207). Jeder Anode des Stromrichtergefäßes wird ein Steuergitter zugeordnet. Ein Steuerkreis gestattet eine Regelung der Anodenstromgröße und eine Steuerung der einzelnen Impulse entsprechend der Anzahl der Statorwicklungen. Die Drehzahlregelung kann durch Gittersteuerung analog den Gleichstrommotoren oder auch durch Feldänderung im gleichstromerregten Rotor erfolgen.

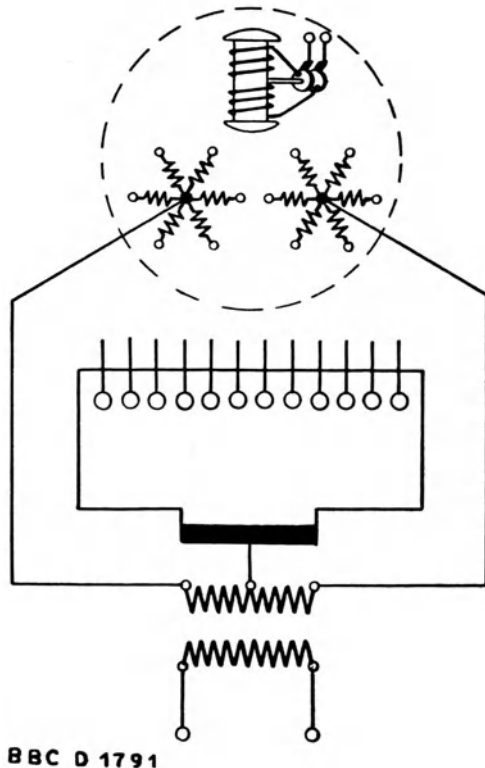


Bild 207. Schematischer Entwurf von Stromrichter-Spezialmotoren. (Die sechsphasigen Wicklungen sind mit den Gefäßanoden in einer entsprechenden Gittersteuerschaltung verbunden. Der Rotor kann mit beliebigem Gleichstrom, z. B. vom Kathodenstrom des Gefäßes, gespeist werden)

Die Einfachheit dieser Steuerung und der Motor-

durchbildung, die im Bild 207 schematisch dargestellt ist, bildete den Anreiz für verschiedene Untersuchungen auf diesem neuen Motorgebiet.

Von E. Kern¹⁾ und M. Stöhr²⁾ wurden einige Konstruktionen zum Speisen von Stromrichtermotoren aus ein- und mehrphasigen Netzen untersucht.

¹⁾ E. Kern, Elektr. Bahnen 1931, H. 11; ETZ. 1938, H. 18 und 19.

²⁾ M. Stöhr, E. und M. 1933, H. 45.

Insbesondere war auch an die Speisung von Bahnmotoren aus Einphasenwechselstromnetzen gedacht. Die Versuche gelten jedoch noch nicht als abgeschlossen.

n) Das Schalten von Stromkreisen mit gittergesteuerten Stromrichtern

Die Vorgänge bei den einzelnen Stromrichterarten sind durchaus mit dem Schalten von Strömen vergleichbar. So ist beispielsweise das Aneinanderreihen der Stromimpulse beim Gleichrichter oder Umrichter ein fortwährendes Schalten. Dies geschieht ohne bewegliche Kontakte, so daß es naheliegend war, Stromrichtergefäße und Röhren für Schaltvorgänge anzuwenden. Wohl werden die Steuerkreise neben rein elektrischen Einwirkungen auch durch mechanische Schalter gesteuert, doch die Steuerströme sind gering, so daß kein Kontaktabbrand und -verschleiß entsteht.

1. *Der Schaltvorgang bei gittergesteuerten Stromrichtergefäßen in Gleichstromnetzen.* Nach Bild 170 würde es genügen, das Steuergitter durch einen Umschalter mit einer positiven Stromquelle zu verbinden, um den mit Wechselstrom gespeisten Hauptstromkreis einzuschalten. Sobald das Gitter eine negative Spannung erhält, wird der Stromkreis wieder stromlos. Für einen Strom von etwa 1000 A genügt zum Ein- und Ausschalten ein Gitterstrom von 0,05 bis 0,1 A. Nach Bild 208 ist eine Schaltanordnung entwickelt worden, um auch einen fließenden Gleichstromlichtbogen zum Verlöschen zu bringen. Der Löschkondensator 4 erhält bei auftretendem Überströmen über Funkenstrecke 6 eine Verbindung mit der Anode, so daß die aufgespeicherte Kondensatorenenergie dem Lichtbogen im Gefäß 3 entgegenfließt und ihn zum Verlöschen bringt. Der Löschvorgang wird bei auftretendem Überströmen durch einen Überschlag an der Funkenstrecke 6 mit Hilfe des Stromtransformators 2 eingeleitet. Gleichzeitig erhält das Gitter von einem stromabhängig betätigten Umschaltrelais 7—8 ein negatives Potential, um das Neuzünden der Hauptstromentladung nach erfolgter Löschung zu sperren. Diese Ausführung ist nur ein Beispiel, denn der Löschvorgang läßt sich auch durch andere Hilfsmittel einleiten.

2. *Das Schalten von Stromkreisen mit einer Photozelle.* Die Photozelle wird vielfach zum Steuern von Starkstromkreisen und zum Betätigen von mechanischen Vorgängen benutzt, beispielsweise zum Einschalten einer Beleuchtung bei eintretender Dunkelheit, zum Ingangsetzen von Rolltreppen, Öffnen und Schließen von Türen, zum Übertragen von Musik und Sprache auf Lautsprecher, zum Steuern und Regeln von Antriebsmotoren in Abhängigkeit von der Drehzahl, von bewegten Massen oder zum Drehzahlgleich und andere Einrichtungen¹⁾.

Der durch Belichtung in einer Photozelle fließende Strom ist klein, er muß bekanntlich durch gesteuerte Röhren verstärkt werden, um größere Strom-

¹⁾ F. Hauffe, Zeitschr. d. VDI. 1935, Nr. 49; A. Ott, ebenda 1939, Nr. 30.

kreise zu steuern und zu schalten. In der Anordnung Bild 209 a soll die Belastung einer Straßenbeleuchtung bei eintretender Dunkelheit eingeschaltet werden. Sobald die Photozelle bei einsetzender Dunkelheit nicht genügend belichtet wird, fließt in ihr kein Strom mehr, so daß der Gitterkreis, der beim fließenden Photozellenstrom eine zur Kathode negative Spannung hat, von der negativen Stromquelle getrennt ist. Durch den Kondensator C besteht jedoch am Gitter eine positive Spannung und die Strombahn in der Glühkathodenröhre wird freigegeben. Der gleiche Schaltvorgang läßt sich auch

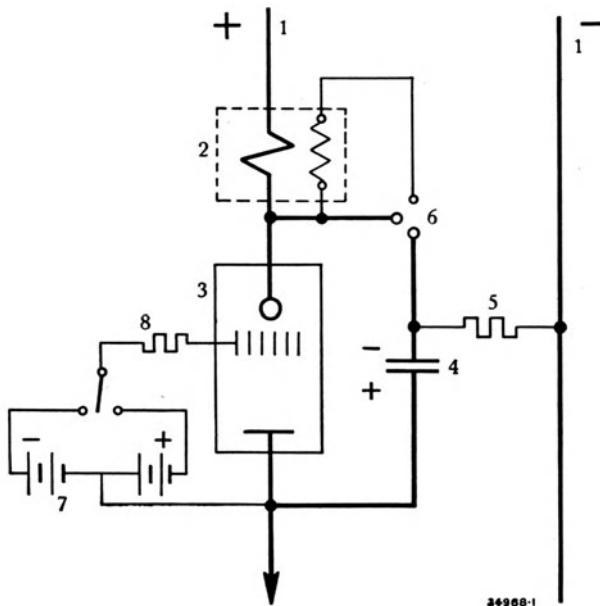


Bild 208. Gittergesteuertes Ventil als Schalter für hochgespannten Gleichstrom (BBC.)

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| 1 = Gleichstromleitung, | 5 = Ladewiderstand, |
| 2 = Zündtransformator, | 6 = Funkenstrecke, |
| 3 = Quecksilberdampfventil, | 7 = Steuerstromquelle, |
| 4 = Kondensator, | 8 = Gitterwiderstände. |

für beliebige andere Verbraucher in der Weise erreichen, daß der auf die Photozelle fallende Lichtstrahl von einer Person oder einem undurchsichtigen Gegenstand unterbrochen wird. In dieser Weise arbeiten Rolltreppen, Schaufensterbeleuchtungen, Warn- und Signalanlagen, Türöffner und Zählapparate in der Massenfabrikation.

Die erwähnten Schaltungen machen zur Bedingung, daß die Glühkathode während der Wartezeit unnütz geheizt wird. Um dies zu vermeiden, ist eine Glimmröhre *b* nach Bild 209 b als Zwischenglied zwischen Photozelle und Verstärkeröhre von Vorteil. Die Gesamtanordnung ist stromlos, wenn die Photozelle *d* belichtet ist, es fließt lediglich der kleine Photozellenstrom. Sobald dieser Null wird, fließt der Strom durch die Glimmröhre und

den Heizumspanner h , hierdurch wird die Kathode k erhitzt und die Hauptröhre a für den Belastungsstromkreis g leitend. Um eine Zerstörung der Kathode beim allmählichen Anheizen zu vermeiden, kann in den Kreis g ein Anodenstromverzögerungselement geschaltet werden.

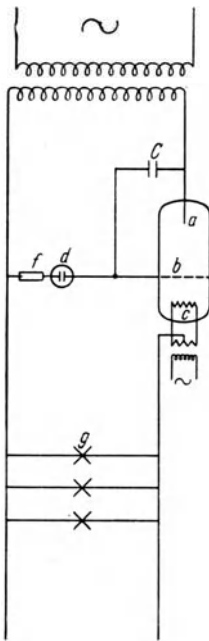


Bild 209a. Schaltung einer Photozelle mit Schaltöhre

a = Röhre, b = Steuergitter, c = Kathode, d = Photozelle, f = Widerstand, g = Verbraucher, C = Kondensator

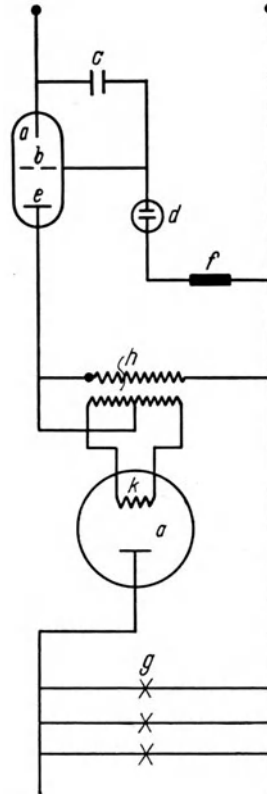


Bild 209b. Photozelle mit Glimmrelais (nach DRP. 550212, J. Linke)

a = Röhren, b = Steuergitter, C = Kondensator, d = Photozelle, e = ungeheizte Kathode, f = Widerstand, g = Verbraucher, h = Heiztransformator, k = geheizte Kathode

3. Das Schalten von Schweißvorgängen mit gittergesteuerten Zeitschaltern. Zum punktartigen Schweißen dünner Bleche oder Metallteile muß der Strom genau dosiert ¹⁾ werden. Der Strom soll nur während einer Halbwelle oder Teilhalbwellen fließen. Der Steuervorgang ist im Bild 210 erkenntlich. Zum

¹⁾ H. König u. W. Schilling, Siemens-Zeitschr. 1935, Mai; C. Haase u. O. Plass, Zeitschr. f. Aluminium 1935, April; B. Kalkner, Jahrb. d. F. I. der AEG. 1936, Bd. 4.

Schweißen wird der Kontakt K mit einem Hand- oder Fußhebel von Stellung 1 auf 2 gelegt. Dann fließt bei der nächsten Halbwelle ein Wechselstromstoß durch Hilfsrohr B . Gleichzeitig fließt ein Ladestromstoß über Widerstand R nach Kondensator C . Dieser Stromstoß erzeugt kurzzeitig eine positive Spannung am Gitter A und der Hauptstrom fließt nur während des noch verbleibenden Teiles der Halbwelle und kann nicht wieder zünden, weil der Kondensator C aufgeladen bleibt. Er entlädt sich nach dem Öffnen des Schalters K . Der Zündensatz, also die Größe der Halbwelle, wird durch den Phasenschieber P zeitlich verschoben und somit die Schweißstromgröße geändert. Diese Feinregelung der Stromgröße gestattet eine vollkommen gleichmäßige Verschweißung von Metallteilen.

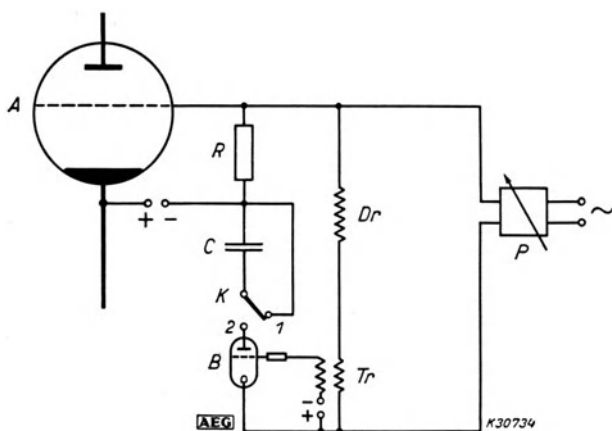


Bild 210. Gittersteuerschaltung für Punktschweißmaschine
 P = Phasendreher, K = Betriebsschalter, B = Steuerröhre für den Gitterkreis $C-R$,
 T_r = Gittertransformator

4. Die Punktnachtschweißung. Eine andere Aufgabe ist die Steuerung der Nahtschweißmaschine, die in kurzen Abständen punktförmige Verschweißungen zweier Bleche ausführt, um eine dichtende Naht zu schaffen. An sich erzeugt jeder Wechselstrom Impulse, so daß ein gleichmäßiger Strom nicht fließen kann, doch bei stärkeren Blechen kommen die kurzen Impulse der 50-Hz-Wechselstromnetze etwa einem durchgehenden Schweißen gleich. Die Schweißung soll je nach der Blechstärke in Pausen von $1/5$ bis $1/25$ sec erfolgen. Um diese zu erzeugen, hat man nach dem sogenannten Modulationsverfahren umlaufende Maschinen verwendet und überlagert hiermit dem normalen 50-Hz-Netz einen Wechselstrom von der gewünschten Punktzeit. Für Metall- oder Stahlbleche wird jedoch häufig die Schweißung mit einer Stromrichtersteuerung¹⁾ nach Bild 211 bevorzugt. Damit der Strom im

¹⁾ Zeitschr. f. Aluminium 1935, April; W. Leukert u. G. Falk, Siemens-Zeitschr. 1933, H. 13. Kalkner, ebenda.

Schweißtransformator in beiden Richtungen fließen kann, sind zwei anti-parallel geschaltete Hg-Dampfgefäße verwendet. Die Steuerung der Stromimpulse erfolgt mit Hilfe der von einem kleinen Synchronmotor angetriebenen Steuerwalze II, die den Gittern abwechselnd eine negative oder positive

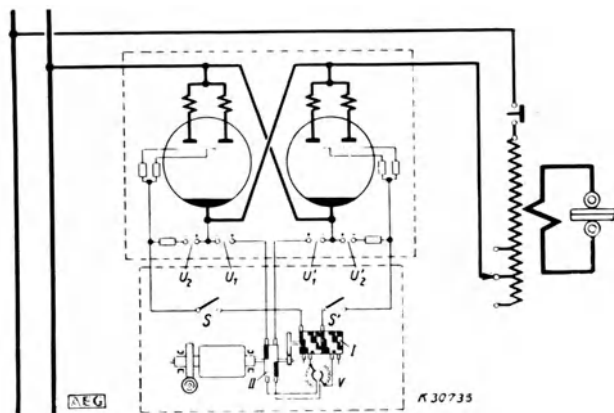


Bild 211. Schaltbild einer Nahtschweißmaschine mit Stromrichtersteuerung
 $U_1, -U_2$ Gittervorspannung, I - II umlaufende Schaltwalze für die Stromgröße und für die Schalthäufigkeit. (Änderung in diesen beiden Werten erfolgt durch Widerstand V , Umlaufgeschwindigkeitsänderung und Phasenverlagerung im Steuermotorkreis)

Spannung $U_1 \dots U_2$ zuführt. Die Schaltwalze I erhält für verschiedene Periodenzahlen passende Schleifstücke, so daß mit ihrer Hilfe die Schalthäufigkeit eingestellt werden kann. Durch Verdrehen des Motorgehäuses läßt sich die Kontaktstellung an Scheibe II verlagern und somit der Zündeinsatz und die Stromstärke regulieren. Je nach der Blechstärke wird eine entsprechende Schalthäufigkeit und Stromhöhe eingestellt und ohne weitere Veränderungen durchlaufend geschweißt.

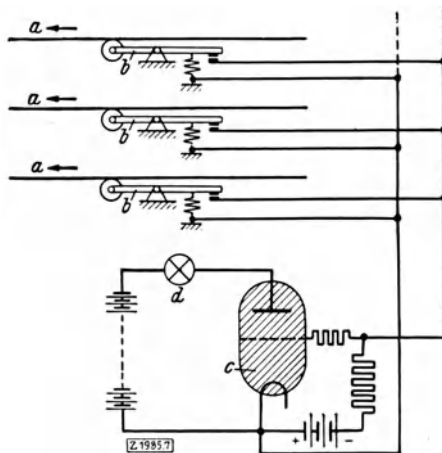


Bild 212. Sicherheitseinrichtung für Webstühle. Die Anordnung setzt beim Reißen eines Fadens den Antriebsmotor still; die Abbildung zeigt den Aufbau für drei Webfäden. a = Fäden, b = Fühlhebel, c = Stromrichter, d = Signalvorrichtung oder Relais zum Stillsetzen des Antriebsmotors

5. Sicherheitsschaltungen für schwache mechanische Ansprechenergien.

Zur Vermeidung von Fehlern beim Weben oder Spinnen müssen schnell ansprechende Schutzschaltungen vorgesehen werden, um den

Fabrikationsausfall zu verringern. Zu diesem Zweck wurde vom Verfasser¹⁾ eine Schaltung nach Bild 212 vorgeschlagen. Sobald einer der Fäden *a* reißt, zieht eine Feder die Rolle *b* nach oben und schließt den Kontakt der Gitterkreise, so daß ein Strom durch Signal oder Relais *d* fließt, um den Webstuhl stillzusetzen. In dieser Anordnung kann ein Steuerrohr für beliebig viele Webfäden verwendet werden.

6. Stromrichter für Werkstoffprüfung. Von den SSW.²⁾ ist in Verbindung mit der MAN. eine Stromrichteranordnung zur Erzeugung von Biege-

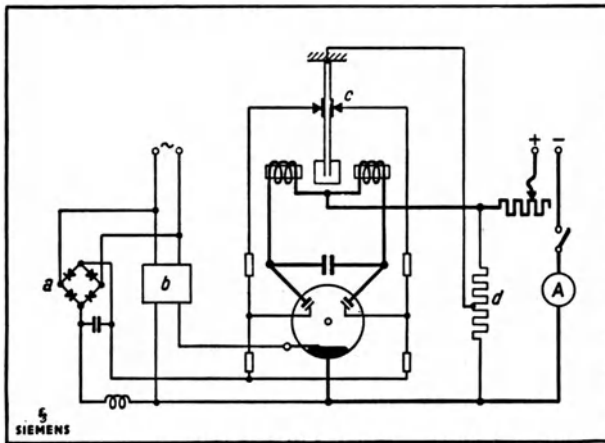


Bild 213. Grundsätzliches Schaltbild einer Werkstoffprüfeinrichtung
a = Sperrspannung, *b* = Zündung und Erregung, *c* = Kontakteinrichtung,
d = Spannungsteiler

schwingungen für die Prüfung von Stabmaterial entwickelt worden. Das senkrecht hängende Materialstück im Bild 213 soll geprüft werden. Durch die links und rechts sitzenden Magnete schwingt das Werkstück hin und her und steuert die Gitterkreise mit Hilfe der weich gelagerten Anschlagkontakte *C*. Der Spannungsteiler dient zum Abgreifen der positiven Zündspannung. Die Anordnung entspricht der Wirkungsweise der Wechselrichter. Zum Löschen der Gleichstromlichtbogen dient der zwischen den Magneten sitzende Kondensator. Beim Inbetriebsetzen wird der Schwingstab angestoßen. Er schwingt schnell auf den mit Hilfe des im Gleichstromkreis *A* liegenden Widerstandes eingestellten Wert an und behält diesen bis zur Zerstörung des Stabes bei.

¹⁾ DRP. 587951. Vgl. auch *F. Hauffe*, Zeitschr. d. VDI. 1935, H. 49.

²⁾ *E. Janetschke*, Siemens-Zeitschr. 1935, Mai.

o) Feinregulierung für konstante Gleichspannung

Die verschiedenen Regelarten wie die Kohldruckregler, Thomaregler (Öldruckregler), Motorregler oder Relaisregler können als bekannt vorausgesetzt werden. Es soll jedoch noch eine besondere, für gittergesteuerte Gleichrichter angewendete Schaltung, Bild 214, erklärt werden. Die unmittelbar auf Spannungsschwankungen ansprechenden Kontaktvoltmeter haben den Nachteil, daß der unvermeidliche tote Gang nur Grobregelungen ermöglicht. Zur Feinregelung wird die Regelspannung $C-D$ einer Brücke entnommen, die durch eine stets mit konstanter Spannung brennende Glimmlampe oder stromunabhängige Widerstände gebildet wird¹⁾. Sobald sich die Netzspannung $A-B$ ändert, entsteht auch zwischen C und D eine Spannungsänderung, die bei kleinen Änderungen einen relativ großen Wert

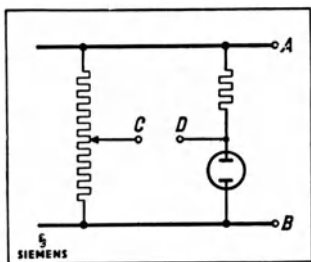


Bild 214.
Grundschaltbild des Steuerteils
 $A-B$ = konstant zu haltende Gleichspannung

erhält. Bei dem Sollwert $A-B$ soll die Spannung $C-D$ Null sein, so daß eine Änderung für ein an $C-D$ gelegtes Instrument praktisch den vollen Ausschlag bedeutet. Steigt die Spannung $A-B$ um 1 Volt, so zeigt $C-D$ beispielsweise 0,5 V. Bei einem Instrument von 2 V Skalenbereich entsteht demnach ein Ausschlag von 25 statt 1 vom Hundert. Das gleiche Verhältnis gilt beim Absinken der Spannung. Der Ausschlag kann zum Regeln von Stromrichtern benutzt werden. Die Art der Steuermittel ist durch die Antriebsmittel

der Gitterkreise bedingt. Immerhin ist mit dieser Brückenordnung eine große Regelgenauigkeit möglich.

Nach einem anderen Verfahren wird für Wechselstromkreise eine übersättigte Drosselspule mit einem stromabhängigen Widerstand in Reihe geschaltet, so daß sich Spannungsschwankungen nur in dem Widerstand anzeigen. Auch in diesem wird die Spannungsänderung relativ groß und kann zum Feinregeln benutzt werden.

p) Einige besondere Verwendungsgebiete gittergesteuerter Stromrichter

Es würde zu weit führen, sämtliche Anwendungsmöglichkeiten der gittergesteuerten Stromrichter zu erläutern.

Erwähnenswert sind noch:

1. Stromrichter mit Steuergitter zum feinstufigen Regeln einer Wechselspannung, z. B. für Bühnenbeleuchtung.
2. Stromrichter zum Erregen von Wechselstromgeneratoren, *Carl Braband*, VDE.-Fachbericht 1931, S. 29—32; Siemens-Zeitschr., Bd. 15, 1935. Ferner

¹⁾ W. S. Pforte, Siemens-Zeitschr. 1935, Mai, S. 204.

der Triodenregler von *Philips* (*N. A. J. Voorhove* u. *F. H. de Jong*, ETZ. 1932, H. 22). Dieser dient zum Steuern und Regeln einer Generatorspannung. Die ältesten Veröffentlichungen über das Steuern und Regeln von Maschinen mit Elektronenröhren stammen von *F. W. Meyer*, ETZ. 1921, H. 26; 1922, H. 30.

3. Stromrichter mit Gitterregelung zum Speisen von Elektroöfen. SSW.-Zeitschr. 1933, S. 300; AEG.-Mitt., März 1933.
4. Industrielle Anwendung gittergesteuerter Stromrichter. *F. Hauffe*, Zeitschr. d. VDI. 1935, Nr. 49.
5. Stromrichterlokomotiven. Stromrichter zum Speisen von Lokomotiv-Gleichstrommotoren aus dem 50-Hz-Überlandnetz. *G. Reinhardt*, Elektr. Bahnen 1937, H. 3 und 10; *O. Michel*, ETZ. 1936, S. 1114.
6. Der Dreiphasen-Stromrichtermotor und seine Steuerung bei Betrieb als Umkehrmotor. *E. Kern*, ETZ. 1938, H. 18 und 19.

Die Anwendungsgebiete sind so zahlreich, daß sie in einer besonderen Schrift zusammengefaßt werden müßten. Man kann Stromrichter überall verwenden, wo bisher rotierende Maschinen oder mechanisch bewegte Schaltmittel benutzt werden. Es ist wohl lediglich eine Preisfrage, daß Stromrichter trotz ihrer Vorzüge nicht in noch größerem Maße als bisher in die Praxis eingeführt sind. Doch mit der zunehmenden Verbesserung und Vereinfachung der Stromrichtergefäße und ihrer Einrichtungen werden im Laufe der nächsten Jahre noch weitere Anwendungen möglich.

12. Die technischen Einzelheiten der Stromrichter

Über die Berechnung der Stromrichterumspanner, Drosselspulen und anderer technischer Daten ist im Laufe der Jahre eine umfangreiche Literatur ¹⁾ entstanden. Daher sollen in dieser Schrift nur Formeln und Werte angegeben werden, die zum Beurteilen von Stromrichtern und Anlagen von Bedeutung sind. Trotzdem die Strom- und Spannungsverhältnisse an Umspannern und Drosselspulen durch die einseitige Belastung und nur kurzzeitig fließende Anodenströme außerordentlich verwickelt sind, lassen sich Stromrichter mit einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit doch verhältnismäßig einfach berechnen. Die Bestimmung der Drosselspulen wird durch die Luftspaltverstellungsmöglichkeit vereinfacht.

¹⁾ *W. Dällenbach* u. *Gerecke*, Arch. f. Elektrot. 1924; *K. Müller-Lübeck*, Berlin, Jul. Springer, 1925; *Prince* u. *Vogdes*, übersetzt von *O. Gramisch*, Berlin, R. Oldenbourg, 1931; *A. Glaser* u. *K. Müller-Lübeck*, Berlin, Jul. Springer, 1936; *Marti* u. *Winograd*, *O. Gramisch*, Berlin, R. Oldenbourg, 1933, 279 S.; *W. Schilling*, Die Gleichrichterschaltungen, Berlin, R. Oldenbourg, 1938, u. a.

Im ersten Abschnitt wurde bei der Beschreibung einzelner Gleichrichterschaltungen erläutert, daß die Dauer des Stromflusses der Anodenströme von der Phasenzahl abhängt. Diese Zeit wird mit Brennweite bezeichnet; sie wird bei größerer Phasenzahl kleiner und beträgt bei Zwölfphasengleichrichtern nur noch 30 elektrische Grade. Demnach wird auch die Umspannerwicklung nur für diese kurze Zeit beansprucht und somit schlecht ausgenutzt. Es entstehen ungünstige Streuverhältnisse und zusätzliche Spannungsabfälle im Umspanner, auch werden die Anoden mit hohen Scheitelwerten beansprucht und übermäßig belastet, was besonders bei großen Stromstärken zu hohen Anodentemperaturen führt. Daher war man bestrebt, für sechs- und zwölfphasige Gleichrichter Schaltungen zu verwenden, die eine vergrößerte Brennweite der Anodenströme ermöglichen, wobei gleichzeitig eine Verminderung des Scheitelwertes erfolgt. Von den verschiedenen Ausführungen, die zum Teil wieder verlassen sind, soll hauptsächlich die Saugdrosselspulenschaltung von BBC. erwähnt werden, weil sie wegen ihrer Vorzüge Allgemeingut der Technik geworden ist. Die Gleichrichter und Wechselrichterumspanner sind in ihren Schaltungen gleich, auch die Berechnung der Umspanner anderer Stromrichter, wie Umrichter usw., läßt sich von den Gleichrichterumspannern ableiten, so daß im folgenden nur die Gleichrichterumspanner behandelt werden sollen.

a) Die Schaltungen der Gleichrichterumspanner

Allgemein gebräuchliche Gleichrichterschaltungen sind in den Bildern 215–217 dargestellt¹⁾. Neben jeder Schaltung sind die Wechselströme und der erzeugte Gleichstrom angedeutet. Auf die große Brennweite der Anodenströme der Pos. 3 kommen wir noch zurück. Um das Verständnis zu erleichtern, wurde bei der physikalischen Betrachtung der Ventilwirkung im ersten Abschnitt die einanodige Schaltung zugrunde gelegt. Einfache Kleingleichrichter werden in einanodiger Ausführung für Batterieladung und zur Speisung der Anoden in Rundfunkgeräten verwendet. Bei letzteren wird der wellige Gleichstrom durch Kondensatoren und Drosselspulen geglättet. Für Gleichrichter von 5 A an aufwärts werden mehranodige Gefäße genommen oder Doppelweg-Graetz-Schaltungen angewendet. Sehr große Eisenstromrichter sind bis zu 24 Anoden und in zwölfphasiger Schaltung ausgeführt worden.

Um die Streuung während des Gleichrichterbetriebes zu verringern, müssen verkettete Schaltungen gewählt werden, damit der Anoden- oder Primärstrom mindestens über die Wicklungen zweier Schenkel fließt. Hierbei wird das magnetische Gleichgewicht des Umspanners am wenigsten gestört, denn bekanntlich sollen im Transformatoreisenkern die in der Primärwicklung

¹⁾ *Mayer-Delius*, BBC., Gri 864, 433, 300 K. Zwölfphasenschaltung in Gleichrichteranlagen.

vom Betriebsstrom erzeugten Kraftlinien durch die 180° verschobenen und entgegengesetzt fließenden Kraftlinien der Sekundärwicklung aufgehoben werden. Die Streuung eines Umspanners und der Spannungsverlust sind um so größer, je mehr alle vom Strom erzeugten Kraftlinien beider Wicklungen in ihrer im Eisenkern wirksamen Dichte zeitlich voneinander abweichen. So ist die Stern-Sternwicklung für Dreiphasengleichrichter

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Schaltung	Typen-leistung	Anschluß-leistung (prim.)	Anoden-strom	Leistungs-faktor total	Leerlauf-Gleichspg.	Primärstrom Netz-zuleitung	Anodenstrom
1		$1,46 N'g$	$1,27 \frac{N'g}{\eta}$	$0,57 Jg$	$0,826 \left(1 - \frac{E_k}{2}\right)$	$1,17 E_A - E_L$		
2		$1,42 N'g$	$1,10 \frac{N'g}{\eta}$	$0,39 Jg$	$0,955 \left(1 - \frac{E_k}{2}\right)$	$1,35 E_A - E_L$		
3		$1,26 N'g$	$1,10 \frac{N'g}{\eta}$	$0,28 Jg$	$0,955 \left(1 - \frac{E_k}{2}\right)$	$1,17 E_A - E_L$		

Bild 215. Die Grundsaltungen der Gleichrichterumspanner und ihre elektrischen Größen bei eins bis sechs Phasenschaltungen unter Vernachlässigung der Verluste¹⁾

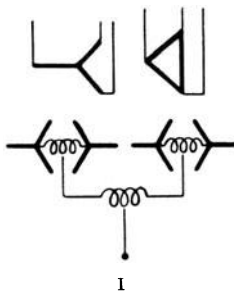


Bild 216

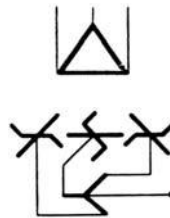


Bild 217

Die Verbindung mehrerer Mehrphasensysteme zu einem Zwölfphasensystem unter Benutzung von Saugdrosselspulen. I = zwei sechsphasige Systeme und drei Saugdrosselspulen, II = drei vierphasige Systeme und eine dreiteilige Saugdrosselspule

nur dann verwendbar, wenn ein durch große Streuung gewünschter Spannungsabfall für Batterieladung, Lichtbogenschweißung usw. vorteilhaft ist.

Die Hochstromanlagen werden auch zwölfphasig ausgeführt, um den Einfluß der Oberwellen auf das speisende Drehstromnetz zu verringern. Eine Möglichkeit der Verschiebung zweier sechsphasiger Gleichrichter untereinander, um ein Zwölfphasensystem zu erhalten, bieten die Schwenk-

¹⁾ SSW.-Druckschrift, SGO. Nr. 4183/47. (E_A = Anodenspannung, E_L = Lichtbogenspannung, Leistungsfaktor s. S. 227.)

umspanner. Sie werden zwei Umspannern vorgeschaltet. Der eine Schwenkumspanner, Bild 218, verlagert den Spannungsvektor um 15° nach links und der zweite nach rechts, wodurch eine Gesamtverschiebung von 30° entsteht. Die Zusatzwicklungen der separat stehenden Schwenkumspanner lassen sich unmittelbar neben der Primärwicklung auf dem Umspanner-eisenkern anordnen. Hierdurch ist die Möglichkeit gegeben, in größeren oder

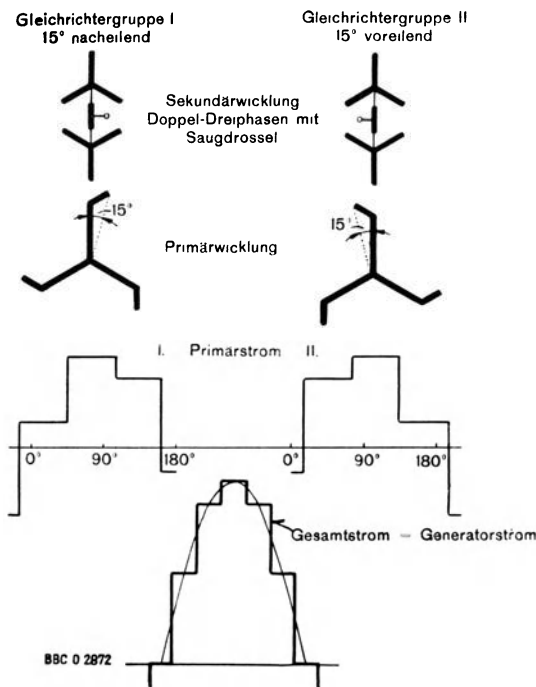


Bild 218. Schaltung der Gleichrichtertransformatoren und Formen der Primärströme in den Transformatoren und im Kraftwerk, Primärwicklung mit Schwenktransformatoren

weitverzweigten Gleichrichteranlagen eine sinngemäße Verschiebung einzelner Gleichrichter untereinander vornehmen zu können¹⁾. Nach einem anderen Vorschlag wurden zur Verminderung der Oberwellen drei größere Zwölfphasengleichrichter untereinander um je 10° Phasen verschoben. Die geschlossene Gruppe bildet somit eine 36phasige²⁾ Gleichrichteranlage, und der Primärstrom der geschlossenen Gleichrichtergruppe weicht von der Sinusform praktisch nicht ab.

¹⁾ DRP. 571 503. G. W. Müller, Einrichtung zur Erzielung von symmetrischen Zwölfphasenströmen. 1924.

²⁾ A. Anschütz, AEG.-Mitt. 1937, H. 8; L. Lebrecht, A. Partzsch, AEG.-Mitt. 1939, H. 2 sowie K. Baudisch u. A. Siemens, E. u. M. 1939, H. 35 '36, S. 460.

b) Die Kommutierung unter Berücksichtigung der Selbstinduktion

Unter Kommutierung beim Stromrichter versteht man den Stromwechsel von einer Anode auf die andere. Wenn der Stromkreis einer Gleichrichteranlage keinerlei Selbstinduktion durch Umspanner oder Drosselspulen enthält, erfolgt der Stromwechsel von einer Anode auf die andere ohne Stromnacheilung. Sobald die nächste Anode eine höhere Spannung hat als die arbeitende Anode, reißt der Lichtbogen der ersteren plötzlich ab. Dies gilt auch für Gleichrichter mit Selbstinduktion, wenn sie so gering belastet sind, daß der Strom noch keine merkliche induktive Spannung erzeugen kann. Es entstehen auf diese Weise Anodenströme in einer Form, wie sie die Bilder 10-12 zeigen. Sobald jedoch bei höherer Belastung eine induktive Spannung erzeugt wird, erlischt die arbeitende Anode nicht sofort, auch wenn die Folgeanode ihre Stromlieferung bereits übernommen hat. Je nach der Größe der Induktivitäten schleppt der Strom der Arbeitsanode J_{A1} im Bild 219 nach und klingt allmählich ab, während der Strom der Folgeanode J_{A2} allmählich ansteigt¹⁾. Die Zeit der Parallelarbeit beider Anoden wird mit dem Überlappungswinkel \ddot{u} oder auch u bezeichnet. Bei Kurzschlüssen wird der Winkel \ddot{u} größer als die Arbeitszeit einer Anode; es beteiligen sich also sämtliche Anoden an der Stromlieferung.

Die längere Brenndauer der Anodenströme ist bei Überströmen für den Gleichrichtervorgang erwünscht und wird bei der Saugdrosselspulen-schaltung für den Normalbetrieb angestrebt. Die Einflüsse der Selbstinduktion auf den Spannungsverlust wurden erstmals von *Dällenbach* und *Gerecke*, Arch. f. Elektrot. 1924, S. 171 und 1925, S. 250 veröffentlicht. Durch die Streuspannung fällt die Wechselspannung während der Brennzeit einer Anode stärker ab, so daß die erzeugte Gleichspannung bei hoher Last gegenüber den Transformatoren mit Wechselstrombelastung stärker verringert wird. Am besten ist die Einwirkung der Streureaktanz aus einer oszillographischen Aufnahme der Anodenspannung erkenntlich. Das Bild 219 läßt während des Stromwechsels eine ausgeprägte Einbuchtung der Anodenspannung E_A erkennen. Erst

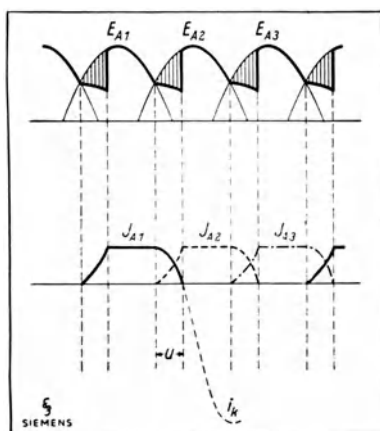


Bild 219. Der Stromübergang (Kommutierung) von Anode nach Anode. (Zur besseren Erkenntnis übertrieben gezeichnet.) Während der Zeit u arbeiten beide benachbarten Anoden parallel. (Für u wird in der Literatur oft die Bezeichnung \ddot{u} gewählt)

Die längere Brenndauer der Anodenströme ist bei Überströmen für den Gleichrichtervorgang erwünscht und wird bei der Saugdrosselspulen-schaltung für den Normalbetrieb angestrebt. Die Einflüsse der Selbstinduktion auf den Spannungsverlust wurden erstmals von *Dällenbach* und *Gerecke*, Arch. f. Elektrot. 1924, S. 171 und 1925, S. 250 veröffentlicht. Durch die Streuspannung fällt die Wechselspannung während der Brennzeit einer Anode stärker ab, so daß die erzeugte Gleichspannung bei hoher Last gegenüber den Transformatoren mit Wechselstrombelastung stärker verringert wird. Am besten ist die Einwirkung der Streureaktanz aus einer oszillographischen Aufnahme der Anodenspannung erkenntlich. Das Bild 219 läßt während des Stromwechsels eine ausgeprägte Einbuchtung der Anodenspannung E_A erkennen. Erst

¹⁾ SSW.-Druckschrift, SGO.-Nr. 4183/47.

wenn der Strom der verlöschenden Anode nach dem Verlauf von \ddot{u} Null geworden ist, erhält die Spannungskurve ihre Normalform wieder. Während dieser Zeit arbeiten beide Anoden parallel. Die Einbuchtungen der Sinuskurven sind ein Beweis für den Spannungsverlust im Umspanner, der jedoch mit einem Voltmeter nur an den Gleichstromklemmen und nicht

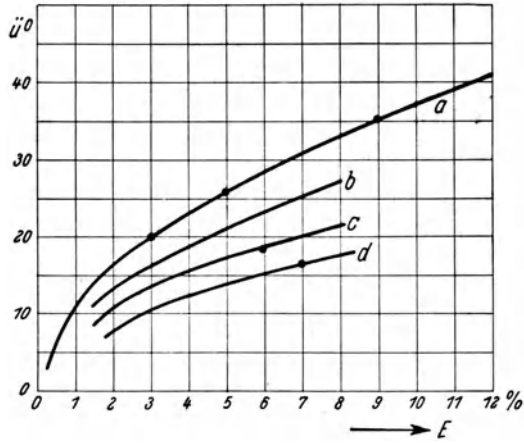


Bild 220 a. Spannungsverlust in Prozent in Abhängigkeit vom Überlappungswinkel \ddot{u} an dreiphasigen Gleichrichtern

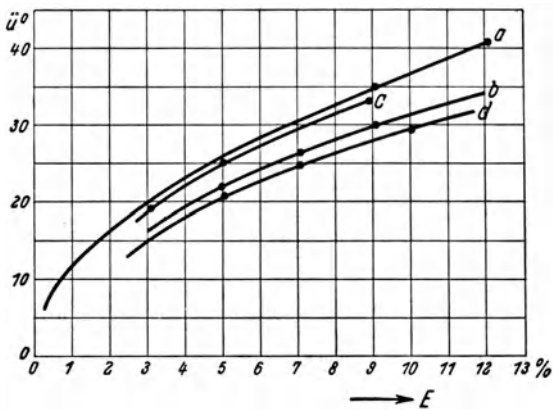


Bild 220 b. Spannungsverlust in Prozent in Abhängigkeit vom Überlappungswinkel \ddot{u} an sechsphasigen Gleichrichtern

an der Sekundärseite des Transformators bestimmbar ist. Dagegen zeigt eine oszillographische Aufnahme den kurzzeitigen Spannungseinbruch der Wechselspannung an. Um die Einbuchtungen so gering wie möglich zu halten, müssen die einzelnen Wicklungsgruppen anders angeordnet werden, als man es sonst bei Wechselstromumspannern gewohnt ist.

c) Der Spannungsabfall in Stromrichteranlagen

Für die Bewertung des Spannungsabfalls ist zu beachten, daß außer dem Spannungsabfall in den Transformatoren und in den Verbindungsleitungen durch die den Anoden vorgeschalteten Drosselspulen, zum Parallelarbeiten mehrerer Gleichrichter, ein weiterer Spannungsabfall entsteht. Bei einem Gesamtabfall von 8 % werden im allgemeinen 4 bis 5 % für den Umspanner und 3 bis 4 % für die Anodendrosselspulen gerechnet. Die Messung der Kurzschlußspannungen an Gleichrichtertransformatoren erfolgt beim Kurzschluß der drei Sekundärklemmen. Bei sechsphasigen Transformatoren wird nach den VDE-Regeln 0555 der Mittelwert aus den Messungen der zwei um 60° verschobenen Dreiphasensysteme zugrunde gelegt. Die Bewertung der Transformator Kurzschlußspannung, bezogen auf den Spannungsverlust an den Gleichstromklemmen der Gleichrichter, hat jedoch nach besonderen Richtlinien zu erfolgen. So zeigt beispielsweise ein gemessener Wert von 4 % an normalen Transformatoren¹⁾ nach Bild 215, 1—2 im Gleichrichterbetrieb einen höheren Spannungsverlust und in Saugdrosselspulenschaltung Bild 215, 3 einen niedrigeren Spannungsverlust als im Wechselstrombetrieb.

Für Gleichrichter wird bei Vernachlässigung der Leitungsverluste oft ein Spannungsabfall gewählt von

- 9 bis 10 % für Licht- und Kraftanlagen,
- 7 bis 8 % für Bahnanlagen.

Die Bilder 220 a—b zeigen in Kurvenform den Einfluß der Induktivitäten auf den Spannungsverlust an den Gleichstromklemmen nach den genannten Berechnungen von *Dällenbach* und *Gerecke*²⁾.

- a* = induktiver Abfall bei unendlich großer Glättungsdrosselspule,
- b* = induktiver Abfall und *Ohmscher* Verlust und Glättungsdrosselspule,
- c* = wie *a*, ohne Glättungsdrosselspule,
- d* = wie *b*, ohne Glättungsdrosselspule.

Zum Nachweis wurden gemessen:

Ein Dreiphasengleichrichter nach Bild 215, 1 (Stern/Zickzack), 450 V Gleichspannung.

Spannungsabfall	7 %
<i>ü</i>	16,5°
Induktiver Abfall	5,6 %
<i>Ohmscher</i> Abfall	2,4 %

¹⁾ Vgl. auch Bild 116, Abschnitt 9 und Bild 195, Abschnitt 11.

²⁾ Von *K. Müller-Lübeck* ausgewertet.

Ein Sechshephasengleichrichter nach Bild 215, 2 (Stern/Sechshephasen), 450 V Gleichspannung.

Spannungsabfall	10 %
\ddot{u}	29,5°
Induktiver Abfall	7 %
Ohmscher Abfall	3 %

Die Messungen bestätigen den wachsenden induktiven Spannungsabfall bei zunehmender Phasenzahl.

d) Der Gleichrichterkurzschlu

Durch die Beteiligung aller Anoden an der Stromlieferung beim Gleichstromkurzschlu entsteht bis zur vollen Periode eine ungleiche Stromaufnahme an den Anoden, weil diese zeitlich nacheinander arbeiten. Daher ist der Kurzschluwert mit Rück­sicht auf die Ansprechzeit von Ausschaltorganen kaum genau zu errechnen, hinzu kommt die Veränderung im Lichtbogenweg bei plötzlicher Überlastung. Auf der Gleichstromseite entsteht im allgemeinen je nach der Größe des Scheinwiderstandes der 10- bis 20fache Nennstrom, wenn das Gleichstromnetz unmittelbar kurzgeschlossen wird. Zur Dämpfung des Stromes tragen außer dem Transformator bei:

- die Gleichstromdrosselspule,
- das Gleichrichtergefäß,
- die Anodendrosselspulen,
- der Leitungswiderstand.

Die einzelnen Ohmschen und Scheinwiderstände lassen sich wohl errechnen, doch trotz der umfangreichen Literatur fehlt es an einer gut gebräuchlichen Endformel, so daß man auf die Meßwerte der Praxis angewiesen ist, weil die modernen Schaltmittel den Gleichrichter meistens früher abschalten, ehe sämtliche Anoden ihr Maximum erreicht haben. *Prince*¹⁾ gibt bei *n* Phasen eine Formel an (*U* = Phasenspannung an den Anoden).

$$JK = \frac{\sqrt{2} \cdot U \cdot n}{\omega \cdot L} \dots \dots \dots (7)$$

die als Annäherung gelten mag, wenn die Schalter erst nach dem Verlauf einer vollen Sinuskurve ansprechen.

e) Schaltungen für einen großen Brennwinkel der Anodenströme

Die Parallelarbeit zweier Anoden durch den Einfluß der Selbstinduktion erhöht die Belastungsfähigkeit der Gleichrichtergefäße. Daher war man

¹⁾ *Prince* u. *Vogdes*, *O. Gramisch*, Quecksilberdampf-Gleichrichter. Verlag Oldenbourg, 1931, S. 90. Vgl. S. 254 des Buches.

bestrebt, den Überlappungswinkel unter Vermeidung des ungünstigen Spannungsverlustes so groß zu halten, daß stets zwei oder mehrere Anoden parallel arbeiten. Hierdurch wird ferner die Rückzündungsgefahr nicht unwesentlich verringert, weil die Rückströme offenbar bei kleinerem Anodenstrom kleiner werden. In der Praxis haben sich Gleichrichter bewährt, bei denen der Spannungsabfall durch einen großen Überlappungswinkel in den ersten Teil der Gleichstrombelastung gelegt wird. Schaltungen dieser Art bedingen zudem eine günstigere Ausnutzung der Transformatoren.

f) Die Saugdrosselspule

Die in der Mitte angezapfte Drosselspule Bild 221 ¹⁾ hat zwei gleiche Wicklungen, die auf einem gemeinsamen Eisenkern sitzen. Beide durch den Gleichstrom erzeugten Kraftlinienflüsse sind entgegengesetzt gerichtet und heben sich in ihrer Wirkung auf. Die Wechselströme beeinflussen sich jedoch gegenseitig wie bei einem Transformator. Durch richtige Wahl der Windungen kann erreicht werden, daß die erzeugte Gleichspannung bereits bei einer kritischen Last von $i_{g0} = 0,5\%$ der Nennlast auf einen Gleichspannungswert, Bild 222, absinkt, der bei steigender Belastung über 0,5 % nahezu konstant bleibt. Die Spannungsabsenkung entsteht durch in den Spulen erzeugte Wechselspannungen, die sich der Sekundärspannung der aus zwei Dreiphasensystemen zusammengesetzten Umspannerwicklungen überlagern. Diese Spannungen haben eine Frequenz von 150 Hz bei einem 50-Hz-Netz und erreichen bei 0,5 % Belastung bereits ihren angenäherten Höchstwert. Der Vorgang gleicht demnach der Parallelarbeit zweier Dreiphasengleichrichter, aus denen die Drosselspule die dritte Harmonische ab-

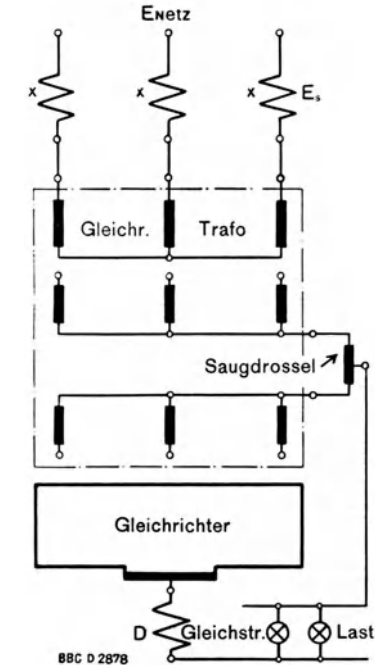


Bild 221. Grundschialtung eines Sechshephengleichrichters mit Saugdrosselspule. (Die Drosselspule D dient zum Glätten des Gleichstromes, dies ist nicht Aufgabe der Saugdrosselspule)

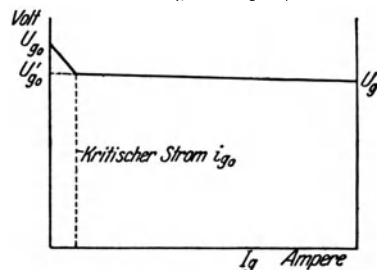


Bild 222. Spannungsanstieg unterhalb des kritischen Stromes (BBC.)

¹⁾ W. Nowag, ETZ. 1931, H. 19; H. Meyer-Delius, BBC.-Nachr. 1935, März.

saugt. Hierdurch entsteht primär ein Leistungsfaktor sechsphasiger Gleichrichter. Bild 223 zeigt die Ströme und Spannungen der Saugdrosselspulen-anordnung. Die beinahe rechteckige Form *b* der verbreiterten Anodenströme entsteht durch die von 30 bis 150° nahezu gleichmäßige Anodenspannung. Es addieren sich die in der Drosselspule erzeugten Spannungen u_s zur Netzspannung und erzeugen eine Erhöhung der wirksamen Anodenspannung von 30 bis 60 und von 120 bis 150°, dagegen eine Erniedrigung der Werte U_{g0} auf U'_{g0} von 60 bis 120°, so daß die Anoden von 30 bis 150° praktisch gleichmäßig belastet sind. Von 30 bis 90° arbeitet jede Anode mit der vorhergehenden

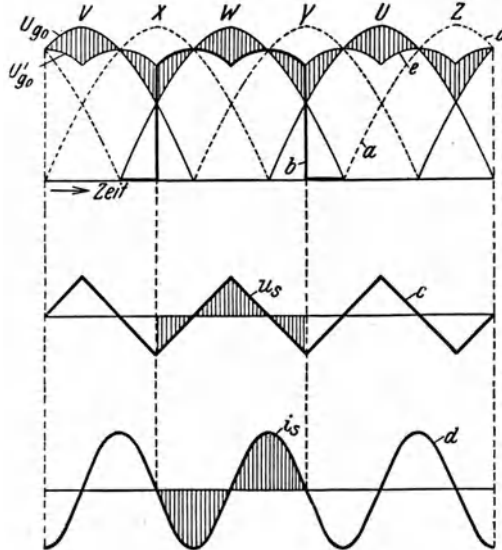


Bild 223. Gleichspannung und Anodenspannung sowie Magnetisierungsstrom und Spannung an der Saugdrossel (BBC.)

- a* = Phasenspannung des Transformators
 - b* = Spannung der Anoden
 - c* = Spannung an der Saugdrossel u_s
 - d* = Magnetisierungsstrom der Saugdrossel
 - e* = Gleichspannung U_g Bild 222
- } 150 Hz,

(Die schraffierten Flächen zeigen die Formänderung)

Anode parallel und von 90 bis 150° mit der folgenden. Die technischen Daten normaler Saugdrosselspulen bei einem kritischen Strom von 0,5 % sind¹⁾:

$$\text{Scheinleistung} = 0,239 \cdot U_2 \cdot J_2 \dots \dots \dots (8)$$

$$\text{Leerlaufstrom} = 0,353 \cdot i_{\text{Kri}} \cdot J_2 \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{Spannung einer Spulenhälfte} = 0,178 \cdot U_2 \dots \dots \dots (10)$$

Bild 216 zeigt eine weitere Ausbildung für Zwölfphasengleichrichter. Jede Sechshephasenseite erhält eine Saugdrosselspule, eine dritte Spule verbindet die Nullpunkte beider Spulen zum gemeinsamen Nullpunkt des Gleichstromnetzes.

¹⁾ Von K. Müller-Lübeck, a. a. O. angegeben. (U_2 = Gleichspannung, J_2 = Gleichstrom.)

Die unterhalb der kritischen Belastung bestehende Spannungsspitze läßt sich durch eine geringe Grundbelastung oder durch eine der Saugdrosselspule überlagerte Zusatzerregerwicklung von der dreifachen Grundfrequenz (150 Hz) beseitigen¹⁾. Die letztgenannte Maßnahme erfordert jedoch besondere Konstruktionen, die noch nicht allgemein angewendet werden. Außer der Saugdrosselspulenordnung sind noch andere Schaltungen²⁾ entwickelt worden, die einen ähnlichen Effekt auslösen.

1. Die dreiphasige Saugdrosselspule.
2. Fünfschenklig Hauptumspanner mit starker Streureaktanz.
3. In den Nullpunkt der einzelnen Systeme eingebaute Steuerumspanner.
4. Verkettete Anodendrosselspulen.

g) Die Berechnung der Gleichrichterumspanner

Bei Vernachlässigung der Verluste und der Überlappungswinkel ergeben sich für rein ohmsche Belastung nach Professor *Orlich* einfache Formeln, die auch in der Praxis Anwendung finden. Die Verluste und der Spannungsabfall, also der Einfluß des Überlappungswinkels, werden durch empirisch gefundene Zuschläge ausgeglichen. Die Hauptwerte aller Gleichrichter bei der Phasenzahl *n* sind unter Vernachlässigung aller Verluste³⁾:

$$U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_{3e} \cdot \frac{n}{\pi} \sin \frac{\pi}{n} \dots \dots \dots (11)$$

mittlere Gleichspannung,

$$J_{2e} = \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{n}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{n}} \dots \dots \dots (12)$$

effektiver Gleichstrom,

$$J_{2m} = \frac{n}{\pi} \sin \frac{\pi}{n} \dots \dots \dots (13)$$

mittlerer Gleichstrom,

$$J_{3e} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} + \frac{1}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{n}} \dots \dots \dots (14)$$

effektiver Anodenstrom,

$$J_{3m} = \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{n} \dots \dots \dots (15)$$

mittlerer Anodenstrom,

$$U_{3e} = U_{2m} \cdot \frac{\pi}{n \sqrt{2} \cdot \sin \frac{\pi}{n}} \dots \dots \dots (16)$$

effektive Anodenspannung,

¹⁾ *W. Nowag*, ETZ. 1931, H. 47, S. 1429.
²⁾ AEG.-Sonderdruck K 2/1107; *H. Jungmichl*, ETZ. 1929, H. 35.
³⁾ Vgl. auch *Güntherschulze* (Gl. u. V., a. a. O.), S. 124.

$$N_p = U_{2m} \cdot J_{2m} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{n}{4\pi} \sin^2 \frac{2\pi}{n} + \frac{n^2}{\pi^2} \cdot \sin^2 \frac{\pi}{n} \right) \dots \dots \dots (17)$$

primäre Transformatorleistung¹⁾,

$$N_s = U_{2m} \cdot J_{2m} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{2\pi} \sin^2 \frac{2\pi}{n}} \right) \cdot \frac{\pi^2}{2} \dots \dots \dots (18)$$

sekundäre Transformatorleistung,

$$N_d = (N_p + N_s) : 2 \dots \dots \dots (19)$$

mittlere Transformatorleistung.

Für die Praxis ergeben sich hieraus einfache Formeln, um einen Gleichrichterumspanner mit guter Annäherung bei Verwendung von Glättungsdrosselspulen berechnen zu können. Als bekannt wird stets vorausgesetzt, die Netzwechselspannung, die Phasenzahl, die Gleichspannung und der Gleichstrom, dann ist unter Annahme von Effektivwerten:

$$U_3 = \frac{U_2 + u_0}{m} \cdot x \dots \dots \dots (20)$$

- Der Wert m ist für Einphasengleichrichter (einanodig) 0,71,
 Einphasengleichrichter (zweianodig) 0,9,
 Dreiphasengleichrichter 0,17,
 Sechphasengleichrichter 1,35,
 Zwölfphasengleichrichter 1,40.

u_0 = Lichtbogenverlust,

x = Prozentualer Zuschlag für den Spannungsverlust bei der Nennstromstärke. Er beträgt je nach der Betriebsart 5 bis 10 %.

Für Schaltungen ohne Vergrößerung der Anodenstrombrennwinkel ist

$$J_{3e} = \frac{J_2}{\sqrt{n}} \dots \dots \dots (21)$$

Für Sechphasengleichrichter mit Saugdrosselspule ist

$$J_{3e} = \frac{J_2}{\sqrt{6} \cdot \sqrt{2}} \dots \dots \dots (22)$$

Für drei-, sechs- und zwölfphasige Gleichrichter ist:

$$J_1 = C \cdot J_2 \cdot 0,815 \dots \dots \dots (23)$$

effektiver Primärstrom.

¹⁾ Vergleiche den Formfaktor S. 233.

Für einphasige Gleichrichter ist

$$J_1 = C \cdot J_2 \dots \dots \dots (24)$$

$$C = \frac{U_3}{U_1} \dots \dots \dots (25)$$

Transformatorübersetzung,

$$N_g = J_{2m} \cdot U_{2m} \dots \dots \dots (26)$$

Gleichstromleistung,

$$N_p = J_1 \cdot U_1 \cdot \sqrt{3} \dots \dots \dots (27)$$

$$N_s = J_3 \cdot U_3 \cdot n \dots \dots \dots (28)$$

$$N_d = \frac{(J_1 \cdot U_1 \cdot \sqrt{3}) + (J_3 \cdot U_3 \cdot n)}{2} \dots \dots \dots (29)$$

Transformatorgröße.

Bei der Berechnung von Umspannerwicklungen ist noch zu beachten, daß durch den Gleichrichtervorgang in den primären Dreieckwicklungen Querströme von Phase zu Phase fließen, wenn sekundär eine einfache unverkettete Sechphasenschaltung, Bild 11, genommen wird. Der Querstrom überlagert sich dem Primärstrom in der Wicklung, diese muß um etwa 20 % stärker ausgeführt werden, wodurch auch der Transformator größer wird.

In den sekundären Zickzackwicklungen nach Bild 215, 2 addieren sich die Spannungen der Teilwicklungen im Verhältnis 1 : $\sqrt{3}$. Der Strom in den mittleren Schenkeln steht zum Anodenstrom J_3 im Verhältnis: $\sqrt{3} : 1$

Die Durchgangsleistung N_d der Umspanner entspricht dem kVA-Mittelwert aus der primären und sekundären Wicklung, die unter Berücksichtigung der Gleichrichterlichtbogenverluste u_0 und der oft vorgesehenen Regelvorrichtung nach vorstehenden Formeln errechnet werden können. Als Annäherungswert benutzt man häufig eine Verhältniszahl zur Gleichstromleistung. Für Schaltungen mit unvergrößerter Brennweite ist die Durchgangsleistung mit einiger Annäherung¹⁾:

$$N_d = 1,55 - 1,7 \cdot N_g \dots \dots \dots (30)$$

und für vergrößerte Brennweite (Saugdrosselspulenschaltung)

$$N_d = 1,35 - 1,4 \cdot N_g \dots \dots \dots (31)$$

Die Werte schwanken etwas, je nach der Höhe der Gleichspannung, weil der Lichtbogenverlust bei höheren Spannungen weniger in Erscheinung tritt als bei niederen. Wegen der oft groben Unterteilung der Umspannertypen in den Werkstätten und Preislisten ergibt sich bei den Grenzgebieten durch genauere Rechnung die Wahl der richtigen Größe. Der Anschlußwert wird

¹⁾ Die Werte im Bild 215 schließen die Verluste nicht ein.

auch unter Berücksichtigung des Leistungsfaktors und Wirkungsgrades wie bei rotierenden Umformern errechnet,

$$N_p = \frac{N_g}{\eta \cdot \lambda} \dots \dots \dots (32)$$

um die Schaltanlage und Zuleitung im voraus bemessen zu können.

h) Die Anodendrosselspulen

Die Größe der Anodendrosselspulen wird in Volt-Ampere oder Henry angegeben. Ihre Windungszahlen werden nach der bekannten Formel

$$W = \frac{U_s}{4,44 \cdot \Phi \cdot f_1} \dots \dots \dots (33)$$

berechnet, wobei zu beachten ist, daß die den Anoden der Gleichrichtergefäße vorgeschalteten Einzeldrosselspulen für die halbe Netzfrequenz zu bemessen sind. Sechsfasengleichrichter erhalten oft Spulenpaare, deren gemeinsamer Eisenkern von zwei gegenüberstehenden Phasenspannungen magnetisiert wird. Für diese Spulen wird die Netzfrequenz angenommen. Das gleiche gilt für die den Transformatoren vorgeschalteten Primärdrosselspulen nach Bild 4.

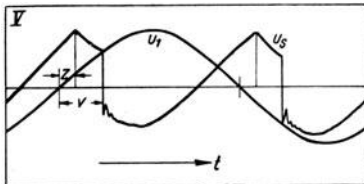


Bild 224. Eine oszillographische Aufnahme eines Zündvorganges

U_1 = Primäre Netzspannung, U_s = Spannung an den Anodendrosselspulen, Z = Zündverzögerung, in der Zeit $v - z$ arbeiten zwei benachbarte Anoden parallel

Um beim Kurzschluß eine Übersättigung der Eisenkerne zu vermeiden, damit die Spulen bei wachsendem Strom auch eine gleichmäßig wachsende Spannung erhalten, soll hier als Erfahrungswert angegeben werden, daß die Kraftliniensättigung bei Nennstrom 4000 bis 5000 Gauß nicht überschreiten und der Luftspalt des Eisenkerns nicht kleiner als 1 mm sein soll. Je günstiger die Drosselspulen gewählt werden, desto geringer ist die Kurzschlußbeanspruchung der Gleichrichtergefäße. Die oszillographische Aufnahme Bild 224 zeigt den Einfluß der Drosselspulen auf den Gleichrichtervorgang. Die Spulenspannung U_s ist mit beträchtlicher Nacheilung im Gleichrichterkreis wirksam. Die Zündung der Folgeanode erfolgt nicht mehr beim Nulldurchgang der Transformatorspannung U_1 , sondern nach Verlauf der Zeit Z . Das Verlöschen der Arbeitsanode erfolgt, wenn die Netzspannung U_1 den Spannungswert U_s nach der Zeit v erreicht hat. Während der Zeit $v - z$ arbeiten beide Anoden parallel. Diese Differenz wird bei größeren Spulen oder bei größerem Strom größer und erreicht beim Kurzschluß einen Wert, daß sämtliche Anoden in Parallelschaltung arbeiten und nicht mehr verlöschen.

i) Regelgrenzen für Gleichrichter mit Spannungsregulierung

Der Regelbereich muß genügen, um die Gleichspannung in den praktisch erforderlichen Grenzen einstellen zu können, unter Berücksichtigung der Spannungsschwankungen des Wechselstromnetzes, sowie der Verluste in den Verbindungsleitungen. Wenn eine Gleichrichteranlage ein Licht- und Kraftnetz speisen soll, dessen Belastung im Laufe eines Tages zwischen 10 und 100 % schwankt, pflegt man in den verschiedenen Tageszeiten verschiedene Spannungswerte einzustellen. Dies ist durch den Spannungsanstieg der

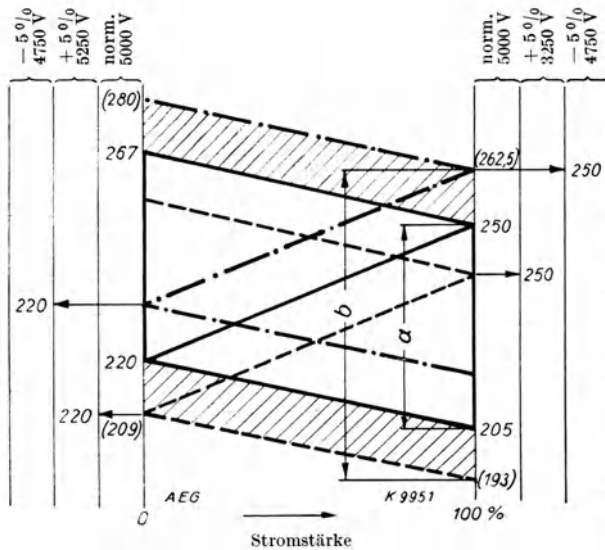


Bild 225. Vergrößerung des Regelbereiches bei Einankerumformern und Gleichrichtern wegen Spannungsschwankungen im Drehstromnetz

a = Regelbereich bei konstanter Primärspannung,
 b = Regelbereich bei $\pm 5\%$ schwankender Primärspannung.

Gleichrichter bei kleinerer Belastung und den Spannungsabfall der Speiseleitungen vom Elektrizitätswerk zum Verbraucher bedingt. Um diese Veränderungen auszugleichen, muß bei Vollbelastung oft eine 10 bis 15 % höhere Spannung gehalten werden als die Verbraucherspannung beträgt. Demnach soll bei kleiner Belastung die niedrigste und bei höchster Belastung die höchste Spannung in der Zentrale vorhanden sein. Die Schwankungen der Drehstromspannung betragen bei den verschiedenen Tagesbelastungen selten mehr als $\pm 5\%$. Das Regeldiagramm Bild 225 gibt Aufschluß über die Spannungsverhältnisse eines 230-V-Gleichstromnetzes. Die Spannungsdifferenz a wird bei konstanter und b bei $\pm 5\%$ schwankender Primärwechselspannung ausgeregelt¹⁾.

¹⁾ Hellfarth, AEG.-Zeitung 1928, H. 9.

Die Gitterregulierung und die Regelung durch Drosselspulenvormagnetisierung bieten den Vorteil einer stufenlosen Spannungsveränderung. Sie gestatten ferner ein Abwärtsregeln der Gleichspannung von einem gegebenen Höchstwert auf kleine Spannungswerte. Demnach genügt für diese Regelarten oft die Bestimmung der oberen Spannungsgrenze. Mit Rücksicht auf den Leistungsfaktor soll die obere Grenze nicht zu hoch gewählt werden, denn jede überflüssige Abwärtsregelung vergrößert die Blindleistung. In Betrieben, die in weiten Grenzen geregelt werden, ist eine Grobregulierung am Transformator von Vorteil. Wenn ein Gleichrichter beispielsweise bei 300, 500 und 700 V, je nach den Anforderungen, längere oder kürzere Zeit betrieben werden soll, werden die Grobanzapfungen für etwa 330, 550 oder 770 V ausgelegt. Die Feinregulierung erfolgt dann mit Hilfe der genannten Regelanordnungen (Bilder 229 bis 230).

k) Die Berechnung der Sparumspanner

Im Bereich kleinerer Gleichrichterleistungen werden oft Sparumspanner zum Anschluß von Gleichrichtern an bestehende Niederspannungsnetze verwendet, einmal um an Verlusten zu sparen, zum anderen besteht nicht immer die Möglichkeit, den Platz für Hochspannungsschaltanlagen zu schaffen. Die Berechnung der Sparumspanner ist in der Literatur oft erörtert worden, es sei nur darauf hingewiesen, daß sie häufig mit Regelanzapfungen versehen, zwischen bestehende Wechselstromnetze und Gleichrichter geschaltet werden, sie dienen auch nach Bild 129 als Regelumspanner, um den Hauptumspanner zu vereinfachen und kleiner zu halten, so daß die Verluste beider oft nicht größer sind als ein Hauptumspanner, der durch zusätzliche Regelwindungen vergrößert wird.

l) Die Berührungsspannung an Stromrichtergefäßen

Im Zusammenhang mit den Sparschaltungen ist es von Interesse, die höchsten Spannungen kennenzulernen, die in einem Gleichrichter auftreten können. Diese bestehen zwischen Anode und Kathode, wenn der Lichtbogen nicht arbeitet. Die jeweils arbeitende Anode wird mit der Kathode über den Lichtbogen praktisch kurzgeschlossen, so daß die Spannung an der nicht arbeitenden Anode stark erhöht ist. Diese Spannung, nach Bild 6b von $0 - 2\pi$ ausgewertet, ist für Zweiphasengleichrichter:

$$U_{02} = \frac{2 \cdot u_3}{\sqrt{2}} - u_0 \dots \dots \dots (34)$$

für Dreiphasengleichrichter:

$$U_{03} = \frac{2 \cdot u_3}{\sqrt{3}} - u_0 \dots \dots \dots (35)$$

und für den Sechphasengleichrichter:

$$U_{06} = 2 \cdot u_3 - u_0 \dots \dots \dots (36)$$

Es sei darauf hingewiesen, daß beim Messen des Lichtbogenverlustes mittels Wattmeter eine Spannungsspule verwendet werden muß, die dieser hohen Spannung entspricht. Beim Erdschluß einer Anode oder deren Zuleitung bei nicht geerdeten Anlagen besteht an den anderen Anoden eine erhöhte Berührungsspannung.

m) Der Leistungsfaktor

Der Leistungsfaktor entsteht in normalen Wechselstromnetzen durch die Verschiebung des Stromes gegen die Spannung. Dies ist die Verschiebung der Grundwelle um eine bestimmte Anzahl elektrischer Grade, für die als Maßstab der Cosinus zugrunde gelegt wird. Bei den Stromrichtern entsteht außer dieser Verschiebung, die durch Induktivität oder durch Zündeinsatzverschiebung hervorgerufen wird, noch eine Kurvenverzerrung. Wenn nach Bild 7 der Primärstrom eines Einphasengleichrichters eine rechteckige Form annimmt, ohne eine Phasenverschiebung gegen die Spannungskurve zu erhalten, ergibt die Rechnung und Messung mit einem Wattmeter einen Leistungsfaktor von etwa 0,9, nicht aber mit einem Blindstromzähler, weil dieser die Verschiebung der Grundwelle anzeigt. Nach dem heutigen Stand der Untersuchungen und Berechnungen, denen sich auch der VDE. in seinen Regeln für Stromrichter angeschlossen hat, unterscheidet man demnach:

1. Den Leistungsfaktor λ , der durch die Messung der Wirkleistung N_p , der primären Netzspannung U_1 und des Primärstromes J_1 des Drehstromnetzes bestimmt wird.

$$\lambda = \frac{N_p}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot J_1} \dots \dots \dots (37)$$

2. Den Verschiebungsfaktor, der durch die Messung der aufgenommenen Wirkleistung N_p und Blindleistung N_b bestimmt wird.

$$\cos \varphi = \frac{N_p}{\sqrt{N_p^2 + N_b^2}} \dots \dots \dots (38)$$

Die üblichen Leistungsfaktoranzeiger geben den Verschiebungsfaktor an. Die Elektrizitätswerke richten sich nach den Angaben der Wirk- und Blindleistungszähler. Bild 226 zeigt die mit Wattmetern gemessenen Leistungsfaktoren der Ein-, Drei-, Sechphasengleichrichter bei verschiedenen Belastungen. In der Praxis zeigten Blindleistungszähler als mittleren Wert beispielsweise an:

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= 0,88 \text{ bei Dreiphasengleichrichtern,} \\ \cos \varphi &= 0,93 \text{ bei Sechphasengleichrichtern.} \end{aligned}$$

Unter 20 % Belastung werden diese Werte durch die Magnetisierungsströme der Umspanner verringert. Die Kurvenwerte sind vom Verfasser bereits in der ETZ. 1924, H. 24 veröffentlicht worden. Sie sind durch die spätere Unterteilung in den Leistungsfaktor und Verschiebungsfaktor¹⁾ verständlicher geworden. Die zeitweise übliche Bezeichnung Verzerrungsfaktor anstatt Leistungsfaktor entspricht demnach nicht der Wirklichkeit, denn letzterer zeigt den Verschiebungsfaktor einschließlich dem durch Kurvenverzerrung erhöhten Effektivstrom an.

1. Der Verzerrungsfaktor, die Oberwellen und ihr Einfluß auf das Drehstromnetz. Der Verzerrungsfaktor wurde wohl zuerst von Krijger²⁾ 1923

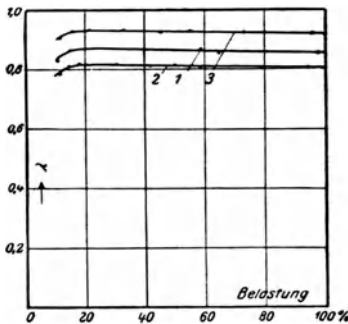


Bild 226.
Leistungsfaktor der Gleichrichter
1 = Einphasen-Gleichrichteranlage,
2 = Dreiphasen-Gleichrichteranlage,
3 = Sechsphasen-Gleichrichteranlage.

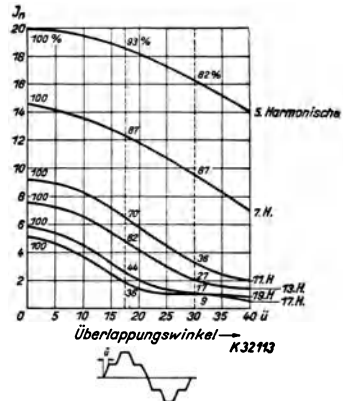


Bild 227. Oberwellen im Primärstrom der Gleichrichter in Abhängigkeit vom Überlappungswinkel bei unendlich großer Glättungsdrosselspule

veröffentlicht. Durch die Verzerrung entstehen stark ausgeprägte Oberwellen, die eine Mehrbelastung der Dämpferwicklungen in Drehstromgeneratoren im Gefolge haben. In der Tabelle 7 sind die auftretenden Oberwellen der einzelnen Gleichrichterarten aufgetragen. In neuerer Zeit ist die Einwirkung der Oberwellen auf die speisenden Drehstromnetze eingehend untersucht worden³⁾. Jedes Drehstromnetz besteht aus einem symmetrischen Dreiphasen- und einem durch Verzerrungen und Oberwellen erzeugten überlagerten Einphasensystem. Vergleicht man die Ordnungszahlen der Tabelle an Sechsphasengleichrichtern, so entstehen die 5—7—11—13—17—19—23—25 höheren Harmonischen. Hieraus errech-

¹⁾ Meyer-Delius, BBC. Gr. 749, 1931, H. 5; M. Schenkel, ETZ. 1935, H. 26; L. Lebrecht, ETZ. 1935, H. 35 u. 36; Schulze, ETZ. 1937, H. 34 u. 35; K. Müller-Lübeck, Forschung u. Technik, Berlin, Jul. Springer, 1930.

²⁾ P. Krijger, ETZ. 1923, S. 286; Arch. f. Elektrot. 1924, H. 6.

³⁾ M. Stöhr, AEG.-Mitt. 1934, H. 10 u. 11; H. Meyer-Delius, ETZ. 1933, H. 40; H. Jungmichl, ETZ. 1931, H. 6; L. Lebrecht, ETZ. 1935, H. 35 u. 36.

Tabelle 7

Oberwellengrundzahl 1—25. (Der Effektivwert der Oberwelle ist die Quersumme von 20—4 für Sechssphasen-Gleichrichter und von 9,1—4 für Zwölfphasen-Gleichrichter)

Phasen- zahl	Effektivwert der Oberwelle $I_n = 1/n \cdot I_1$									Gesamt- effektiv- wert
	$n = 1$	5	7	11	13	17	19	23	25	
6	100	20	14	9,1	7,7	5,9	5,3	4,3	4	105
12	100	—	—	9,1	7,7	—	—	4,3	4	101

(Übernommen von *L. Lebrecht*, ETZ. 1935, H. 35 u. 36.)

net sich der überlagerte Einphasenstrom in kVA_0 im Verhältnis zur kVA-Größe der Gleichrichteranlage

$$kVA_0 = kVA \cdot \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{7} + \frac{1}{11} \dots \frac{1}{25} \right) \dots \dots \dots (39)$$

Dies ergibt etwa 60 % Oberwellenstrom beim sechssphasigen Gleichrichter. Die Induktivitäten der Umspanner, des Netzes, der Anoden- und Gleichstromdrosselspulen bewirken jedoch durch die Stromnacheilung je nach der Größe des Überlappungswinkels eine Verminderung der Oberwellenströme nach Bild 227 auf etwa 30 %. Wenn demnach ein Generator von 10000 kVA etwa 7000 kVA in ein normales Drehstromnetz speist, das 5 % Oberwellenstrom hat, ferner 3000 kVA für eine Sechssphasengleichrichteranlage, so entsteht ein Oberwellenstrom von

$$\begin{aligned} 0,05 \cdot 7000 &= 350 \\ 0,30 \cdot 3000 &= 900 \\ kVA_0 &= 1250 \end{aligned}$$

Dies ist etwa bei einer Dämpferwicklung von 15 % nahezu die zulässige Grenze der Gleichrichterbelastung. Diese Tatsache führte zu dem Ergebnis, daß heute für größere Gleichrichteranlagen vielfach Zwölfphasengleichrichter genommen werden, die nur die 11—13—23—25 Oberwelle führen. Der Oberwellenstrom hat dann noch die Größenordnung von etwa 12 bis 15 %, wenn der Überlappungswinkel berücksichtigt wird. Bild 228 zeigt links den Primärstrom und die Spannung einer zwölfphasigen, gittergesteuerten Gleichrichteranlage und rechts die einer sechssphasigen Anlage. Die Phasenverschiebung entsteht durch Gitterregulierung.

Es sei noch darauf hingewiesen, daß die stromliefernden Netze bei der Planung von Stromrichteranlagen mit Rücksicht auf die Oberwellen auch auf ihre Kapazität und Induktivität untersucht werden müssen¹⁾. Im Netz können Schwingungskreise angeregt werden, die der Frequenz einer der

¹⁾ *L. Lebrecht* u. *A. Partzsch*, AEG.-Mitt., Febr. 1939.

Oberwellen des Gleichrichters entsprechen. Hierdurch entsteht im Netz ein Umlaufstrom, der Energieverluste und unangenehme Spannungserhöhungen

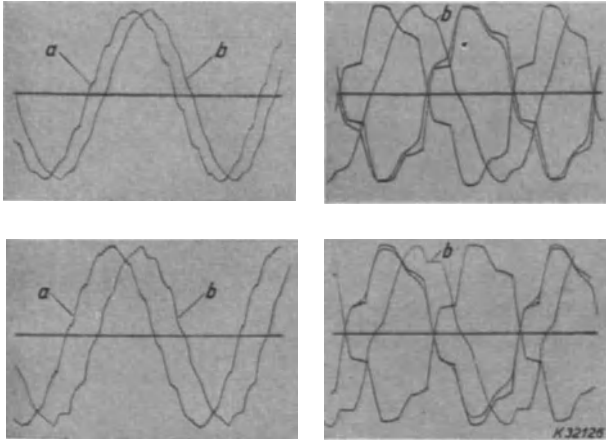


Bild 228. Spannungs- und Stromkurven bei Gleichrichterbelastung
 $a =$ Ströme, $b =$ Spannungen,
 linke Seite zwölfphasigen Betrieb, rechte Seite sechsphasigen Betrieb
 Bilder 227 u. 228 aus *L. Lebrecht*, ETZ. 1935, H. 35 u. 36)

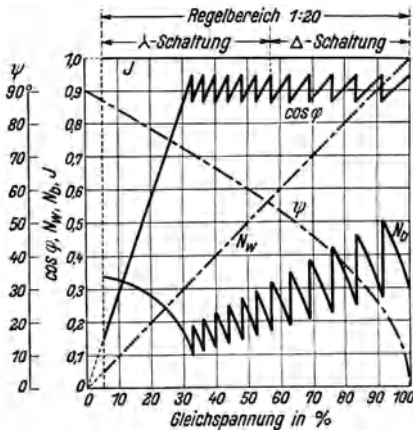


Bild 229. Spannungsregelung bei einem konstanten mittleren $\cos \varphi$ (SSW.)
 $N_w \cdot \cos \varphi =$ Verlauf ohne besondere Maßnahmen,
 $N_b =$ Blindstrom durch Anwendung von Grobstufen, $\cos \varphi =$ bei Anwendung von Grobstufen

im Gefolge hat. Diese Untersuchungen haben jedoch nur für sehr große Anlagen Bedeutung.

2. Der Leistungsfaktor gittergesteuerter Gleichrichter. Der Leistungsfaktor wird bei gittergesteuerten Gleichrichtern nach Bild 229 etwa im gleichen Verhältnis schlechter, wie die Spannung sinkt. Durch die vorhandenen Reaktanzen weichen die gemessenen Werte wohl etwas von der Geraden ab, doch mit einiger Annäherung trifft die Gerade N_w zwischen 0 und 100 für die Praxis zu. Im Bild 230 sind die Verschiebungen der Ströme zwischen

0° und 60° und der Einfluß auf den Leistungsfaktor gut zu erkennen. In Gleichrichteranlagen für Lichtnetze ist die Verschlechterung relativ gering, weil bei kleiner Spannung, also bei großer Sperrung, wohl immer kleine Ströme entnommen werden, so daß die Blindleistung nicht groß ist. Anders

verhält sich ein Gleichrichter, der Gleichstrommotore, Elektrolyseure, Batterien usw. speist, die bei großem Strom längere Zeit hindurch eine wesentlich kleinere Spannung erhalten müssen. Bei einem Motor, der eine Bandstraße mit 30% Drehzahlverminderung bei gleichem Drehmoment speist, hat ein gittergesteuerter Gleichrichter einen Leistungsfaktor von etwa 0,7 und bei der halben Drehzahl von 0,5. Das einfachste Mittel zur Verbesserung

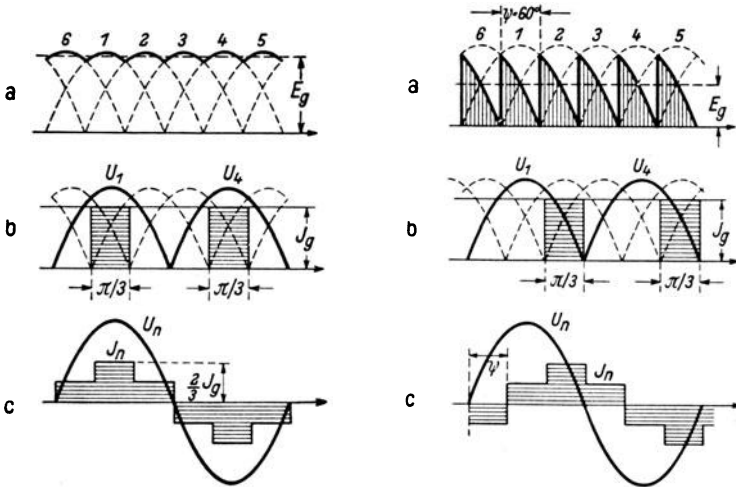


Bild 230a. Ungesperrt, voller Stromdurchlaß. Bild 230b. Stromkurven um 60° gesperrt.

J_g = Gleichstrom, J_n = Primärstrom, U = Wechselspannung

Bild 230. Strom- und Spannungsverlauf an gittergesteuerten Gleichrichtern¹⁾

des Leistungsfaktors ist die Einfügung von Phasenschieberkondensatoren in den Wechselstromkreis. Die Größenbestimmung erfolgt in der üblichen Weise wie für normale Drehstromnetze. Phasenschieberkondensatoren sind für zahlreiche gittergesteuerte Gleichrichter verwendet worden. Unter anderem auch in Elektrolyseanlagen. Sie können kleiner bemessen werden für Motorbetriebe, deren Leistung mit abnehmender Drehzahl zurückgeht, wie Wasserpumpen, Ventilatoren und Windkanallüfter. Eine gute Lösung wäre durch den Vorschlag von Marx, Bild 185, Abschn. 12f, denkbar. Auch in der J. Inst. electr. Eng. 1938, S. 429 berichtet Babat über Grid-controlled phase-advancers (gittergesteuerte Phasenschieber), doch in der Praxis sind solche Einrichtungen noch nicht bekannt.

3. Die gemischte Stufen- und Gitterregulierung zur Leistungsfaktorverbesserung. Die zweckmäßig als Lastwähler ausgebildeten Stufenschalter, Bild 231, werden zum Grob- und die Steuergitter zum Feinregeln benutzt. Mit Hilfe dieser oder ähnlicher Einrichtungen kann je nach Wahl der Grobstufen ein Leistungsfaktor der $\cos \varphi$ -Kurve, Bild 229, erreicht werden. Im Bild ist

¹⁾ SSW.-Sonderdruck, SGO.-Nr. 4183/47; K. Müller-Lübeck u. E. Uhlmann, Archiv f. E., Bd. 27, 1933, H. 5; E. Uhlmann, E. u. M., Wien 1933, H. 50.

außer der Verbesserung durch Grobstufen eine stärker wirkende Umschaltung der Transformatorprimärwicklung von Stern in Dreieck¹⁾ zu erkennen. Die Blindleistung N_b bleibt verhältnismäßig niedrig und der $\cos \varphi$ wird beim Regelbereich 1 : 20 nicht schlechter als 0,85. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung mehrerer Anoden²⁾ für eine Phase, denen verschieden hohe Wechselspannungen zugeführt sind. Diese werden je nach

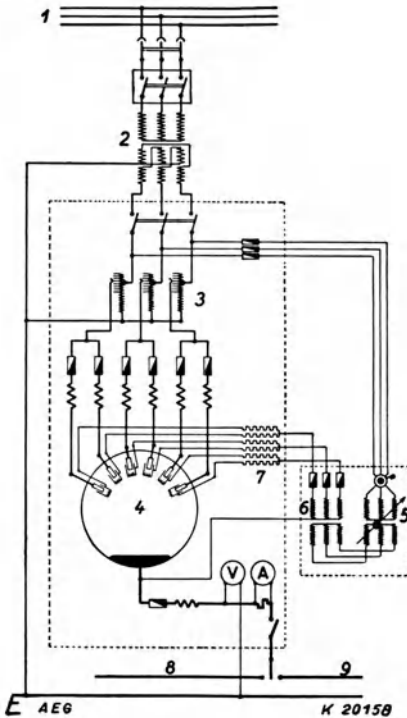


Bild 231. Gemischte Stufen und Gitterregulierung

- 1 = Drehstromnetz,
- 2 = Haupttransformator,
- 3 = Reguliertransformator,
- 4 = Gleichrichterkolben,
- 5 = Drehtransformator,
- 6 = Gittertransformator,
- 7 = Gitterwiderstände,
- 8 = Licht- und Kraftnetz,
- 9 = Bahnnetz.

Wahl der Gleichspannung einzeln oder in Parallelschaltung in Anspruch genommen. Eine solche Schaltung ermöglicht die Einstellung eines Leistungsfaktors über 0,8 in den Regelgrenzen von 20 bis 100%. Sie hat besonders für den Antrieb elektrischer Lokomotivmotore Bedeutung, die von Einphasennetzen gespeist werden. Auf ähnlicher Basis sind noch andere Schaltungen entwickelt worden. Welche Art den Vorzug verdient, wird wohl der Preis entscheiden. Die gemischten Grob- und Feinregelungen werden vielfach für Elektrolysegroßanlagen verwendet.

n) Die Glättungsdrosselspulen und Entstörung der Gleichrichter

Die allgemeine Aufgabe der Glättungsdrosselspule ist im Abschnitt 9 erläutert. Darüber hinaus bildet sie den Hauptbestandteil einer Einrichtung zum Entstören von Gleichrichtern, auch ist sie für gittergesteuerte Gleichrichter unerlässlich. Ihre Größe wird durch Erfahrungswerte bestimmt, weil die unendlich große Drosselspule nicht ausführbar ist. Die Selbstinduktion der Spule beträgt

$$L = \frac{U_s}{2\pi \cdot f_2 \cdot J_2} \dots \dots \dots (40)$$

¹⁾ K. Baudisch, Siemens-Zeitschr. Okt. 1933, Mai 1935.

²⁾ E. Ichlmann, E. u. M. 1933, H. 50.

wobei für f_2 die Frequenzen der Oberwellen des Gleichstroms eingesetzt werden müssen. Diese betragen bei Einphasengleichrichtern 100, bei Dreiphasen- 150, Sechsphasen- 300 und bei Zwölfphasengleichrichtern 600 Hz. Die Ströme der höheren Harmonischen haben nur noch geringe Glättungswirkung. Die Selbstinduktion der Spule soll für Glättungseinrichtungen 1 bis 3 m. H. betragen. Wenn sie lediglich zum Ausgleich der stärksten Pulsationen oder zur Kurzschlußdämpfung (Abschnitt 9) verwendet wird, genügt erfahrungsgemäß eine Größe von 0,3 bis 0,5 m. H. Unter 20 % Belastung geht die glättende Wirkung zurück, bei Belastungen über 20 % soll durch die Glättungsdrosselspule der Gleichstromeffektivwert dem Mittelwert angeglichen werden, so daß Drehspulensinstrumente und Dynamometer gleiche Werte zeigen. Die Formfaktoren sind (Bild 160):

Phasenzahl	2	3	6	12
Formfaktor	1,11	1,02	1,001	1,000

Sie werden durch die Glättung und bei Belastungen über 20 % auf 1 vermindert, so daß der Effektivwert dem Mittelwert gleich wird.

1. Die Spannungskurven der Gleichstromkreise bei gitterregulierten Gleichrichtern und die Glättungsdrosselspule. Bild 12 zeigt die Gleichspannung sechshephasiger Gleichrichter mit und ohne Glättungsdrosselspule. Das Oszillogramm läßt die Wirkung der Glättung gut erkennen. Die Drosselspule soll für gittergeregelte Gleichrichter mehrere Aufgaben erfüllen.

- a) Wenn nach Bild 232 ¹⁾ bei 50 % Sperrung der gleiche Strom fließt wie beim Höchstwert (ungesperrt), ist der Scheitelwert der Stromspitzen ohne genügende Glättung beträchtlich höher als beim Höchstwert der Spannung. Hierdurch werden die Anoden der Stromrichtergefäße überlastet.
- b) Wenn für Motorbetriebe die Spannung auf Beträge von 50 % und weniger vermindert wird, entsteht für einen Nebenschlußmotor nach den Kurven I praktisch die Charakteristik eines Hauptstrommotors, d. h. seine Drehzahl ist von der Belastung abhängig. Die Kurve II ähnelt dem Spannungsverlauf der Saugdrosselspulenschaltung, während die Spannungswerte der Kurven I durch den überlagerten Wechselstrom höher liegen als der Mittelwert. Die geringe Motorinduktivität reicht zur Glättung nicht aus. Hinzu kommt noch, daß ein schwach belasteter Motor wie ein Kondensator wirkt und eine dem höchsten Scheitelwert entsprechende Spannung aufnimmt. Bei vorhandener Glättung bleibt die Motordrehzahl von 10 bis 100 % Belastung praktisch konstant, doch muß für eine Grundlast gesorgt werden, sonst läuft der Motor im Leerlauf auf zu hohe Drehzahl.

¹⁾ Anschütz u. Stöhr, AEG.-Mitt. 1937, H. 5.

Besonders diese Ausführungen lassen die Glättungsdrosselspule als eines der wichtigsten Bauelemente der Stromrichter erkennen.

2. Die Entstörung der Gleichrichter. In Gleichrichteranlagen unterscheidet man zwischen Hoch- und Niederfrequenzstörungen. Beide machen sich durch Brummgeräusche in Fernsprech- und Rundfunkanlagen bemerkbar. Ferner entstehen galvanisch und magnetisch übertragene Störungen. Erstere treten in Rundfunkempfängern auf, die von Gleichrichtergleichstromnetzen gespeist werden. Die magnetische Übertragung entsteht durch Bahn- oberleitungen, deren Oberwellen induktiv auf Schwachstromanlagen übertragen werden. Es ist bekannt, daß nicht alle Gleichrichteranlagen stören,

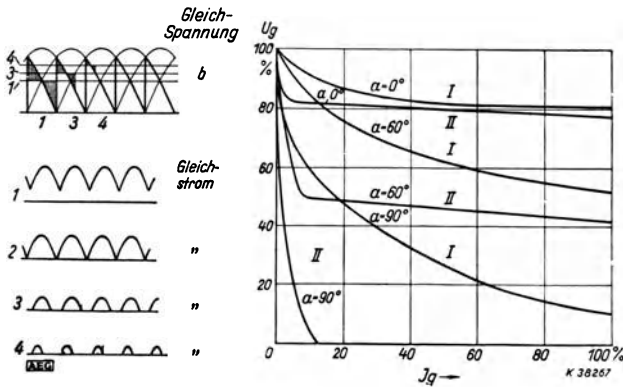


Bild 232. Einfluß der Kathodendrossel auf die Stromspannungs-Kennlinie von Stromrichtern beim Arbeiten auf Gegenspannung

Links oben: Liniendiagramme der gleichgerichteten Spannung 1, 3, 4, b Mittelwert der Gleichspannung. Links unten: Liniendiagramme 1... 4 des zugehörigen Gleichstromes. Rechts: Belastungskennlinie, α - Zündverzögerungswinkel, U_g - Mittlere Gleichspannung, J_g - Gleichstrom, I = ohne Kathodendrossel, II = mit Kathodendrossel

die Störmöglichkeit hängt von der Leitungsführung ab. Licht- und Kraftnetze haben nebeneinanderliegende Plus- und Minusleiter, deren Oberwellen sich in ihrer Wirkung aufheben. Bahnanlagen dagegen nicht, weil Teilströme durch die Erde zurückfließen. Auch nehmen die Fahrdrachtspeiseleitungen oft andere Wege als die zum Rückleiter benutzten Fahrschienen. Hochfrequente Störungen entstehen durch die Vorgänge im Lichtbogen der Gleichrichter und erreichen oft Frequenzen von mehreren 1000 Hz. Sie sind den Anodenströmen überlagert, wodurch der Gleichrichter als Störsender wirkt. Da ihre Energie sehr gering ist, lassen sie sich nach Bild 233 durch parallel zu den Lichtbogenwegen geschaltete kleine Kondensatoren C_1 von etwa 0,1 MF beseitigen. Die Oberwellenschwingungen treten ganz willkürlich auf und sind vom Vakuumzustand der Gefäße abhängig. Neue, gut evakuierte Gefäße haben oft durch die Zündspitze, Bild 72, angeregte Ober-schwingungen, während ältere Gefäße weniger zur Störung neigen.

Niederfrequente Störspannungen entstehen durch den Gleichstrom selbst, ihre Frequenz ist durch die Phasenzahl der Gleichrichter gegeben. Drei-phasengleichrichter mit der Grundwelle 150 haben hauptsächlich Störfrequenzen von 150, 300, 450, 600, 750, 900, 1200, Sechsfasengleichrichter von 300, 600, 900, 1200 und zwölfphasige Gleichrichter von 600 und 1200 Hz.

3. Die Glättungseinrichtungen. Um den störenden Einfluß der dem Gleichstrom überlagerten Wechselströme zu beseitigen, werden nach Bild 233 Glättungseinrichtungen vorgesehen, die den Störfrequenzen entsprechende Schwingungskreise ¹⁾ erhalten. Die Induktivität und Kapazität in diesen Kreisen müssen der Resonanzbedingung der auszusiebenden Oberwelle genügen.

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot c} \dots \dots \dots (41)$$

Es soll jedoch in einzelne Resonanzkreise eine Induktivität geschaltet werden, die nicht mehr als 2- bis 3mal größer ist als die der Glättungsdrosselspule. Bei größeren Induktivitäten stören bereits kleine Frequenzänderungen im Drehstromnetz die Resonanz. Jeder Kreis stellt für seine Frequenz einen Kurzschluß dar, wodurch die Wechselströme am Weiterfließen in das Gleichstromnetz verhindert werden. Wegen des Verlustes in den Resonanzkreisen ist jedoch der Nullwert nicht zu erreichen, daher hat man sich mit den Telegraphen- und Rundfunkbehörden in Europa auf Mindestwerte geeinigt. Die Wahl einer großen Glättungsdrosselspule allein führt nicht zum Ziel,

denn die Netzinduktivität kann bei Leitungen von einigen km Länge schon 7 bis 10 m. H. betragen, so daß selbst beim Einschalten einer großen Drossel von 2 bis 3 m. H. die Oberwellen nicht wesentlich ermäßigt werden, sie können nur durch Schwingungskreise dem Nullwert nahe gebracht werden. Wesentlich leichter ist diese Aufgabe bei kleinen Strömen unter 1 A zu lösen. Für kleinere Rundfunkempfänger verwendet man im Gleichrichterkreis häufig nur einen Kondensator, der sämtliche Oberwellen ohne

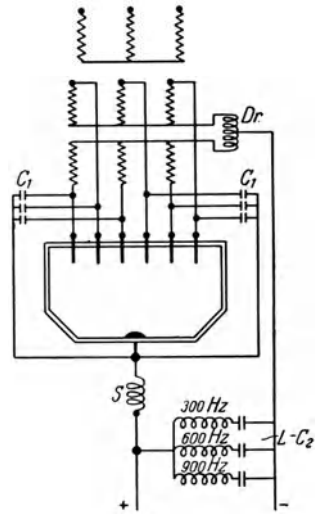


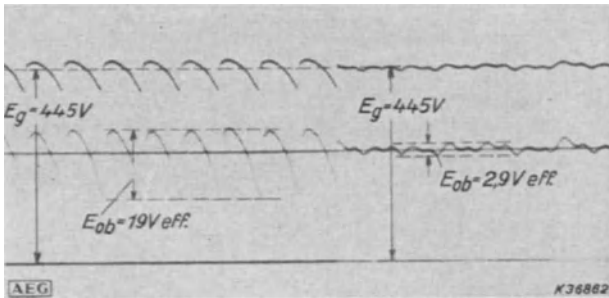
Bild 233.
Entstörung an Gleichrichtern
 C_1 = Kondensatoren für die Hochfrequenz-Entstörung, Dr = Saugdrosselspule, S = Glättungsdrosselspule, $L-C_2$ = drei verschiedene Schwingungskreise für die Ausbiebung von Störspannungen

¹⁾ H. Geise u. W. Plathner, Elektr. Bahnen 1933, H. 9; AEG.-Mitt. 1929, H. 11; Busch u. H. Geise, VDE.-Fachberichte 1928; Jäger, Telegr. u. Fernsprechtechn. 1926, Bd. 15; E. Schulze, ETZ. 1937, H. 34 u. 35; H. Jungmichl u. R. Eichacker, Siemens-Zeitschr. 1929, H. 1. Marti u. Winograd a. a. O., S. 317.

Rücksicht auf ihre Frequenz praktisch vollkommen aufsaugt und die Gleichspannung auf den Scheitelwert der Wechselspannung erhöht.

Zur Bemessung der Störgröße wird zwischen zwei Werten unterschieden:

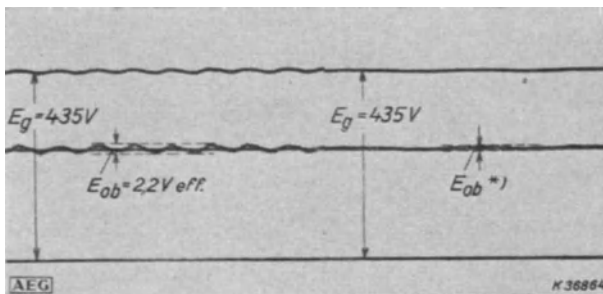
- a) Die Oberwellenspannung oder der Oberwellengehalt ist die Amplitude der überlagerten Wechselspannung. Sie beträgt bei ungeglätteten Dreiphasengleichrichtern 17,7, bei Sechsphasen- 4,5 und bei Zwölfphasengleichrichtern 1 % Effektivwert der Gleichspannungshöhe. Durch Gitterregelung wird sie bei Spannungsabsenkung noch weiter erhöht.



Ohne Querkreis

Mit Querkreis

Bild 234. Gleichspannung E_g und Oberwellenspannung E_{ob} bei Belastung mit 50 A durch Netz und Aussteuerung von rund 89 % (500 A Gleichrichter, 6phasig, für ein Lichtnetz)



Ohne Querkreis

Mit Querkreis

Bild 235. Gleichspannung eines rotierenden Uniformers. *) Wert nicht ablesbar

- b) Die Störspannung. Bei der Bestimmung der Störspannung ist die Empfindlichkeit des Ohres für die einzelnen Frequenzen der Oberwellenspannung zu berücksichtigen. Die Störspannung ist ein angenommener Wert und entspricht einer Spannung der Frequenz von 800 Hz, die den gleichen Störstrom wie die Summe aller Oberspannungen von z. B. 300 bis 1200 Hz ins Netz schicken würde. Dieser Wert wird zugrunde gelegt, weil das menschliche Ohr von allen in Frage kommenden Frequenzen den erzeugten Brummtönen bei 800 Hz am lautesten wahrnimmt. Von

Siemens & Halske ist ein Geräuschspannungsmesser entwickelt worden, mit dem die Geräuschspannung meßbar ist. Dieser Apparat erzeugt einen konstanten Brummtton von 800 Hz, der in seiner Höhe so eingereguliert wird, daß er das gleiche starke Geräusch gibt wie die störende Leitung, dann wird die Geräuschspannung unmittelbar abgelesen.

Die gemessene Geräuschspannung ist wegen der geringen Wahrnehmbarkeit von Störspannungen unter 800 Hz kleiner als die Oberwellenspannungen. Durch die Summe aller Frequenzen ergeben sich ohne Glättung und geringer Belastung beim Dreiphasengleichrichter Störspannungen von 2,4 % der Gleichspannung und beim Sechs- und Zwölphasengleichrichter 1,75 bzw. 0,85 %. Bei Vollbelastung steigen diese Werte an und betragen beim voll ausgesteuerten Sechphasengleichrichter statt 1,75 erfahrungsgemäß etwa 2,75 bis 3 %. Die Einschaltung der Glättungseinrichtungen nach Bild 234 vermindert beispielsweise die durch Gittersteuerung erzeugte Oberwellenspannung von 4,2 % auf 0,65 % bei 50 A Belastung und auf 0,34 % bei 300 A Belastung¹⁾ entsprechend einer Aussteuerung von 94 %. Die bei diesem Gleichrichter bei allen Belastungen gemessene Störspannung war kleiner als 0,5 % und störte vom Netz gespeiste Rundfunkapparate nicht mehr. Bild 235 zeigt analoge Messungen mit Umformern.

Es ist jedoch nicht ratsam, in einem größeren Netz, das von mehreren Gleichrichtern gespeist wird, nur einen Gleichrichter mit Entstörung einzurichten, denn in dieser Anordnung fließt ein Oberwellenstrom durch das Gleichstromnetz. Unter Umständen werden die induktiven Beeinflussungen von Schwachstromanlagen hierdurch verstärkt. Günstig wirken sich dagegen in unmittelbarer Nähe der Gleichrichter stehende Generatoren oder Batterien aus, weil sie einen Kurzschluß für die dem Gleichstromnetz überlagerten Wechselspannungen darstellen, und die höheren Harmonischen gelangen nicht in das Gleichstromnetz.

Ehe der Einbau von den oft teuren Entstörungseinrichtungen geplant wird, sollte stets versucht werden, die gestörten Schwachstromapparate örtlich zu entstören.

o) Der Wirkungsgrad der Stromrichter

Der Wirkungsgrad der Stromrichter ist in der Hauptsache vom Lichtbogenverlust in den Stromrichtergefäßen abhängig. Dieser beträgt von Null bis Vollast je nach Gefäßgröße 10 bis 25 V. Er ändert sich bei den verschiedenen Belastungen nur um einige Prozent, so daß praktisch bei allen Belastungen der gleiche Lichtbogenverlust besteht. Der nächst größere Verlust entsteht im Umspanner, dessen Wirkungsgrad bekanntlich von $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{1}$ Last ebensowenig verändert verläuft. Die dann noch bestehenden Einzelverluste sind im Verhältnis zur umgeformten Leistung klein. Die Bestimmung des

¹⁾ P. Denzel, Stuttgart, AEG.-Mitt. 1935, H. 12.

Gesamtwirkungsgrades geschieht durch Messung der Leistungsaufnahme und Leistungsabgabe oder Addition der Einzelverluste für mehrere Belastungswerte zwischen $1/10$ bis $1/1$ Last. Der Gleichrichterwirkungsgrad wird erst unter 10 % Belastung merklich geringer. Im Gegensatz hierzu wird der Wirkungsgrad rotierender Umformer bereits unter $1/2$ Last durch die Dauerverluste, wie Lagerreibung und Wicklungsverluste, vermindert (Bild 76). Der günstige Wirkungsgrad, auch bei Teillasten, war wohl in der Hauptsache für die große Verbreitung der Gleichrichter entscheidend, denn es gibt nur wenige Betriebe, die stets mit Vollast beansprucht werden. In einer Stromrichteranlage entstehen folgende Einzelverluste:

- a) Umspannerisenverluste.
- b) Umspannerkupferverluste.
- c) Lichtbogenverluste in den Stromrichtergefäßen.
- d) Verluste für die Hilfserregung.
- e) Verluste der Kühleinrichtung (Kühlventilatoren, Kühlwasser).
- f) Stromverbrauch der Vakuumpumpen.
- g) Verluste der Regelorgane bei Spannungsregulierung.
- h) Drosselspulenverluste.
- i) Leitungsverluste.

Der Gesamtwirkungsgrad ist dann:

$$\eta_g = \frac{J_2 \cdot U_2}{J_2 \cdot U_2 + (v_a + v_b + \dots + v_i)} \dots \dots \dots (42)$$

Um den Verlust der Kühlung richtig bewerten zu können, muß der Wasserpreis mit dem Strompreis verglichen werden, der für Kühlventilatoren oder Druckluftkühlung aufgewendet wird¹⁾. Auch müssen die Kosten des Rückkühlerverbrauches eingesetzt werden. Bei einem 1000-A-Gleichrichter mit stündlich 1 m³ Wasserverbrauch, einem Wasserpreis von 0,25 RM und einem Strompreis von 0,10 RM je kW-Std. muß ein Stromverbrauch von 2,5-kW-Std. angesetzt werden. Dies entspricht einem Kühlmotor von 2,5 kW Leistung. Die Wirkungsgradverschlechterung durch das Kühlwasser beträgt demnach für 230-V-Anlagen bei den genannten Preisen 1,1 % bei Vollast. Bei höheren Gleichspannungen wird der Einfluß der Kühlverluste merklich geringer. Mit Hilfe dieser Verlustzahlen sind für verschiedene Gleichrichter Wirkungsgrade errechnet und gemessen worden, die in den Bildern 236 bis 240 wiedergegeben sind. Aus den Bildern 236 bis 237 ist der bei höheren Spannungen höher werdende Wirkungsgrad der Hg-Dampfstromrichter gut zu erkennen. Durch Sonderausführungen und Schaltungen sind von einzelnen Firmen Verbesserungen erzielt worden, z. B. durch die Abschaltung der Kühlung²⁾ bei kleiner Last, auf Seite 114—116 sind

¹⁾ Widmer u. Leuthold, BBC.-Mitt. 1931, S. 362.

²⁾ G. W. Müller, AEG.-Mitt. 1924, H. 7.; Fr. Hellmuth a. a. O., S. 38 (vgl. auch S. 69—70 des Buches).

einige Kühlmittelregelungen angegeben. Auch zur Einsparung des Kühlwassers werden Regeleinrichtungen verwendet.

Bedeutungsvoll ist ferner die Gegenüberstellung von Gleichrichtern (Bild 239) mit den Wirkungsgraden¹⁾ rotierender Umformer. Bild 238 zeigt den bei allen Gleichspannungen gleichbleibenden Wirkungsgrad der Trockengleichrichter in Gegenüberstellung zu den bei höheren Spannungen höher wer-

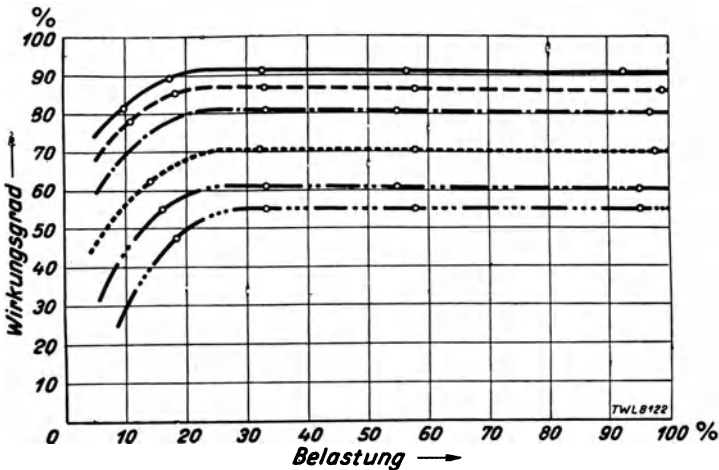


Bild 236. Wirkungsgrade der Gleichrichter

—	440 V Gleichspannung	63 V Gleichspannung
- - -	220 V "	- · - ·	50 V "
- · - ·	110 V "	- · - ·	40 V "

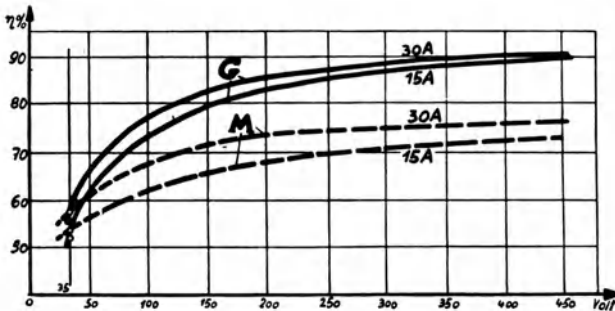


Bild 237. Wirkungsgrad kleiner Gleichrichter (G) und kleiner rotierender Umformer (M) bei verschiedenen hohen Gleichspannungen (von ELIN. ermittelt)

denden Wirkungsgraden der Gleichrichter mit Entladungsgefäßen. Zwischen Glühkathoden- und Hg-Dampf-Entladungsgefäßen bestehen prinzipiell keine Unterschiede im Wirkungsgrad, bei geringen Gleichspannungen besteht jedoch durch den geringen Lichtbogenverlust (Bild 59) von nur 10 V für Glühkathodengleichrichter ein Vorteil gegenüber den Hg-Dampfgleich-

¹⁾ H. Anshütz, AEG.-Mitt. 1936, H. 11.

richtern. Die Umspannerwirkungsgrade sollen zweckmäßig so ausgelegt werden, daß bei der zu erwartenden Durchschnittsdauerbelastung die geringsten Verluste entstehen. In Elektrolyseanlagen wird man den besten Wirkungsgrad für Vollast und in Bahnanlagen für die sich aus den Stromspitzen ergebenden mittleren Werte meist $\frac{2}{3}$ Vollast zugrunde legen. Normale Umspanner haben bei 60 bis 70 % Belastung ihren höchsten Wirkungsgrad.

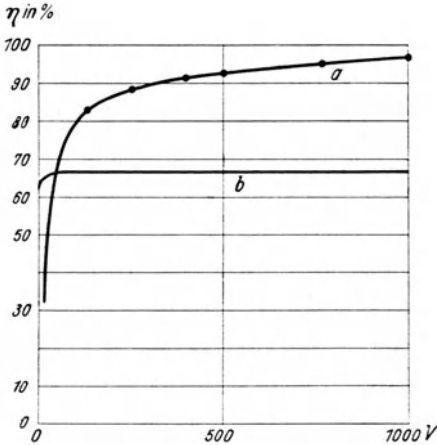


Bild 238. Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Höhe der Gleichspannung. *a* = Gleichrichter mit Entladungsgefäßen, *b* = Trockengleichrichter. (Vgl. hierzu Bild 156. Die Werte beider Gleichrichterarten sind bei Vollast angenommen, bei Halblast erhöhen sie sich für Trockengl. um 5 bis 10 % und für Hg-Gl. um 0,5 bis 1 %)

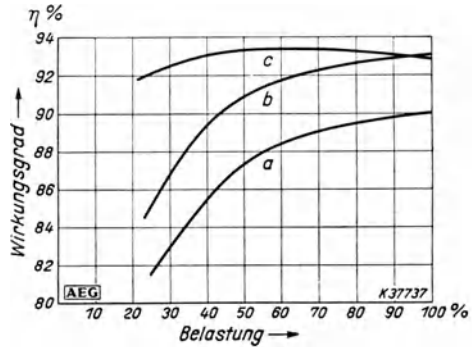


Bild 239. Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Belastung

a = Motorgenerator, *b* = Einankerumformer mit Umspanner, *c* = Gleichrichter mit Umspanner 1000 kW, 500 V. Drehstrom 6 kV (vgl. auch Bild 76)

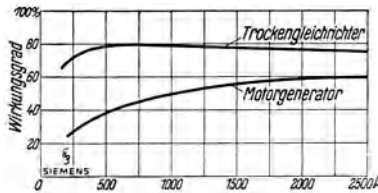


Bild 240. Wirkungsgrad in Kleinspannungsanlagen ¹⁾

13. Die Anwendungsgebiete und Planung von Stromrichteranlagen, Schaltungen, Schaltanlagen und Schaltapparaten

Die Stromrichter lassen sich überall verwenden, wo eine Stromart, Spannung oder Frequenz in einer anderen Form wiedergegeben werden soll. Außerdem lassen sich mit Hilfe der Entladungsgefäße, durch Beeinflussung der Steuerungsgitter mit schwachen Strömen, Schaltvorgänge größerer Ströme beherrschen, und zwar mit einer Schnelligkeit, Häufigkeit und Genauigkeit, die mit mechanisch oder elektrisch-mechanisch bewegten Schaltapparaten nicht zu

¹⁾ H. Hoffmann, Zeitschr. d. VDI. 1940, H. 4.

erreichen ist. In der Schaltung der einzelnen Stromrichterarten bestehen wohl grundsätzliche Unterschiede, doch im äußeren Aufbau weichen sie nur wenig voneinander ab. Um die Errichtung von Stromrichteranlagen zu erläutern, sollen daher die Erfahrungen mit Gleichrichtern zugrunde gelegt werden.

a) Die Planung

Bei der Planung und Wirtschaftlichkeitsberechnung interessieren folgende Werte:

1. Der Wirkungsgrad.
2. Der Leistungsfaktor.
3. Der Anschaffungspreis.
4. Die Montagekosten.
5. Der Aufwand an laufenden Betriebskosten:
 - a) Stromverbrauch der Kühleinrichtungen,
 - b) Kosten für Kühlwasser,
 - c) laufende Überholungs- und Reinigungsarbeiten,
 - d) Beschaffung von neuen Glaskörpern für Glasgleichrichter.
6. Die Ausgaben für das Bedienungspersonal.

Die Eigenschaften der Stromrichter sind:

1. Gleichbleibender Wirkungsgrad.
2. Gleichbleibender Leistungsfaktor. (Eine Ausnahme besteht durch die Gitterregulierung.)
3. Einfache Spannungsregelung.
4. Ruhender Betrieb.
5. Kein Verschleiß durch umlaufende Kollektoren und Schleifringe.
6. Kein Verbrauch an Schmiermitteln.
7. Hohe Überlastungsfähigkeit und Kurzschlußsicherheit (durch das Fehlen von umlaufenden Schwungmassen werden Kurzschlüsse stark gedämpft).
8. Sofortige Wiederkehr der Spannung nach Unterbrechungen.
9. Geringe Montagekosten durch Fortfall der Fundamente.
10. Einfache Bedienung und geringe Wartung.
11. Leichte Automatisierung:
 - a) ferngesteuerte,
 - b) halbselfsttätige,
 - c) selbsttätige Unterwerke.
12. Sofortige Betriebsbereitschaft.

13. Große Betriebsreserve durch das Aufteilen der Leistung in mehrere Einheiten.
14. Einfache Erweiterungsmöglichkeiten durch Parallelschaltung neuer Einheiten.
15. Geringer Platzbedarf.
16. Die Vereinigung eines Stromrichters mit einer Schaltanlage.
17. Keine Erschütterungen im Betrieb. (Wegen des Fehlens umlaufender Massen entstehen keine Schwingungen in den Gebäuden.)

Um den Forderungen der Praxis gerecht zu werden, sind bei der Erstellung von Gleichrichteranlagen einige Erfahrungswerte zu beachten.

b) Kleinere Stromrichter und Gleichrichter für Batterieladung (Trocken-, Glühkathoden-, Hg-Dampfgleichrichter)

Zum Anschluß an Niederspannungsnetze, zum Laden von Batterien und zum Speisen kleinerer Verbraucher oder Netze werden anschlussfertige

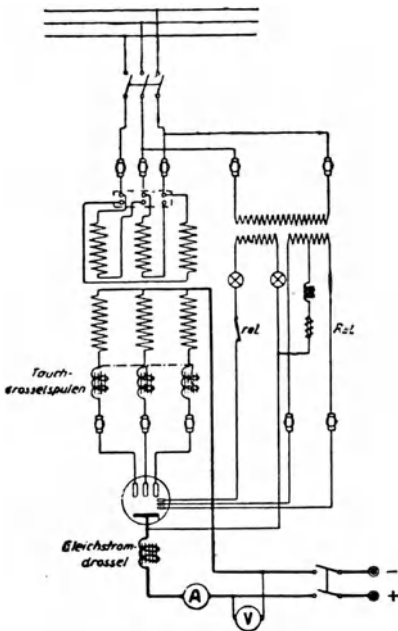


Bild 241. Schaltung eines Batterielade-Gleichrichters mit stufenlos verstellbarer Ladedrosselspule (vgl. Bild 48)

Stromrichter hergestellt. So erhalten die Trocken-, Glühkathoden- und Hg-Dampfgleichrichter Klemmen für den Wechselstrom- und Gleichstromanschluß. Die Leitungsverbindung mit den entsprechenden Netzen hat nach den Richtlinien normaler elektrischer Anlagen zu erfolgen. Selbsttätige Rückstromschalter sind nicht erforderlich, denn Gleichrichter sperren durch ihre Ventilwirkung den Rückstrom, der bei ausgeschaltetem Wechselstrom aus dem Gleichstromnetz oder der Batterie zurückfließen kann. Die selbsttätige Sperrwirkung haben auch Glimmlicht- und Trockengleichrichter in ausreichendem Maße. Je nach der Höhe der Gleichspannung und den örtlichen Verhältnissen besteht für Batterieladung die Auswahl zwischen Trockengleichrichtern, Glühkathodengleichrichtern, Hg-Dampfgleichrichtern,

tern. Um an Stromkosten zu sparen, werden häufig für die selbsttätige Ladung von Batterien Drosselspulen oder Streutransformatoren verwendet. Der Wechselstrom bietet die Möglichkeit, an Stelle der in Gleichstromnetzen oder bei rotierenden Maschinen erforderlichen Vorschaltwiderstände, die eine

Verlustleistung haben, verlustlose Spannungsabfälle mit Hilfe der Ladedrosselspulen zu erzeugen. Hierdurch wird der Wirkungsgrad nicht unwesentlich heraufgesetzt. Auch werden zum Nachregulieren der Ladeströme zusätzlich Regelwiderstände in den Gleichstromkreis geschaltet. Elektrofahrzeuge werden häufig in der Nacht geladen, daher besteht ein großer Bedarf für kleine selbsttätig wirkende Ladeeinrichtungen. Die selbsttätige Zündung der Hg-Dampfgleichrichter oder die Glühkathode gestatten, daß die Ladung nach vorübergehenden Netzspannungsunterbrechungen sofort wieder aufgenommen wird. Nach der Aufladung sorgt ein Ladeschalter für die rechtzeitige Abschaltung des Gleichrichters. Die Schaltung eines Gleichrichters mit eingebauten Ladedrosselspulen zeigt Bild 4 und einen fertigen Gleichrichter mit unten sitzendem Ladeschalter Bild 104. Die im Bild 241 erkenntlichen Tauchdrosselspulen haben leicht verstellbare Eisenkerne, um den Ladestrom genauer einstellen zu können. Sie gestatten auch eine Verstellung des Stromes während des Betriebes.

1. Der Ladevorgang während der selbsttätigen Ladung. Während des Ladevorganges steigt die Batteriespannung langsam an und durch die

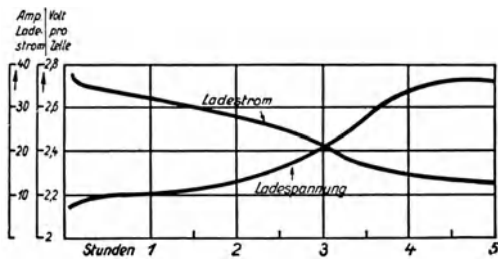


Bild 242. Ladekurve. (Strom- und Spannungsverlauf während des Ladens normaler Bleibatterien)

erhöhte Gegenspannung der Batterie (Bild 242) wird der Strom und die Spannung der Ladedrosselspulen geringer. Dieser Vorgang setzt sich bis zur höchsten Ladespannung der Batterie selbsttätig fort. Die Kurven sind an Elektrokarrenbatterien gemessen worden. Die Eisen-Kadmium-Batterien können mit größerem Strom geladen werden, ohne der Batterie zu schaden. Bei den Bleibatterien muß im Interesse einer langen Lebensdauer der Batterieplatten stets mit dem vorgeschriebenen Strom geladen werden. Der Ladeschalter¹⁾ soll den Ladevorgang selbsttätig unterbrechen, wenn die Batterie aufgeladen ist. Er schaltet bei der Gasentwicklung der Bleibatterien, also bei 2,4 V je Zelle, ein Uhrwerk ein, welches nach einer bestimmten Zeit (Bild 245) den Gleichrichter mittelbar oder unmittelbar von der Batterie trennt.

2. Das Laden einer großen Anzahl Batterien in Fuhrparkanlagen. Um gleichzeitig eine größere Anzahl Batterien laden zu können, läßt sich die Sammelladung mit größeren oder Einzelladung mit mehreren kleineren Gleichrichtern verwenden. So bestehen in Ladestationen Umformeranlagen, in denen ein Gleichrichter oder rotierender Umformer sechs und mehr Batterien

¹⁾ Nach dem Erfinder Pöhler-Schalter genannt, Bild 244.

zu gleicher Zeit auflädt. Vor jede Batterie ist ein Regulierwiderstand geschaltet, um den Ladestrom einzelner Batterien einstellen zu können. Man war daher bestrebt, für Elektromobilladestationen einen Ladegleichrichter mit hohem Wirkungsgrad für Einzelladung herzustellen, der weder einen Widerstand hat noch eine Reguliertätigkeit erfordert. An das im Bild 243 ¹⁾ erkenntliche Drehstromniederspannungsnetz lassen sich beliebig viel Gleichrichter gleicher Ausführung anschließen. Die Drehstromniederspannung wird so gewählt, daß für die Gleichrichter keine besonderen Zwischentransformatoren erforderlich sind. Bei Batterien mit ungleichen Zellenzahlen, z. B. 40 und 80 Zellen, wird ein Teil der Gleichrichter mit Sparzwischenstransformatoren ausgerüstet, um die passende Gleichspannung zu erhalten. Es sind auch Gleichrichter hergestellt worden, die eine Umschalt-

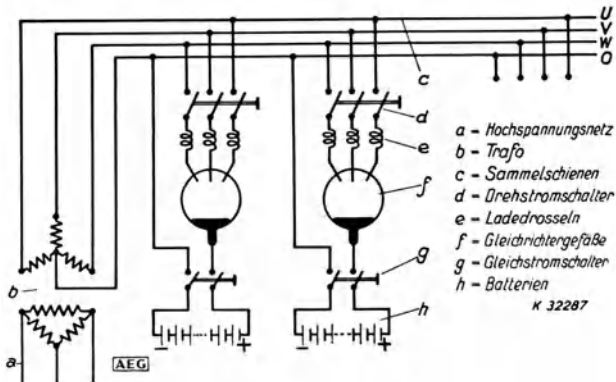


Bild 243. Die Einzelladung mehrerer Batterien mit Glasgleichrichtern. (An das Netz $U V W O$ lassen sich beliebig viel Gleichrichter anschließen)

einrichtung und Sparzwischenstransformatoren mit Anzapfungen für zwei Ladebereiche erhalten. Ferner werden Haupttransformatoren auf der Sekundärseite mit zwei verschiedenen Wicklungen ausgeführt, um an das Niederspannungsnetz Gleichrichter verschiedener Batteriespannung ohne Zwischenstransformatoren anschließen zu können. Transformatoren mit einer Sechspannenschaltung gestatten das Anschließen zweier um 60° phasenverschobener Gruppen, wodurch der Leistungsfaktor verbessert wird.

3. Die verkürzte Ladezeit durch umschaltbare Ladestromspulen. In dieser Anordnung besteht die Drosselspule $g - h$ nach Bild 244 ²⁾ aus zwei getrennten Eisenkernen mit je einem Satz Wicklungen. Im ersten Teil der Ladung fließt der Wechselstrom nur durch Spule g , der Ladestrom kann hierbei nach Bild 245 so groß wie irgend möglich zulässig eingestellt werden, um bis zum Einsetzen der Gasungsgrenze möglichst viel Amperestunden in die Batterie zu laden. Beim Einsetzen der Gasungsgrenze spricht die

¹⁾ G. W. Müller, Berg- u. Hütten-Ztg. Glückauf 1935, Nr. 21.

²⁾ G. W. Müller, AEG.-Mitt. 1929, H. 5.

Spannungsspule des Ladeschalters an und schaltet das Uhrwerk ein, gleichzeitig aber auch den Schalter *f* aus, so daß jetzt der Strom durch Spule *g* und *h* fließt. Es entsteht hierdurch ein plötzlich starkes Absinken des Ladestromes und die Batterie wird im letzten Teil mit kleinerem Strom

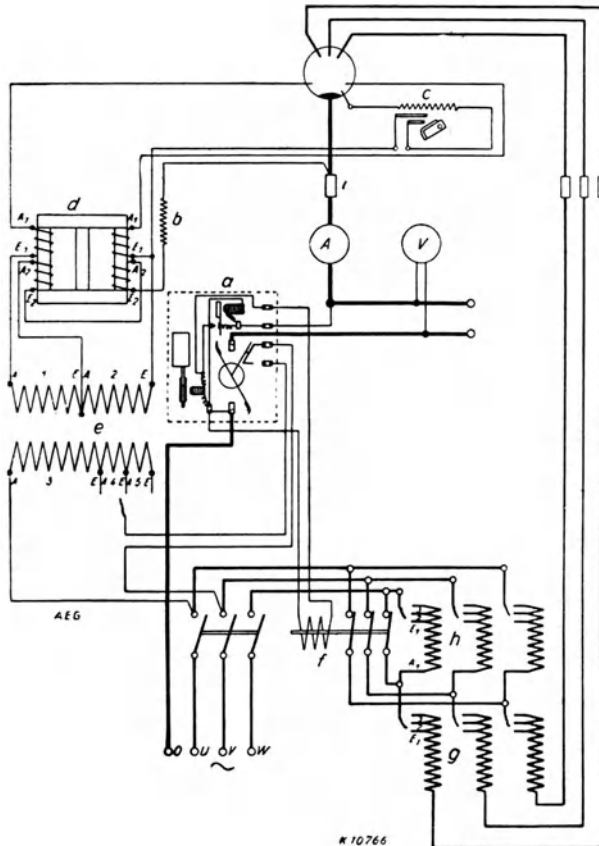


Bild 244. Schaltung eines Gleichrichters mit umschaltbaren Ladedrosseln
a = Ladeschalter, *f* = Unterspannungsausschalter,
b = Vorwiderstand, *g* = Primärdrossel,
c = Hilfsanodenwiderstand, *h* = Zusatzdrossel,
d = Erregerdrosselspule, *i* = Sicherung.
e = Erregertransformator,

vollgeladen. Beim Vergleich der Kurven 242 und 245 ist erkenntlich, daß der Anfangsladestrom ohne umschaltbare Ladedrosselspule kleiner sein muß, wenn der Ladestrom nach der Gasungsgrenze den vorgeschriebenen Wert nicht überschreiten soll, daher gestattet die umschaltbare Drosselspule eine Verkürzung der Ladezeit.

4. Das Laden großer Batterien. Eine weitere Verbesserung der Ladecharakteristik zeigt Bild 246 für eine einzelne Batteriezelle. Die Strom-

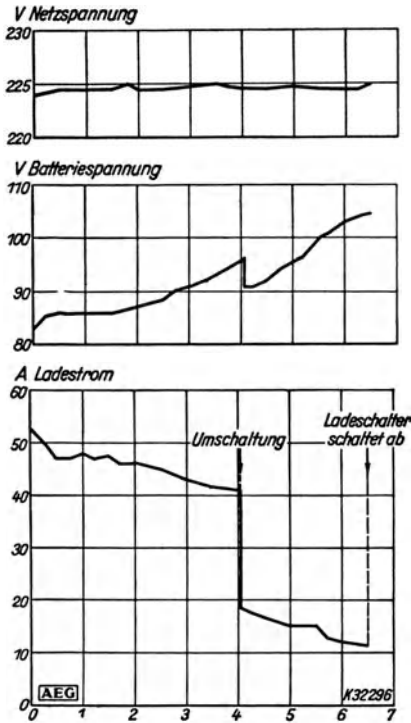


Bild 245. Eine im Betriebe gemessene Ladekurve analog der Schaltung Bild 244

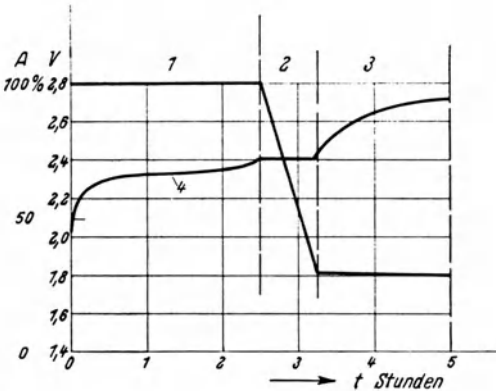


Bild 246. Die beste erreichbare Ladekurve an einer Zelle gemessen (vgl. Bild 113). 1 = konstanter Ladestrom, 2 = konstante Ladepannung und abfallender Strom, 3 = konst. verminderter Ladestrom, 4 = Ladepannung

und Spannungskurven sind Idealwerte, um die Batterie in jedem Ladezustand mit dem höchstzulässigen Strom laden zu können. Hierdurch entsteht die kürzeste erreichbare Ladezeit. Es ist eine Schaltung (Bild 113) ausgearbeitet worden, nach der dieser Ladevorgang selbsttätig ausgeführt werden kann¹⁾. Im ersten Teil hält ein Stromregulierrelais einen konstanten Ladestrom von 100%. Im zweiten Teil wird die Regulierung durch den Ladeschalter auf das Spannungsrelais geschaltet und konstante Spannung gehalten und im letzten Teil wird bei steigender Spannung durch ein Höchstspannungsrelais das Stromregulierrelais für den Nachladestrom eingeschaltet. Nach erfolgter Aufladung schaltet der Ladeschalter den Gleichrichter aus. Es sind auch Ladeanlagen ähnlicher Schaltweise mit gittergeregelten Gleichrichtern erstellt worden.

5. Die Ladegleichrichter zum Laden von Netzbatterien. In Gleichstromnetzanlagen sind häufig Batterien vorhanden. Daher werden für kleinere und mittlere Elektrizitätswerke Gleichrichter hergestellt, die das Netz speisen und auch die Batterie laden können. Für diesen Zweck werden die Regellgrenzen der Reguliereinrichtungen am Gleichrichter so groß gewählt, daß im unteren Regulierbereich das Netz gespeist und in den oberen Regel-

¹⁾ K. Landsmann, BBC.-Nachr. 1930, H. 5. (Die Schaltung wurde insbesondere für Triebwagenladung der D. R. B. angewendet.)

stellungen die Batterie geladen wird. Sobald die Batterie einen Doppelschalter hat, kann während der Ladung gleichzeitig das Netz gespeist und im sogenannten Pufferbetrieb gearbeitet werden.

c) Gleichrichter für Pufferbetrieb

Abgesehen von den Pufferschaltungen, die in Elektrizitätswerken mit Gleichrichtern oft angewendet werden, sind zahlreiche kleinere Gleichrichter in Betrieb, mit denen Batterien für verschiedene Anwendungsgebiete in Pufferschaltung geladen werden. Hierzu gehören Telephonbatterien, Signal- und Betätigungsbatterien. Für den Fernsprechtbetrieb¹⁾ sind Gleichrichter

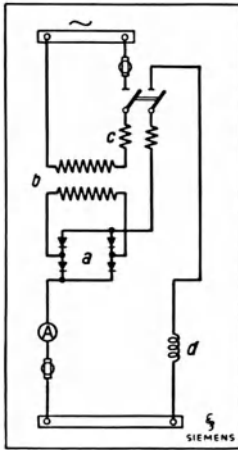


Bild 247a. Regelladung mit Biegedrossel
 a = Kupferoxydulzellen, b = Umspanner,
 c = vormagnetisierte Drossel (Biegedrossel), d = Glättungsdrossel

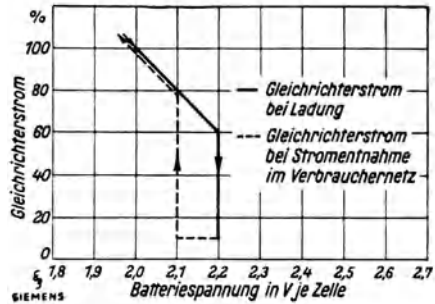


Bild 247b. Dauerladegleichrichter für Regelladung, Spannungs- und Stromverlauf

mit starken Glättungsdrosselspulen entwickelt worden, um die Sprachverständigung während der Ladung nicht zu stören. Besonders vorteilhaft sind die Gleichrichter mit Biege- und Kippdrosselspule (Bild 247). Von zwei auf einem Eisenkern sitzenden Spulen c wird eine vom Wechselstrom und die zweite vom Gleichstrom durchflossen. Hierdurch entsteht bei einem bestimmten Strom eine Sättigung des Eisenkerns und die Ladespannung steigt nicht weiter an, als in den Kurven angegeben ist. Mit wechselnder Ladung und Entladung entsteht eine Batteriespannung zwischen 2,1 bis 2,2 V je Zelle und der Gleichrichter speist nur den Strom in die Batterie, der zur Aufrechterhaltung dieser Spannungsgrenzen erforderlich ist. Die Kippdrossel arbeitet ohne Gleichstromüberlagerung mit einem parallel zur Spule c geschalteten Kondensator und läßt die gleiche Ladecharakteristik entstehen.

¹⁾ C. Loog, Siemens-Sonderdruck 4182/8; Telegraphie u. Fernsprechtechnik 1930, H. 2. O. Werner, ETZ. 1940, H. 2; H. Böhm, ebenda 1933, S. 1037; H. Hoffmann, Zeitschr. d. VDI. 1940, H. 4.

d) Gleichrichter für Projektionslampen

Seit dem Bestehen der Gleichrichter werden sie als Umformer für Projektionszwecke verwendet. Um ein ruhiges Brennen der Bogenlampe im Projektionsapparat zu erreichen, soll die Gleichspannung im unbelasteten Zustande nicht kleiner als 70 V sein. Bei brennender Bogenlampe beträgt die Spannung an den Kohlen 50 bis 55 V, neuerdings nur noch 30 bis 35 V¹⁾. Die Differenz beider Spannungen wird von Vorschaltwiderständen oder Drosselspulen aufgenommen. Man verwendet je nach Größe der Lampe Gleichrichter von 10 bis 200 A in Ausführung als Trocken-, Glühkathoden- oder Hg-Dampfgleichrichter. Seit einigen Jahren werden die Stromstärken der Gleichrichter so bemessen, daß sie während der Zeit des Filmwechsels zwei Projektionsapparate speisen können, um einen längeren Film, der aus mehreren Rollen besteht, pausenlos vorführen zu können. Daher wird die Stromstärke eines Gleichrichters mit zwei Zahlen ausgedrückt, z. B. 25/50 A, d. h. der Dauerstrom beträgt 25 A und bis 50 A kann der Gleichrichter 5 bis 6 Minuten lang überlastet werden. Die Glättung des Gleichstromes erfolgt mit Hilfe von Drosselspulen auf ein Maß, daß die verbleibenden Pulsationen Flimmererscheinungen auf der Filmleinwand ausschließen. Die Glättung braucht nicht so weit durchgeführt zu werden, wie bei einer Störung von Rundfunk und Fernsprechanlagen. Die Verluste können durch die Vorschaltung von festen oder regelbaren Drosselspulen verringert werden. Mit Hilfe der Drosselspulen ist die gleiche Strombegrenzung wie mit Vorschaltwiderständen möglich, doch eignen sich diese Gleichrichter nicht zum Speisen zweier Projektionslampen beim Filmwechsel. Um diesen gut durchführen zu können, muß der Gleichrichter eine praktisch konstante Gleichspannung liefern. Jeder Lampe wird dann ein fester oder regelbarer Widerstand vorgeschaltet. Gleichrichter mit primären Drosselspulen für nur einen Lampenstromkreis eignen sich für Bühnenscheinwerfer und Scheinwerfer allgemeiner Verwendung. Die Gleichrichter werden eins-, drei- oder sechsphasig geschaltet und entsprechen im übrigen der allgemeinen Bauweise.

e) Stromrichteranlagen für Licht-, Kraft-, Bahnnetze und elektrolytische Anlagen

Die Glasstromrichter bestehen vorwiegend aus schalttafelähnlichen Geräten, in denen die Gefäße mit ihrem direkten Zubehör, sowie die zu einer fertigen Anlage erforderlichen Bauteile untergebracht sind. Für Eisenstromrichter wird bei kleineren Leistungen die gleiche Bauweise gewählt und bei größeren Leistungen kommt in der Nähe der Eisen-

¹⁾ P. Drobka, AEG.-Mitt. 1938, H. 9, S. 468.

gefäße eine besondere Schalttafel zur Aufstellung. Die Bestandteile einer Gleichrichteranlage sind:

1. Schaltanlage für den Anschluß des Leistungsumspanners an das Drehstromnetz (Hoch- oder Niederspannung),
2. Leistungsumspanner,
3. Gleichrichter mit oder ohne Regelung und Gleichrichterschalttafel,
4. Gleichstromverteilungsanlage,
5. Leitungsverbindungen.

Für Gleichstromnetze in Licht- und Kraftanlagen mit einem Mittelleiter müssen häufig Spannungsteileraggregate erstellt werden. Die Erstellung von Gleichrichteranlagen hat nach den Richtlinien des VDE. zu erfolgen. Es ist nicht möglich, allgemein gültige Vorschriften für die Anordnung der einzelnen Bauteile und Schaltungen zu geben, besonders dann nicht, wenn die Gleichrichter in vorhandenen Räumen Platz finden sollen, die in ihren Abmessungen voneinander abweichen. Für die Errichtung neuer Unterwerke oder Gleichrichteranlagen lassen sich jedoch gewisse Grundformen verwenden.

f) Die Kühlluftführung in den Gleichrichterräumen

Glasgleichrichter und luftgekühlte, pumpenlose Eisengleichrichter haben freie ungeführte oder geführte Kühlluftwege. Am häufigsten wird für Glasgleichrichter die einfachste Kühlung mit einem unter dem Gefäß angeordnete Ventilator angewendet. Die oben ausströmende, erwärmte Kühlluft darf hierbei durch Abdeckungen oder zu niedrige Deckenabstände nicht gestaut werden. Die mit starkem Luftüberdruck gekühlten Eisengefäße können in Deckennähe stehen. In abgeschlossenen Räumen wird die Raumluft durch die Kühlventilatoren umgewälzt. Hierbei gibt die Luft ihre Wärme an die Wände oder andere Bauteile im Raum ab.

Eine genaue Berechnung der Entlüftung ist in der Hütte¹⁾ enthalten. Die in einem Stromrichterraum beim Umformerprozeß erzeugte Höchstwärmemenge ist in einiger Annäherung in KW_0

$$KW_0 = U_0 \cdot J_2 \cdot x_1 \dots \dots \dots (43)$$

x_1 = Ein Zuschlag für den Wärmeverlust in Drosselspulen, Leitungen und Hilfseinrichtungen ohne den Hauptumspanner, der im allgemeinen in einem besonderem Raum steht. U_0 ist die Lichtbogenspannung.

Für x_1 gilt als Annäherungswert 1,1.

Die Entlüftung von Umspannerräumen kann als bekannt vorausgesetzt werden.

¹⁾ Hütte, Taschenbuch der Ingenieure, Bd. II.

Die schalttafelähnlichen Aufbauten der luftgekühlten Stromrichter verleiten oft dazu, sie wie Schaltanlagen in engen Räumen unterzubringen, daher sei nochmals auf die Notwendigkeit einer guten Kühlung hingewiesen, um spätere Umbauarbeiten zu vermeiden.

g) Die Wasserkühlung der Stromrichter (Eisengleichrichter)

Der Wasserverbrauch beeinflußt je nach dem Wasserpreis die Wirtschaftlichkeit einer Anlage, daher ist von jeher versucht worden, den Aufwand an Kühlwasser zu beschränken. In der Praxis sind folgende Kühlanordnungen ausgeführt worden.

1. *Die Frischwasserdurchlaufkühlung.* Die Kühlwassermenge ist auf Seite 96 angegeben. Das Kühlwasser muß so beschaffen sein, daß es die aus Eisen bestehenden Bauteile nicht angreift und daß keine nennenswerte Schlamm- bildung entsteht. Für die Beschaffenheit des mit dem Gleichrichtergefäß in Berührung kommenden Kühlwassers wird angegeben¹⁾, daß nur sauberes Kühlwasser verwendet werden soll, mit weniger als 10 deutschen Härtegraden und mit geringem Eisengehalt. Wenn das Wasser sonst einwandfrei ist, kann man ausnahmsweise noch eine Härte von 15 deutschen Graden zulassen. Es wird aber darauf hingewiesen, daß dann mit der Wahrscheinlichkeit einer größeren Kesselsteinablagerung zu rechnen ist, daher muß eine öftere Reinigung vorgenommen werden. Diese erfolgt durch Ausspülen aller Kühlräume mit einer Salzsäurelösung, Verdünnung 1 : 20, der Kesselstein ist hierauf leicht zu entfernen. Nach der Entfernung müssen in den Kühlräumen verbliebene Spuren der Salzsäure durch Ausspülung mit einer leichten Sodalösung entfernt werden. Tritt trotz der Beachtung obiger Regeln eine zu große Kesselsteinausscheidung ein, muß eine Rückkühlanlage für das Gleichrichterwasser vorgesehen und sauberes Umlaufkühlwasser für den Gleichrichter beschafft werden. Es hat sich gezeigt, daß Wasser von großer Härte und von gleichzeitig großem Eisengehalt besonders störend wirkt, da sich eine größere Menge Eisenschlamm bildet, der mit dem Kesselstein eine harte Verbindung eingeht, die schwer lösbar ist.

2. *Allgemeine Erklärung der Härtegrade.* Ein deutscher Härtegrad ist gleich 10 mg Ca · O (Calciumoxyd) in 1 Liter Wasser. Der Magnesiumgehalt des Wassers ist in dieser Angabe einbegriffen, und zwar ist er auf den entsprechenden Kalkgehalt umgerechnet. Ein Teil Magnesia entspricht 1,4 Teilen Ca · O. Im Ausland wird oft nach französischen oder englischen Härtegraden gerechnet, es entspricht 1 Härtegrad in Deutschland, 1,25 in England und 1,78 in Frankreich. Da die Härte des Wassers leichten Schwankungen unterworfen ist, geben die Wasserwerke bei Auskünften

¹⁾ Die folgenden Angaben wurden von den SSW. zur Verfügung gestellt.

nicht genaue Härtegrade, sondern Bezeichnungen wie „weich“ und „hart“ an. Hierbei ist festgesetzt worden:

0— 4	deutsche Härtegrade	=	sehr weich,
4— 8	„	„	= weich,
8—12	„	„	= mittelhart,
12—18	„	„	= ziemlich hart,
18—30	„	„	= hart,
30 und mehr	„	„	= sehr hart.

Es gibt in den Wasserwerken bekannte (vergleiche auch Hütte und andere technische Taschenbücher) chemische Substanzen, beispielsweise Permutit, um das Wasser weicher zu machen.

3. *Die Temperaturregler.* In den Wasserablauf werden häufig Temperaturregler gesetzt, um den Wasserzulauf bei schwankender Belastung und Temperatur zu regeln. Eine Überkühlung hat beispielsweise zur Folge, daß übermäßig viel Hg an den kalten Eisenteilen und auch in der Nähe der Anoden haften bleibt, was zu Rückzündungen führen kann, wenn die Belastung plötzlich stark ansteigt. Ferner erhöht sich der Lichtbogenverlust in den Gefäßen bei zu niedriger Kühlwassertemperatur. Im allgemeinen wird für das Ablaufwasser eine Austrittstemperatur von $40 \div 50^\circ \text{C}$ angenommen. Eine Regulierung des getrennt geführten Kathoden- und Hg-Dampfpumpenkühlwassers wird im Schrifttum nicht erörtert.

4. *Die mittelbare Umlaufkühlung mit Gegenstromrückkühlern.* Es wird angegeben¹⁾, daß die unmittelbare Frischwasserkühlung wegen der geringeren Anschaffungskosten am billigsten ist, wenn die Kosten für geeignetes Wasser etwa $0,20 \text{ RM je m}^3$ nicht übersteigen. Wenn nur Rohwasser von schlechter Beschaffenheit, wie Fluß-, Meer- oder Brunnenwasser vorhanden ist, das schlammhaltig, hart oder säurehaltig ist, muß als Umlaufwasser für die Stromrichtergefäßkühlung geeignetes und reines Wasser beschafft werden. Dieses wird mit Hilfe einer Umwälzpumpe *P* im Bild 248 von den Wasserwegen des Gefäßes angesaugt und in einen Kühler *K* getrieben. In diesem erfolgt nach dem Gegenstromprinzip die Abkühlung durch Rohwasser und das gekühlte Umlaufwasser fließt wieder nach dem Stromrichtergefäß.

Im allgemeinen wird nur ein Rückkühler aufgestellt und während dessen Reinigung unmittelbares Frischwasser verwendet. Zu diesem Zweck werden im Bild 248 erkenntliche Umschaltventile vorgesehen. In wichtigen Betrieben werden auch Reservekühler angeordnet. Um eine Ausdehnung des Wassers in dem geschlossenen Kreislauf zu ermöglichen, ist das Anbringen eines Ausdehnungsgefäßes *E* notwendig. Dies erhält einen Schwimmer, der ein Ventil in der Zusatzwasserleitung steuert, damit stets die gleiche Wasser-

¹⁾ *W. Nowag, BBC.-Nachr. 1930, H. 1.*

menge kreist. Das Rohwasser kann beliebiger Herkunft sein, denn die Rückkühler lassen sich leicht entschlammen. Bei Mangel an Rohwasser werden Kühltürme verwendet, um das erwärmte Rohwasser zu kühlen. Oft werden für mittlere Stromrichteranlagen bei Wassermangel auch bekannte Luft-rückkühler verwendet. Die Kühlluft wird hierbei durch ein vom erwärmten Wasser durchflossenes Rohrsystem getrieben. Auch in dieser Anordnung sind Umschaltventile vorgesehen, um für die Zeit der Reinigung des Rück-

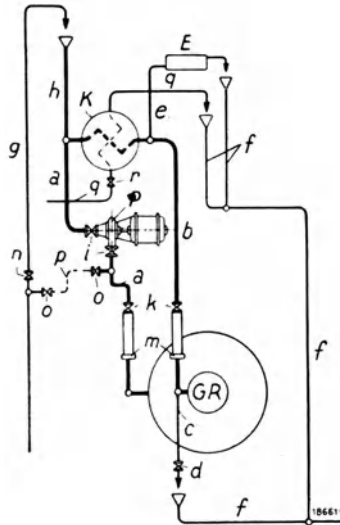


Bild 248. Schema der mittelbaren Frischwasserkühlung (BBC.)

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <i>E</i> - Ausdehnungsgefäß, | <i>g</i> - Frischwasserzuleitung, |
| <i>GR</i> - Gleichrichter, | <i>h</i> - Füllleitung, |
| <i>K</i> - Kühler, | <i>i</i> - Absperrventil zur Pumpe, |
| <i>P</i> - Motorpumpe, | <i>k</i> - Absperrventil zum |
| <i>a</i> - Zulaufleitung, | Gleichrichter, |
| <i>b</i> - Rücklaufleitung, | <i>m</i> - Lösbare Verbindung, |
| <i>c</i> - Entlüftungs- und Ablauf- | <i>n</i> - Frischwasserventil, |
| leitung, | <i>o</i> - Frischwasserventil für |
| <i>d</i> - Ventil für Entlüftung und | mittelbare Kühlung, |
| Kühlwasserablauf, | <i>p</i> - Gummischläuche, |
| <i>e</i> - Verbindungsleitung zum | <i>q</i> - Frischwasserleitung durch |
| Ausdehnungsgefäß, | den Kühler, |
| <i>f</i> - Ablaufleitung, | <i>r</i> - Absperrventil zum Kühler. |

kühlers das Gefäß unmittelbar mit Frischwasser kühlen zu können. Die zahlreichen Gleichrichteranlagen der Berliner Stadt-, Ring- und Vorortbahnen sind teilweise mit Luftrückkühlern ausgerüstet worden¹⁾.

5. Gemischte Frischwasser- und Umlaufkühlung. Für diese Ausführung bestehen zwei Richtlinien:

a) Das Kathoden- und Hg-Dampfpumpenkühlwasser wird einer Wasserleitung mit geeignetem Wasser entnommen und das Gefäßumlaufwasser

¹⁾ *W. Wechmann*, ETZ. 1928, S. 887; *W. Nowag*, BBC.-Nachr. 1930, Nr. 1, S. 12 u. 1933, Nr. 4 (vgl. auch *K. Baudisch* u. *A. Siemens*, S. 97 des Buches).

in einem Rückkühler gekühlt, wobei zu berücksichtigen ist, daß für das Gefäß 2- bis 3mal soviel Kühlwasser aufzuwenden ist, als für die Kathode und Hg-Pumpe.

- b) Falls kein geeignetes Frischwasser zur Verfügung steht, werden für die genannten Wasserwege zwei getrennte Rückkühler verwendet.

Beide Rückkühler sind zweckmäßig gleich groß und können bei Überholungsarbeiten zeitweise für beide Kühlwege benutzt werden.

h) Die Hoch- und Niederspannungsschaltanlagen für Glas- und Eisenstromrichter

Für die Errichtung von Hochspannungsschaltanlagen bestehen keine Unterschiede gegenüber den Einrichtungen anderer Stromverbraucher. Häufig erfolgt dessen Ausbau auch im Zusammenhang mit normalen Umspannern und Verteilungsanlagen. Die Hochspannungsschalter (Ölschalter, ölarme oder öllöse Schalter) sind nach den Energieverhältnissen der Drehstromnetze zu bemessen¹⁾. Dagegen müssen die in der Gleichrichteranlage unmittelbar installierten Überstromselbstschalter und Sicherungen den Gleichstromleistungen angepaßt sein. Die Gleichstromselbstschalter sollen bei Gleichstromkurzschlüssen früher ausschalten, ehe die den Glaskörpern vorgeschalteten Sicherungen durchschlagen und der Primärschalter auslöst. Auch sollen die Streckenspeiseselbstschalter früher auslösen, als der den Stromrichtergeräten zugeordnete Selbstschalter. In einfachen Anlagen, bis zu einigen hundert Ampere, sind oft auf der Gleichstromseite nur Hebel-schalter mit Sicherungen verwendet worden.

i) Die Gleichstromselbstschalter

Je nach den Betriebsverhältnissen werden einfache Überstromselbstschalter verwendet, die mit Ein- und Ausschaltspulen, auch Unterspannungsspulen, hergestellt werden. Sie sind für Glas- und kleinere Eisengleichrichter verwendet worden und haben eine verhältnismäßig träge wirkende Klinke mit Schloß, um den Schalter in der Einschaltstellung festzuhalten. Bild 249 zeigt die oszillographische Aufnahme²⁾ eines Ein- und Ausschaltvorganges eines Gleichstromschalters, der auf einen satten Sammelschienenkurzschluß zweier Eisengleichrichter je 1500 A geschaltet wurde. Man erkennt, daß der Strom auf 26400 A ansteigt und erst nach 0,033 sec anfängt merklich zu fallen. Nach 0,052 sec ist der Lichtbogen erloschen.

k) Die Schnellschalter und Rückstromschnellschalter

Bei sämtlichen Schnellschalterkonstruktionen wird das Prinzip verfolgt, die Trägheit der Halteklinken zu verringern, um den Strom bereits vor dem

¹⁾ *G. Hameister* gibt in der ETZ. 1938, H. 23 u. 24 Schaltzeiten für Hochspannungsschalter an. Siehe auch S. 84 dieses Buches.

²⁾ *E. Reinhardt*, AEG.-Mitt. 1936, H. 10; ETZ. 1934, H. 46; *J. A. Meier*, VDI-Zeitschr. 1928, Bd. 72.

Entstehen des Stromhöchstwertes zu unterbrechen. Das Oszillogramm (Bild 250) zeigt den Verlauf des Kurzschlußstromes bei einem Schnellschalter. Der Strom erreicht unter den gleichen Bedingungen wie in Bild 249 nur den Wert von 22000 A trotz des größeren Nennstromes und ist nach insgesamt 0,013 sec völlig unterbrochen. Die mechanische Eigenzeit ist nicht mehr 0,033 sec, sondern nur noch 0,0041 sec.

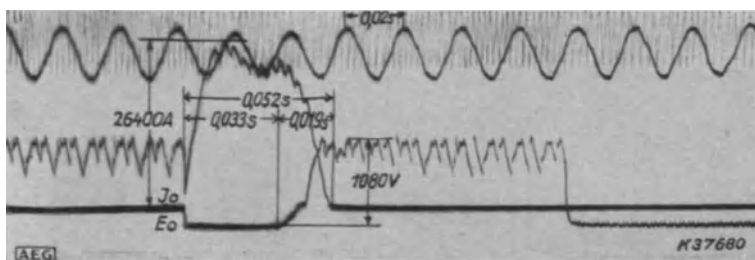


Bild 249. Zu- und Abschaltung eines satten Kurzschlusses (zwei Gleichrichter zu je 1500 A) mit normalem Selbstschalter 2000 A

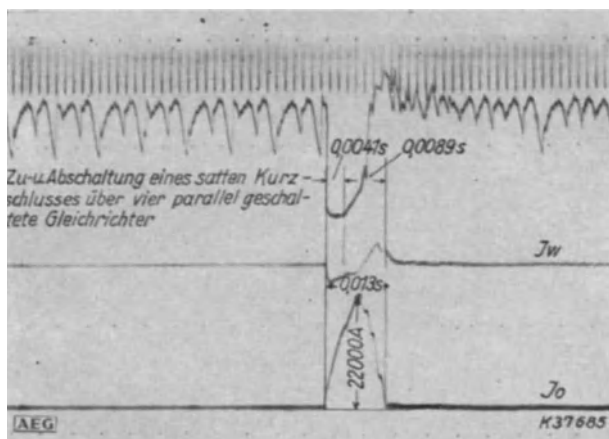


Bild 250. Zu- und Abschaltung eines satten Kurzschlusses (vier Gleichrichter zu je 1500 A) mit Gearapidschnellschalter für 3000 A

Zum Schutze der Glas- oder Eisengefäße werden in stark beanspruchten Anlagen auch Schnellschalter verwendet, die mit einer Rückstromauslösung versehen sind, um den bei einer Rückzündung vom Gleichstromnetz oder von einem zweiten parallel geschalteten Gleichrichter ankommenden Rückstrom zu sperren¹⁾. Da die Anodensicherungen in beiden Richtungen gleich schnell abschalten und das Gefäß hierdurch sicher geschützt ist, werden nur größere Glasgleichrichteranlagen mit Rückstromschaltern ausgerüstet.

¹⁾ H. Kother, El. Bahnen, Sept. 1939, S. 218.

Häufig dagegen Eisengleichrichteranlagen, die aus mehreren parallel geschalteten Gleichrichtern bestehen. Im Bild 64 ist der Stromverlauf im Normalbetrieb durch die schwarzen Pfeile angedeutet, durch die weißen Pfeile jedoch, wenn im linken Gefäß A_1 eine Rückzündung entstanden ist¹⁾. Der ungestörte Gleichrichter A_2 speist demnach in den gestörten Gleichrichter. In dieser Anordnung sollen die Schalter nur den Rückstrom schnell trennen, dies geschieht mit Hilfe von polarisierten Haltespulen. Hierdurch wird die Auslösezeit beim Rückstrom geringer als bei Vorwärtsstrom. Die fremderregte und polarisierte Zusatzspule ist so geschaltet, daß ihr Feld sich zu dem der Stromwicklung des Haltemagneten bei Rückströmen addiert. Es genügt somit ein zusätzlicher Überstrom, um den Schalter zum Auslösen zu zwingen.

1. *Die Kurzschlußabschaltung durch Steuergitter.* Wenn ein Stromrichter mit Gitterregulierung versehen ist, läßt sich mit Hilfe eines sogenannten Schnellrelais ein äußerst schnelles Sperren der Anodenströme erreichen. Dies geschieht nach einer Ausführung wie Bild 251 in der Weise, daß sämtliche Gitter durch Wegnahme der positiven Gitterspannung mit Hilfe des Relais 8 an ein negatives Potential geschaltet werden²⁾. Hierdurch wird eine Neuzündung der Anodenströme verhindert, und der Hauptstromkreis ist gesperrt. Bild 252 zeigt in einem Oszillogramm eine Abschaltzeit von 0,0165 sec. Die Hersteller verwenden die Gitterabschaltung häufig für mehrere parallel arbeitende Gleichrichter, die gemeinsam einen Großverbraucher speisen, um einen gestörten Gleichrichter außer Betrieb zu setzen, aber auch in Anlagen, in denen sämtliche Gleichstromverbraucher bei Kurzschlüssen im Gleichstromkreis und bei Rückzündungen abgeschaltet werden können. Hierzu gehören elektrolytische Betriebe, Sendeanlagen und Anlagen beliebiger Art, die nur einen Stromkreis speisen. Für Anlagen mit mehreren Streckenspeisern besteht der Nachteil, daß die Schnellrelais beim Kurzschluß einer Speisestrecke die gesamte Stromlieferung unterbrechen. Solche Anlagen werden offenbar zweckmäßiger durch selektiv ansprechende Überstromschalter geschützt.

2. *Das Schnellrelais für kurzzeitige Unterbrechung.* Diese Anordnung hat große Bedeutung für Stromverbraucher, die nur kurzzeitig auftretende Überströme erzeugen, beispielsweise Sendeanlagen. Zwischen den Senderröhrenelektroden kann ein Kurzschluß entstehen, wodurch sie zusammenschweißen würden, wenn die Anodenspannung der Röhre, also die vom Gleichrichter gelieferte Gleichspannung, nicht sofort getrennt wird oder auf einen ungefährlichen Wert zusammenbricht. In kleineren Sendeanlagen wird zu diesem Zwecke ein Widerstand in den Gleichstromkreis ge-

¹⁾ *Schuhmacher*, ETZ. 1926, H. 21.

²⁾ BBC.-Nachr. 1932, H. 1.

schaltet, der den Kurzschlußstrom begrenzt; in größeren Anlagen verhindert das Schnellrelais¹⁾ das Aneinanderschweißen durch Stromsperrung mit

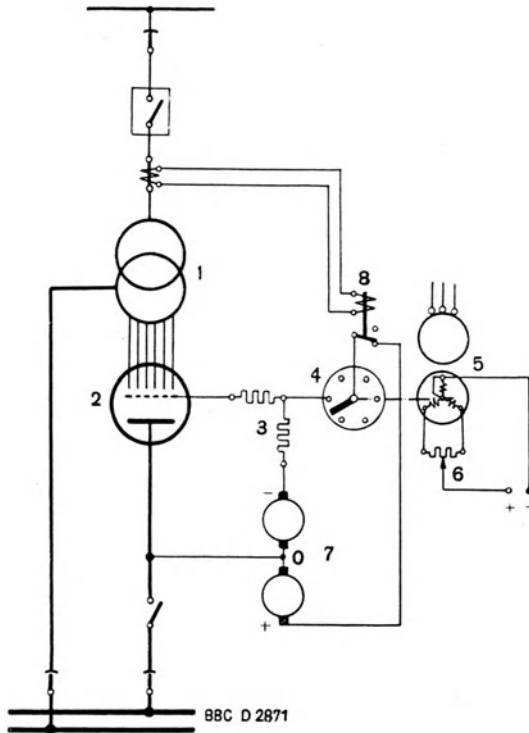


Bild 251. Gittergesteuerte Gleichrichter mit Kurzschlußschutz und Spannungsregelung durch Synchronzündverteiler
 1 – Transformator, 2 – Gleichrichter, 3 – Gitterwiderstände, 4 – Zündverteiler, 5 = Synchronmotor, 6 = Regelwiderstand, 7 – Gitterstromquelle, 8 – Überstromrelais

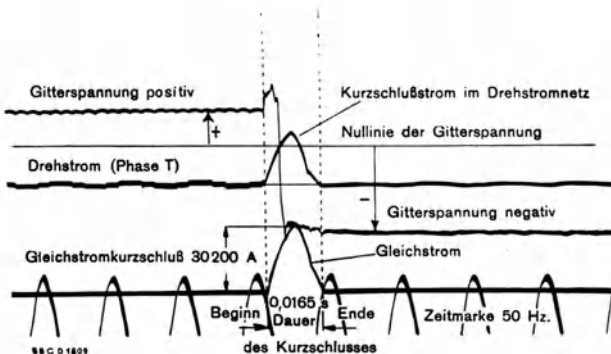


Bild 252. Oszillogramm der Abschaltung eines Kurzschlusses durch Gittersteuerung

¹⁾ W. Hahn, BBC.-Nachr. 1932, H. 5; Siemens-Zeitschr. 1938, H. 6, S. 293; H. Kother, El. Bahnen, Sept. 1939, S. 219.

Hilfe der Steuergitter in der beschriebenen Weise. Wie Bild 253 erkennen läßt, erfolgt nach der Stromsperrung, also nach 0,0012 sec, die Absenkung der Gleichspannung im Verlauf von 0,5 sec; sie steigt sodann selbsttätig in 1 sec wieder auf den vollen Wert an. Erfahrungsgemäß ist die Störung in dieser Zeit beseitigt¹⁾. — Analoge Einrichtungen wurden auch für andere Betriebe angewendet.

1) Die Spannungsteilung in Gleichstromdreileiteranlagen beim Gleichrichterbetrieb

Im Gegensatz zu rotierenden Maschinenumformern kann der Mittelleiter von Dreileiteranlagen nicht im Gleichrichter gebildet werden. Dies ist nur durch die Reihenschaltung zweier Gleichrichter oder durch getrennt vom

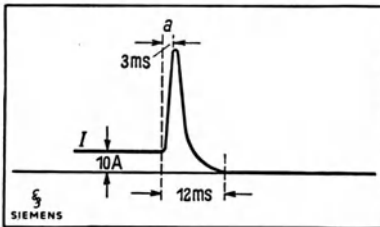


Bild 253a. Stromverlauf bei Kurzschlußlöschung
a = Eigenzeit des Schnellrelais

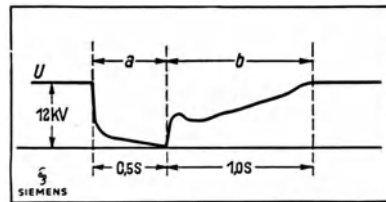


Bild 253b. Spannungsverlauf bei Kurzschlußlöschung und Wiederhochreglung. a = Entladung des Glättungskondensators, b = selbsttätige Wiederhochreglung durch reinen elektrischen Vorgang

Gleichrichter stehende rotierende Spannungsteileraggregate möglich. Ebenso sind vorhandene Batterien geeignet. Obwohl die Spannungsteilung zweier in Reihe geschalteter Gleichrichter höhere Stromverluste im Gefolge hat, ist sie doch verschiedentlich ausgeführt worden. Der Gesamtwirkungsgrad entspricht nicht dem höheren Wert der Außenleiterspannung, sondern dem Wirkungsgrad eines die Netzhälfte speisenden Gleichrichters. Wegen dieses Nachteiles sind mit wenigen Ausnahmen die Spannungsteilermaschinen bevorzugt worden.

1. Die Wirkungsgradbeeinflussung durch Spannungsteiler. Um an Verlusten zu sparen, wurde von jeher angestrebt, den Nulleiterstrom so klein wie möglich zu halten. Bei einem Durchschnittswert von 15 % Mittelleiterstrom, ein häufig vorhandener Wert in Elektrizitätswerken, erhält jede Ausgleichmaschine eine Größe von 7,5 % der Gesamtleistung des Gleichstromnetzes. Im Jahresmittel wird hierbei in Elektrizitätswerken erfahrungsgemäß bei 15 % Mittelleiterstrom mit einer Verringerung des Wirkungsgrades von 0,5—1 % gerechnet. Zwei in Reihe geschaltete Gleichrichter ohne Außenleitergleichrichter haben einen um etwa 4 % niedrigeren Wir-

¹⁾ Von BBC wird die Spannungsregelung nach DRT 537 901 mit einer Spannungsabsenkung auf etwa 30 % durchgeführt (Fußnote S. 256 u. Bild 173 des Buches)

kungsgrad in zweimal 230-V-Netzen und 8 % in zweimal 115-V-Netzen gegenüber den Wirkungsgraden im Zweileiternetz ohne Spannungsteilung. Diese Verschlechterung entsteht durch den doppelten Lichtbogenverlust der zwei in Reihe geschalteten Gleichrichter. Die Verwendung zweier Gleichrichter als Spannungsteiler in Verbindung mit größeren Außenleitergleichrichtern ist wohl ausgeführt worden, doch bereitet zudem die Last-

verteilung in dieser Anordnung gewisse Schwierigkeiten.

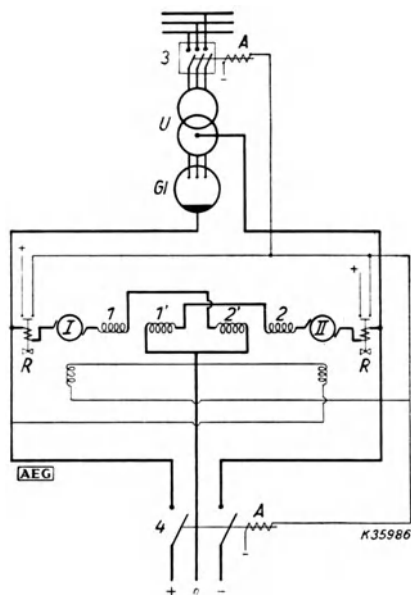


Bild 254. Neuer Ausgleichsatz für Spannungsteilung an einem Gleichrichter

I, II - Ausgleichsatz, 1, 1' = Verbundwicklungen auf den Polen der Maschine I, 2, 2' = Verbundwicklungen an den Polen der Maschine II, 3 = Hochspannungsschalter, 4 = Gleichstromnetzschalter, A = Auslösespule, Gl = Gleichrichter, R = Überstromrelais, U = Umspanner

2. *Selbsttätig arbeitende Spannungsteiler.* Es sind Spannungsteilermaschinen bekannt, die bei jeder Belastung gleiche Spannung haben und die Gesamtspannung genau teilen. Durch besondere Wicklungsanordnung einer Kompoundwicklung wurde ferner erreicht, daß beide Maschinen im Gegensatz zu den mit Anlassern ausgerüsteten Maschinen ohne schädliche Stromstöße unmittelbar mit der vollen Netzspannung angelassen werden können, wodurch sie besonders für selbsttätige Unterwerke gut geeignet sind. Jede Maschine des Ausgleichsatzes (Bild 254)¹⁾ erhält zwei Verbundwicklungen, von denen die eine vom eigenen Strom und die zweite vom Strom der anderen Maschine erregt wird. Im Anlauf besteht also eine Reihen-

schaltung von zwei Verbundmotoren. Die Verbundwicklungen wirken feldverstärkend, dadurch wird die Einschaltspitze des Anlaufstromes begrenzt. Vor allem aber erfolgt das Hochlaufen in sehr kurzer Zeit, so daß die Beanspruchung von Bürsten und Stromwendern in zulässigen Grenzen bleibt. Die Anlaufzeit liegt zwischen 0,1 und 0,3 sec, der Anlaufspitzenstrom erreicht das 3,5- bis 6fache des Mittelleiterstromes, also etwa die Hälfte der Gleichrichterleistung. Die Maschinen haben eine ähnliche Anlaufcharakteristik wie ein Drehstrommotor mit Kurzschlußläufer.

Ein völlig stoßfreies Anlassen des Maschinensatzes ist mit Hilfe gittergeregelter Gleichrichter möglich, da sie ein allmähliches Hochfahren der er-

¹⁾ H. Anschütz, AEG. J 1/222/054/2.

zeugten Gleichspannung gestatten, wobei der Maschinensatz mit wachsender Spannung allmählich angelassen wird.

m) Selbsttätige und ferngesteuerte Gleichrichterzentralen (Unterwerke)

Es sind zahlreiche Anlagen mit geringer Überwachung in Betrieb, die von einem Wärter ein- und ausgeschaltet und bei vorhandener Regulierung gelegentlich auf neue Spannungswerte eingestellt werden. Die Aufgabe wird jedoch schwieriger, wenn Gleichrichter selbsttätig in und außer Betrieb

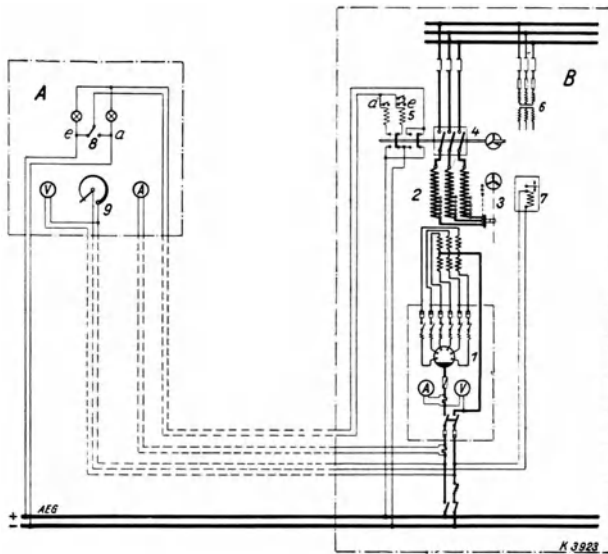


Bild 255. Schaltbild einer ferngesteuerten Glasgleichrichterstation

- | | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| a = Aus, | 4 = Ölschalter mit Fernantrieb, |
| e = Ein, | 5 = Zwischenschütze für den Öl- |
| 1 = Glasgleichrichter, | schalterantrieb, |
| 2 = Transformator mit Regulier- | 6 = Stationstransformator, |
| anzapfungen, | 7 = Spannungsrelais, |
| 3 = Regulierschalter mit motori- | 8 = Betätigungsschalter, |
| schem Antrieb, | 9 = Reguliervierstand zu 7. |

gehen sollen und sämtliche Veränderungen während des Betriebes ohne Eingriff eines Wärters berichtigt werden müssen.

1. Die ferngesteuerten Gleichrichterunterwerke. Die Eisen- und Glasgleichrichter eignen sich wegen ihrer einfachen Betriebsweise zum Bau von Unterwerken für Licht-, Kraft- und Bahnnetze. Zum Parallelarbeiten mit anderen Unterwerken werden Betätigungskabel installiert, um die Unterwerke von einer Schaltwarte aus ¹⁾ bedienen und überwachen zu können. Bild 255

¹⁾ W. Nowag, BBC.-Nachr. 1930, H. 1; 1929, H. 2; L. Lebrecht, AEG.-Mitt. 1930, H. 11; SSW.-Sonderdruck Nr. 496, S. 2854; U. Lamm u. G. Lindahl, ASEA.-Zeitschr. 1937, H. 3/4; Meiners, Automatische Steuerungen, Berlin, R. Oldenbourg, 1936.

zeigt das Schema einer ferngeschalteten und fernregulierten Glasgleichrichteranlage. Aus der Legende geht die Funktion der einzelnen Organe hervor. Mit 7 Betätigungsleitungen läßt sich die Station vollkommen überwachen. Auf Signal- und Meldeapparate ist verzichtet worden, weil an dem Amperemeter *A* in der Steuerstelle erkenntlich ist, ob das Unterwerk im Betrieb ist oder nicht. Es ist mit Hilfe beliebig vieler Betätigungsleitungen möglich, jedes einzelne Organ zu kontrollieren und zu steuern, doch erfordert dies oft eine übermäßig hohe Zahl von Steuerleitungen.

2. *Die halbselfsttätigen Unterwerke.* In ferngesteuerten Unterwerken lassen sich folgende Schaltvorgänge ohne Eingriff des Wärters automatisieren, wobei die Ein- und Ausschaltung der Station von Hand gesteuert wird.

1. Die selbsttätige Wiedereinschaltung der Gleichstromschalter oder Drehstromschalter nach erfolgtem Kurzschluß.
2. Die selbsttätige Zu- und Abschaltung weiterer Gleichrichter in Abhängigkeit von der Höhe der Belastung.
3. Die selbsttätige Konstanthaltung der erzeugten Gleichspannung.
4. Die lastabhängige Drehzahlregelung der Kühlventilatoren an Gleichrichtern.
5. Die Regelung der Kühlwassertemperatur an wassergekühlten Gleichrichtern.
6. Die Überwachung und Einschaltung der Vakuumpumpen in Abhängigkeit vom Druck.

Um an Betätigungsleitungen zu sparen, sind auch Kunstschaltungen entwickelt worden. Mit Hilfe einer Betätigungsbatterie und Relais ist es möglich, mit einem Steuerdrahtpaar ¹⁾ mehrere Schaltvorgänge auszulösen, wie Bild 256 erkennen läßt. Beim Inbetriebsetzen der Gleichrichteranlage wird der Druckknopf 1 in der Steuerstelle betätigt, das Relais *H* schließt seinen Kontakt *a* und der Relaisantrieb *R* steuert den Drehtransformator *D*, bei etwa 30% Öffnungsstellung schließt Kontakt *y* auf der Drehtransformatorwelle den Einschaltstrom des Ölschalters und der Gleichrichtersatz zündet. Das Ausgleichsaggregat 4 beginnt bei etwa 50% der Gleichstromspannung anzulaufen. Die Leitungen *L*₁ und *L*₂ sind in der Gleichrichteranlage an den Meßwiderstand 6 und in der Fernsteuerstelle an den Fernstrommesser 7 angeschlossen. Durch Betätigung des Druckknopfes 8 läßt sich die Fernstrommessung unterbrechen und die Spannung mit Hilfe des Spannungsmessers 9 kontrollieren. Eine Störung innerhalb der Gleichrichteranlage zeigt Relais 11 durch Beunruhigung der Fernmesser 7 oder 9 an. Beim Außerbetriebnehmen der Anlage wird der Druckknopf 2 so lange betätigt

¹⁾ *W. Venzke*, Eindrahtschaltung, AEG.-Mitt. 1933, H. 4 u. 5.

bis der Drehtransformator D in seine Schließstellung gesteuert ist, in dieser wird der Ölschalter ausgelöst. Es sind auch ähnlich einem Telephonapparat mit Selbstwählern¹⁾ und einem Steuerdrahtpaar eine größere Anzahl Schaltungen möglich. Die innere Ausführung ist den Telephonanlagen verwandt.

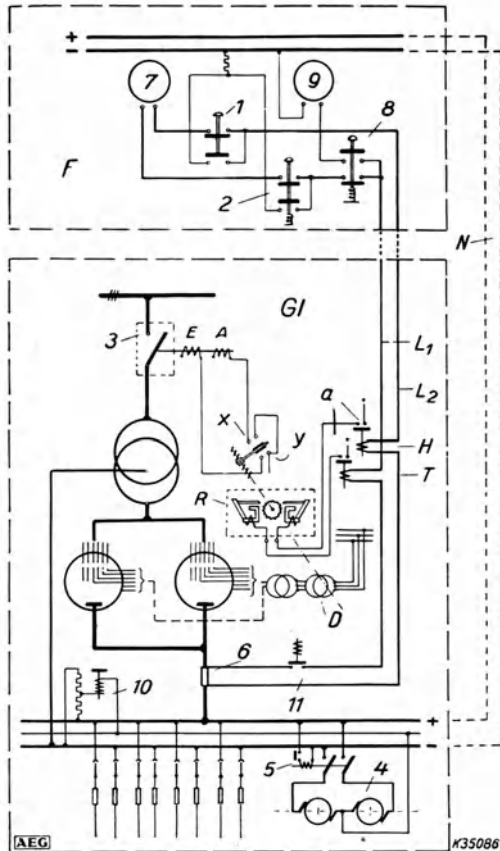


Bild 256. Gittergeregelte, über zwei Leitungen ferngesteuerte und fernüberwachte Stromrichterstation

3. *Selbsttätige Gleichrichterunterwerke.* Im Bild 257 ist die schematische Anordnung eines selbsttätigen Gleichrichterunterwerkes dargestellt. Der Spannungswächter KV schaltet den Schalter 1 bei niedriger Gleichspannung über Zeitrelais Z_3 ein und Stromrelais S_1 bei hoher Belastung den zweiten Gleichrichter G_2 über Zeitrelais Z_1 zu. Das Minimalrelais S_2 schaltet ihn bei fallender Last über Zeitrelais Z_2 ab. Der führende Gleichrichter

¹⁾ F. Schneider, AEG.-Mitt. 1934, H. 7.

schaltet mit Relais S_2 bei kleiner Belastung auch die gesamte Anlage aus. Das Wiedereinschaltrelais schaltet die Hauptgleichstromschalter A wieder ein, wenn sie durch Überstrom ausgefallen sind. Mit Hilfe des Spannungsrelais R , des motorischen Antriebes M_3 und Regelschalters RS kann die Spannung selbsttätig reguliert werden. Das Relais R hat eine zusätzliche Stromwicklung (Kompoundwicklung), damit bei hoher Belastung eine höhere

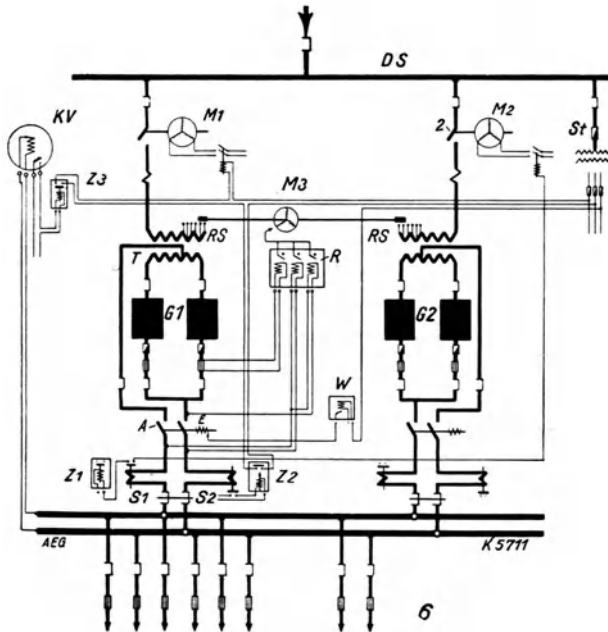


Bild 257. Schaltbild einer automatischen Glasgleichrichterstation

- | | | | |
|--------------|----------------------|--------------|------------------------|
| 1, 2 = | Ölschalter, | R = | Regulierinstrument, |
| A = | Gruppenautomat, | RS = | Regulierschalter, |
| DS = | Drehstrom-Sammel- | S_1, S_2 = | Stromwächter für Zu- |
| | schienen, | | und Abschaltung, |
| G_1, G_2 = | Gleichrichter- | St = | Stationstransfor- |
| | gruppe 1, 2, | | mator, |
| KV = | Kontaktvoltmeter für | T = | Haupttransformator, |
| | Inbetriebnahme, | W = | Wiedereinschaltrelais, |
| M_1, M_2 = | Motorischer Antrieb | Z_1, Z_2 = | Zeitrelais für Zu- und |
| | für Ölschalter 1, 2, | | Abschaltung, |
| M_3 = | Motorischer Antrieb | Z_3 = | Zeitrelais für Inbe- |
| | für Reglerschalter, | | triebnahme. |

Gleichspannung konstant gehalten werden kann. Auf diese Weise erhält der Gleichrichter eine den Überkompoundmaschinen ähnliche Charakteristik. Es wird z. B. für ein 440-V-Netz eine Spannung von 440 V im Leerlauf und 480 V bei Vollbelastung gewählt, hierdurch wird der Kabelverlust größerer Netze ausgeglichen und die Verbraucher erhalten eine angenähert gleiche Spannung. Diese Ausführung ist für sämtliche Regelarten möglich und läßt sich insbesondere mit der Gittersteuerung gut herstellen.

Von den halbselfsttätigen Stationen bis zur vollen Selbständigkeit besteht demnach nur noch ein kleiner Schritt, denn die einzelnen Forderungen aus dem vorigen Abschnitt erfüllen bereits die Hauptaufgaben. Als neue kommen hinzu:

1. Das selbsttätige Ein- und Ausschalten der Station.
2. Die Strombegrenzung der Gleichrichtergefäße.
3. Die Sicherheitsüberwachungen beim Ausfall einzelner Gleichrichter und die Ausschaltung bei groben Störungen.
4. Fallklappenrelais um den Ort einer Störung schneller finden zu können.

Das Ein- und Ausschalten eines Werkes kann von verschiedenen Vorgängen abhängig gemacht werden.

- a) Von einer Schaltuhr, die zu bestimmten Tageszeiten ein- und ausschaltet.
- b) Von der Gleichstromnetzspannung des zu speisenden Gleichstromnetzes. Bei einer zu starken Spannungsabsenkung schaltet ein Spannungswächter das Unterwerk ein und ein Minimalstromrelais wieder aus, wenn die Belastung zurückgegangen ist¹⁾.
- c) Von der Stromstärke des Gleichstromspeisekabels, das an dem Gleichrichterwerk vorbeigeführt ist. Ein Stromwächter schaltet das Unterwerk ein und aus.

Die Strombegrenzung muß für jedes Gefäß einmal vorgesehen werden. Sie schaltet bei Überlastung des ersten Gefäßes ein zweites zu oder ab. Sobald dieser Vorgang versagt, werden die Hauptschalter ausgelöst oder der Stromwächter stellt bei vorhandener Spannungsregulierung den in Betrieb befindlichen Gleichrichter auf einen der höchsten Stromstärke entsprechenden Spannungswert ein. Der Stromwächter schaltet demnach das Spannungsregulierrelais stromlos und übernimmt dessen Funktion. Bei weiterer Stromsteigerung erst sprechen die Überstromschalter an.

Die Sicherheitsüberwachungen sollen folgende Unregelmäßigkeiten anzeigen:

1. Wenn die Gleichrichter nicht zünden.
2. Wenn das Werk durch Überlastung ausfällt.
3. Wenn die Wiedereinschaltvorrichtung der Streckenspeiser beim Kurzschluß einige Male geschaltet hat und ihren Endkontakt erreicht.
4. Wenn der Hauptumspanner zu hohe Temperatur anzeigt oder gestört ist.
5. Wenn einer der Kühlventilatoren versagt.
6. Wenn die Kühlwassertemperatur an Eisengleichrichtern zu hoch ansteigt oder wenn die Umlaufpumpe eine Störung hat.
7. Wenn der Druck im Gleichrichtergefäß oder Vorvakuumraum zu hoch ansteigt.

¹⁾ G. W. Müller, DRP. 454751, 493853.

Es hängt von der Wichtigkeit des Unterwerkes ab, ob der Hauptsicherheits-schalter bei diesen teilweise geringen Unregelmäßigkeiten die gesamte Anlage abschalten oder die Störung nur anzeigen soll. Es sind selbsttätige Bahnunterwerke erstellt worden, in denen zuerst ein länger anhaltendes Signal ausgelöst wird, wobei gleichzeitig eine außen am Gebäude sichtbare rote Lampe aufleuchtet¹⁾. Der Wagenführer des nächsten vorbeifahrenden Wagens meldet die Störung nach dem mit einem Wärter besetzten Hauptwerk. Wenn mehrere Unterwerke in ein gemeinsames Netz speisen, kann

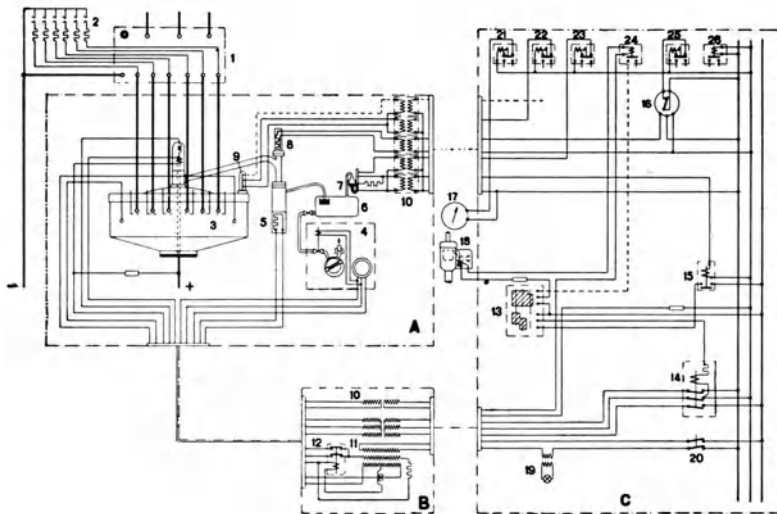


Bild 258. Schaltplan für die Hilfsapparate des Gleichrichters. Die Schalttafelapparate sind durch Verwendung von Isolertransformatoren von den aufgeladenen Teilen des Gleichrichtergerätfäßes getrennt (ASEA.)

A = Gleichrichtergerätfäß mit angebauten Apparaten, B = Zünd-, Erreger- und Isoliertransformatorenaggregat, C = Schalttafel

- | | |
|---|---|
| 1 = Gleichrichtertransformator, | 16 = Anzeigedruckmesser für Hochvakuum, |
| 2 = Überspannungsschutz, | 17 = Kontaktmanometer für das Kühlwasser des Gleichrichtergerätfäßes, |
| 3 = Gleichrichtergerätfäß, | 18 = Wasserdruckrelais für die Hochvakuum-pumpe, |
| 4 = Vorvakuum-pumpe, | 19 = Signallampe für Erregerstrom, |
| 5 = Hochvakuum-pumpe, | 20 = Hilfskontakte an Hauptdrehstrom-schalter, |
| 6 = Vorvakuumbehälter, | 21 = Signalrelais für das Kühlwasser, |
| 7 = Kontaktvakuummeter, | 22 = Signalrelais für Übertemperatur des Gleichrichters, |
| 8 = Vakuummeterrohr, | 23 = Signalrelais für Vorvakuum, |
| 9 = Anzeig- und Kontaktthermometer, | 24 = Signalrelais für die Kühlung der Hoch-vakuum-pumpe, |
| 10 = Isolertransformatoren, | 25 = Signalrelais für Hochvakuum, |
| 11 = Zünd- und Erregertransformator, | 26 = Signalrelais für Nullspannung. |
| 12 = Zündrelais, | |
| 13 = Schalter für die Vakuum-pumpen, | |
| 14 = Schütz, | |
| 15 = Relais zum automatischen Anlassen der Vorvakuum-pumpe, | |

im allgemeinen ein Unterwerk ausfallen, ohne daß die anderen in Mitleiden-schaft gezogen werden, sobald diese stark genug bemessen sind. In Bahn-anlagen mit gelegentlich kurzen, aber hohen Stromspitzen werden für die

¹⁾ G. W. Müller, Elektr. Bahnen, Nov. 1932.

Zu- und Abschaltung Langzeitrelais vorgesehen, die nicht bei jedem Stromstoß oder bei jeder vorübergehenden Entlastung ansprechen. Hierdurch wird ein allzuhäufiges Arbeiten der Schaltorgane vermieden und deren Kontakte geschont. Damit sich sämtliche Gleichrichter gleichmäßig abnutzen, werden auch Wahlschalter vorgesehen, um die Führung beim Zu- und Abschalten auf jeden Gleichrichter übertragen zu können. BBC.¹⁾ verwendet hierzu die von ihr sogenannte Meisterwalze, deren Einstellung mit Hilfe eines Antriebes erfolgt, der fernsteuerbar ist. Die Automatisierung der Hilfsapparate für einen selbsttätig arbeitenden Eisgleichrichter mit Umlaufkühlwasser zeigt Bild 258. Nach diesem Schema werden sämtliche Zubehörgorgane wie Zünderregereinrichtung, Vakuumhaltung und Kühlwasserregelung durch Relais überwacht. Die Anwendung solcher Gleichrichter als selbsttätige oder halb selbsttätige Unterwerke erfolgt im Rahmen der beschriebenen Gesamtschaltungen und Anwendungsgebiete.

n) Die Streckenspeisung und selbsttätige Bahnspeiser

Die Gleichrichter haben zur Speisung von Bahnnetzen eine große Bedeutung gewonnen. Am bekanntesten sind die zahlreichen Unterwerke der Berliner Stadtschnellbahnen²⁾ der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft, die wir als bekannt voraussetzen können. Das Bild 259 zeigt die Strombelastung einer Unterstation dieses Bahnnetzes. Eine eindrucksvolle Darstellung über den Wert eines Unterwerkes gibt das Bild 260³⁾. Bei nicht eingeschaltetem Unterwerk erleidet die Fahrdrachtspannung Absenkungen von 600 bis nahezu 400 V, sie wird jedoch bei eingeschaltetem Unterwerk auf etwa 600 V konstant gehalten. In der Praxis wird unterschieden zwischen Hauptkraftwerken und im Netz verteilten Unterwerken, sowie zwischen Unter- und Hauptwerken, die mit mehreren Speiseleitungen ein verzweigtes Netz speisen. In beiden Fällen erhalten jedoch die unmittelbar mit dem Bahnnetz in Verbindung stehenden Speisekabel einen selbsttätig wirkenden Ausschalter, um Kurzschlüsse und Überbelastungen im Netz örtlich zu begrenzen. Eine schematische Darstellung einer zweckmäßigen Bahnnetzspeisung von einer Kraftquelle aus zeigt Bild 261. Das Gleichstromspeisekabel hat einen Hauptschalter 10 mit selbsttätiger Überstromauslösung. Jedem Gleichrichtergestell sind thermisch wirkende Verzögerungsrelais 9 zugeordnet, die bei Überlastung einzelner Gleichrichtergefäße den Schalter 10 auslösen. Von der Gleichstromverteilung zweigen einzelne Leitungen, sogenannte Bahnspeiser, über

¹⁾ W. Nowag, BBC.-Nachr. 1930, H. 1.

²⁾ W. Nowag, BBC.-Nachr. 1929, H. 2; ETZ. 1939, H. 11, S. 339. (Die Southern Railway hat heute 250000 kW Gleichrichterleistung in 100 Einheiten. Die Leistung der Berliner Schnellbahnen dürfte hiervon nicht viel abweichen.)

³⁾ Sonderdruck SSW., SGO. 4183/47.

Überstromschalter 11 ab. Nach einer anderen Überlegung wird jedem Gleichrichter ein Überstromselbstschalter zugeordnet¹⁾. Es gibt eine ganze Anzahl gut erprobter Einrichtungen, die das selbsttätige Wiedereinschalten der Streckenschalter nach einem Kurzschluß oder Überlastungsstrom ermöglichen.

In Bahnanlagen ist damit zu rechnen, daß die Wagenführer die Anlaßkontrollen bei ausgefallenem Netz auf Null stellen, so daß im wieder ent-

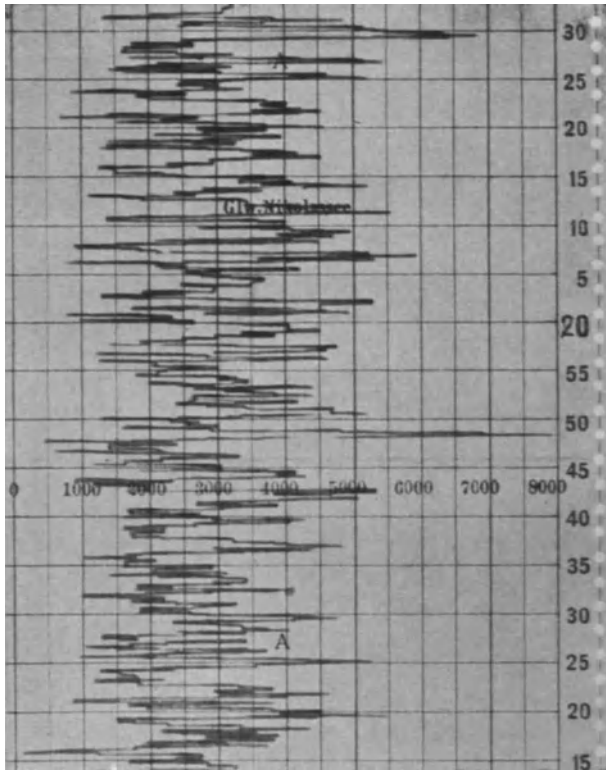


Bild 250. Die Stromkurve einer Eisengleichrichterunterstation der Berliner S-Bahn (AEG.)

störten Bahnnetz ein verhältnismäßig hoher Widerstand besteht, wenn ein vorübergehender Kurzschluß oder Laststoß die Ursache der Störung war. Es ist demnach möglich, mit Hilfe von Prüf Widerständen das Wiedereinschalten des Streckenspeisers zu überwachen. Für länger andauernde Kurzschlüsse muß der Prüf widerstand sehr groß bemessen werden, auch entsteht hierdurch ein Stromverlust. Diese Nachteile werden durch zeit-

¹⁾ Vgl. auch Bild 115; *W. Brockmann*, Siemens-Zeitschr. 1935, S. 235.

abhängige, mehrmalig wirkende und mittels Uhrwerk betätigte Wieder-einschaltrelais oder durch eine Zeitsteuerung mit Thermoelernen vermieden¹⁾. Der Prüfstromkreis wird in Zeitabständen von 20 bis 40 sec kurzgeschlossen und wieder geöffnet, wenn der Kurzschluß weiter besteht.

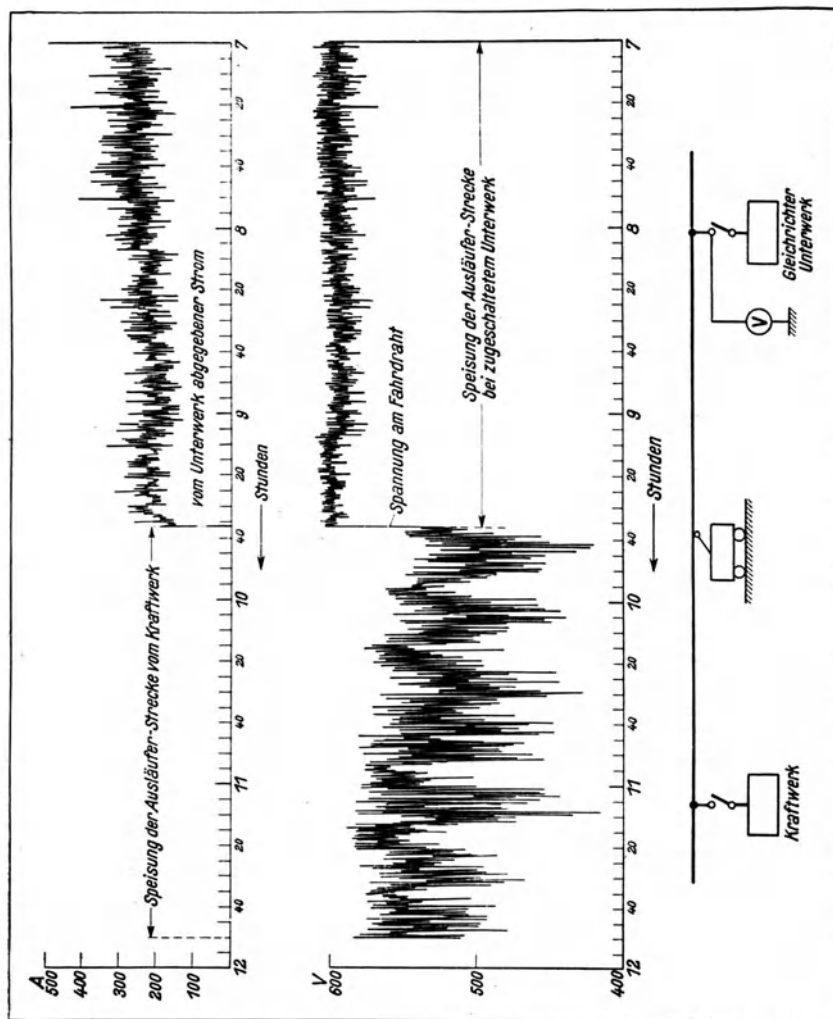


Bild 260. Strom- und Spannungsverlauf in einem Bahnnetz (SSW.)

Ein von den SSW. seit Jahren verwendeter Schalter ähnlicher Wirkung trägt die berechnete Bezeichnung „kluger Schalter“, denn er übernimmt gewissermaßen die Funktionen eines Wärters. Die sich selbsttätig über-

¹⁾ G. Meiners u. B. Fleck, Selbsttätige Streckenschalter, AEG.-Mitt. f. Bahnbetriebe 1933, H. 15; H. Kother, El. Bahnen, Sept. 1939.

wachenden Streckenschalter sind heute Allgemeingut der Elektrotechnik und werden auch von vielen Firmen hergestellt.

o) Selbsttätige Streckenspeiser für Lichtnetze und das Einschalten kalter Netze

Die Kurzschlußüberwachung in einem Licht- und Kraftnetz ist mit Prüf-
widerständen schwierig, weil die Stromverbraucher beim Stromausfall nicht

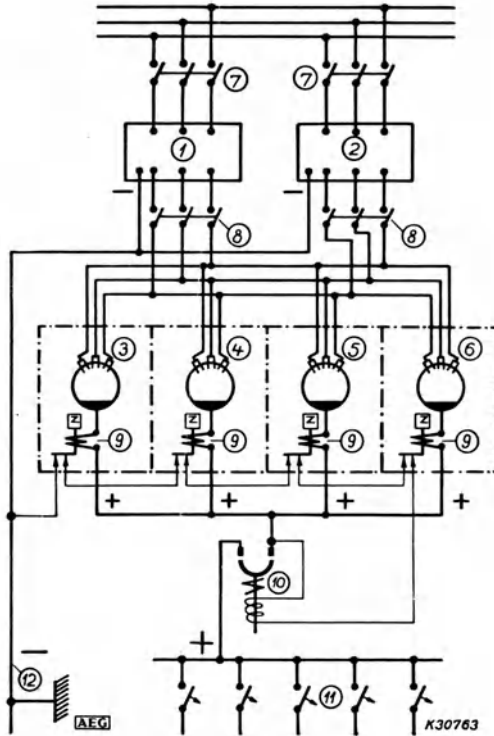


Bild 261. Grundsätzliche Anordnung einer Bahnanlage. 3—6 Gleichrichter, 11 Bahnspesier, 1—2 Haupttransformatoren, je Gleichrichter ein Überstromrelais 9 und für die Anlage ein gemeinsamer Hauptselbstschalter 10

immer ausgeschaltet werden. In einem Lichtnetz ist ferner zu beachten, daß kalte Glühlampen einen kurzschlußähnlichen Einschaltstrom aufnehmen. Daher werden die Streckenspeiser für Lichtnetze wohl immer ohne Prüf-
widerstände ausgeführt und in selbsttätigen Stationen unmittelbar solange auf das kalte Netz geschaltet, bis der Kurzschluß beseitigt ist, oder die Wiedereinschaltvorrichtung verriegelt wird¹⁾. Wegen der großen Über-
lastungsfähigkeit der Eisen- und Glasgleichrichter entstehen durch diese einfache und grobe Einschaltung auf einen Netzkurzschluß keine Nachteile.

¹⁾ Vgl. Bild 257.

Man kann auch sagen, daß dieser Vorteil der Gleichrichter die einfache Streckenüberwachung erst ermöglicht hat. Um in diesem Zusammenhang den Einschaltstromstoß kalter Lichtnetze kennenzulernen, sind oszillographische Aufnahmen gemacht worden. Nach Bild 262 steigt der Strom eines 100-A-Gleichrichters beim satten Kurzschluß auf etwa 1050 A und

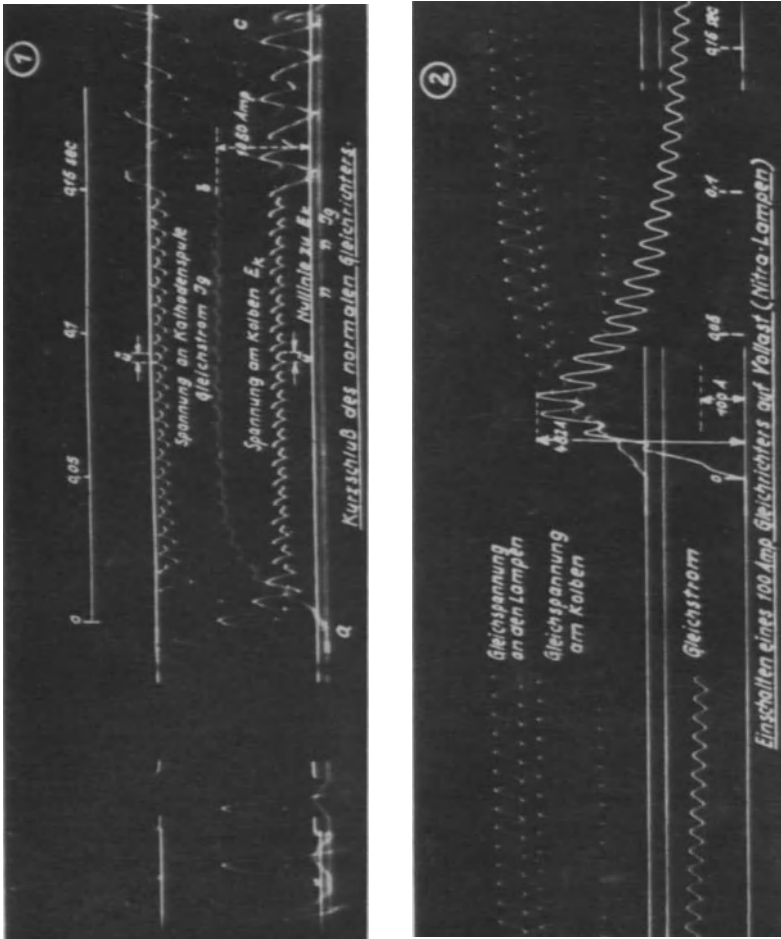


Bild 262. Oszillographische Aufnahmen an kurzgeschlossenen Gleichrichtern (AEG.)
 1 - Kurzschluß an den Gleichstromklemmen eines normalen 100-A-Gleichrichters, 2 = Einschalten von kalten Glühlampen, die beim normalen Brennen insgesamt 100 A Strom verbrauchen

beim Einschalten eines kalten Glühlampennetzes auf 480 A an. Dieser Strom klingt in 0,1 bis 0,15 sec auf den Normalwert ab, wobei Schalter und Sicherungen nicht ansprechen sollen. Kalte Glühlampen haben einen 12- bis 13fach kleineren Ohmschen Widerstand. Jedoch bereits beim Ansteigen des Stromes wird der Leuchtdraht erwärmt, so daß der Strom

unter Berücksichtigung des Spannungsrückganges bei überlasteten Stromerzeugern in der Praxis nicht so hoch ansteigt, als häufig angenommen wird. Immerhin wurde für große Netzgleichrichter der Vorschlag gemacht, das Herausfallen der Selbstschalter beim Einschaltstromstoß kalter Lichtnetze durch kurzzeitig in den Gleichstromkreis geschaltete Anlaufwiderstände zu vermeiden. Die Gitterregulierungen, Drehregler, Schubtransformatoren und Regeldrosselspulen gestatten dagegen ein allmähliches, stromstoßfreies Hochfahren kalter Netze.

14. Ausgeführte Anlagen und Schluß des Buches

Aus der Fülle der in den letzten Jahrzehnten erstellten Stromrichteranlagen lassen sich in einer zusammenhängenden Schrift nur einige Beispiele

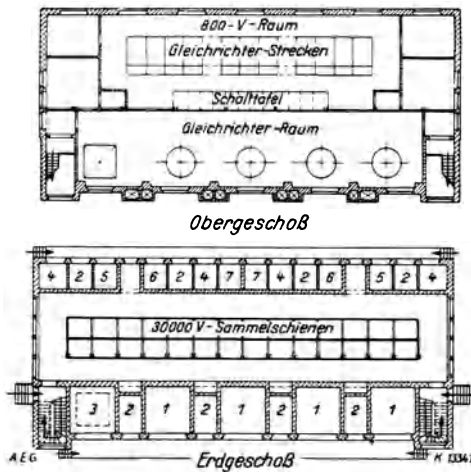


Bild 263. Die Raumanordnung einer größeren Eisengleichrichteranlage (4 Gefäße, AEG.)

anführen. So zeigen die Bilder 263 bis 265 einige Grundrißzeichnungen erstellter Glas- und Eisenstromrichteranlagen in ein- und zweistöckigen Gebäuden. Die grundlegenden Unterschiede in der Raumanordnung zwischen den Bildern 263 und 264 bestehen in der Erstellung der Stromrichtergefäße. Im Bild 263 ist die für größere Eisenstromrichter typische freie Aufstellung der Gefäße erkenntlich und im Bild 264 die Anordnung der Glasgefäße in den Schaltgerüsten. Die zu den Gefäßen gehörende Schalttafel ist nach der Ausführung Bild 263 von den Gefäßen getrennt angeordnet und in der Nähe der Stromverteilungsschaltanlage erstellt worden. Die Überwachung der Stromrichtergefäße erfolgt hierbei vorwiegend von dem Schaltraum aus. Wie die einzelnen Abschnitte aufwiesen, dienen hierzu Fernmeßeinrichtungen für den Strom, die Spannung, das Vakuum, das Kühlwasser u. a.

Die schaltgerüstähnliche Bauweise der Stromrichter gestattet nach Bild 264 eine mehr örtliche Verbindung der Stromrichtergefäße, Stromrichterschalttafel *S* und Stromverteilung *K*. Der in diesem Bild mit *Au* bezeichnete Maschinensatz dient zur Spannungsteilung im Gleichstromdreileiternetz. Grundsätzliche Richtlinien für den Bau von Stromrichter-

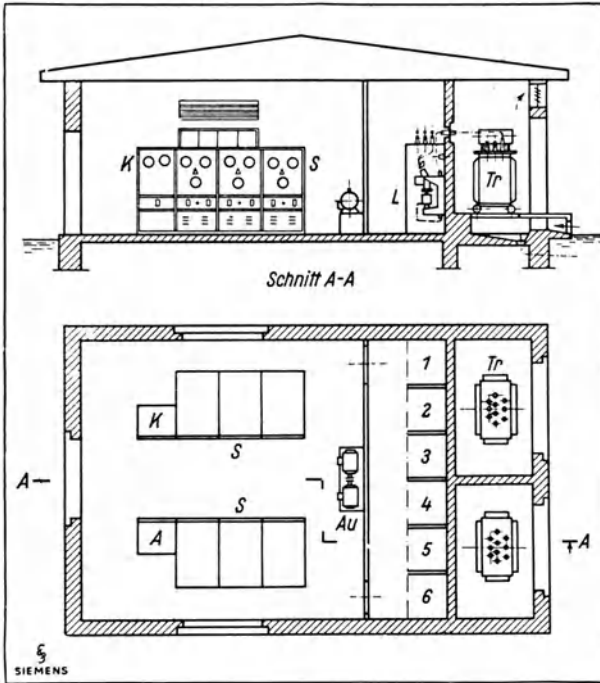


Bild 264. Raumanordnung einer größeren Glasgleichrichteranlage [6 Gleichrichter (*S*) mit Transformatoren (*Tr*) und Schaltanlage (1—6, *K*, *L*) SSW.]

anlagen bestehen jedoch offenbar nicht, denn das Schrifttum zeigt besonders Eisenstromrichteranlagen in beiden Ausführungsarten. So zeigt beispielsweise Bild 265 einen neuartigen Aufbau für eine größere Glasgleichrichteranlage. Die Kühlluftanlage 4 bis 5 befindet sich im Kellerraum und dient zum Kühlen der Glasgefäße entsprechend der im Bild 90 dargestellten Ausführung. Auch diese Anordnung gestattet eine Vereinigung der verschiedenen Schaltfelder mit den Stromrichtergefäßen. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, daß die Rückkühlanlagen für wassergekühlte Eisenstromrichter häufig in Kellerräumen erstellt werden, auch die Gleichstromhauptschalter (Schnellschalter) finden oft im Leitungszuge der nach unten führenden Kathodenableitung im Kellerraum Platz. Der so gebildete Pluspol der Stromrichteranlage wird von diesem Schalter nach der Haupt-

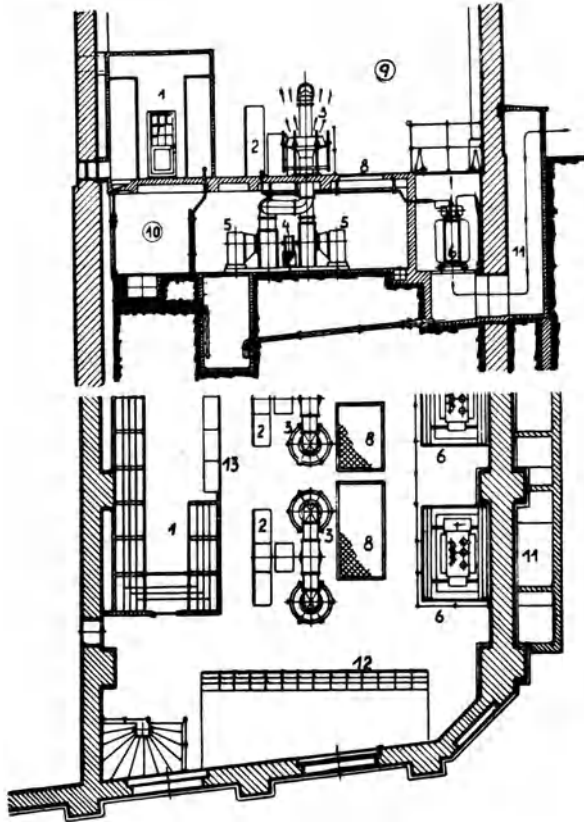


Bild 265. Grundriß und Aufriß einer Gleichrichterstation (ELIN.)

- | | |
|---------------------------------|------------------------------|
| 1 = Hochspannungs-Schaltanlage, | 8 = abdeckbare Luftöffnungen |
| 2 = Apparateschrank, | in der Kellerdecke, |
| 3 = Kolbenbehälter, | 9 = Maschinenhaus, |
| 4 = Kühlaggregat, | 10 = Kellergeschoß, |
| 5 = Luftfilter, | 11 = Frischluft-Fallschacht, |
| 6 = Gleichrichtertransformator, | 12 = Netzverteiltafel, |
| 7 = Ölgrube, | 13 = Hauptschalttafel. |

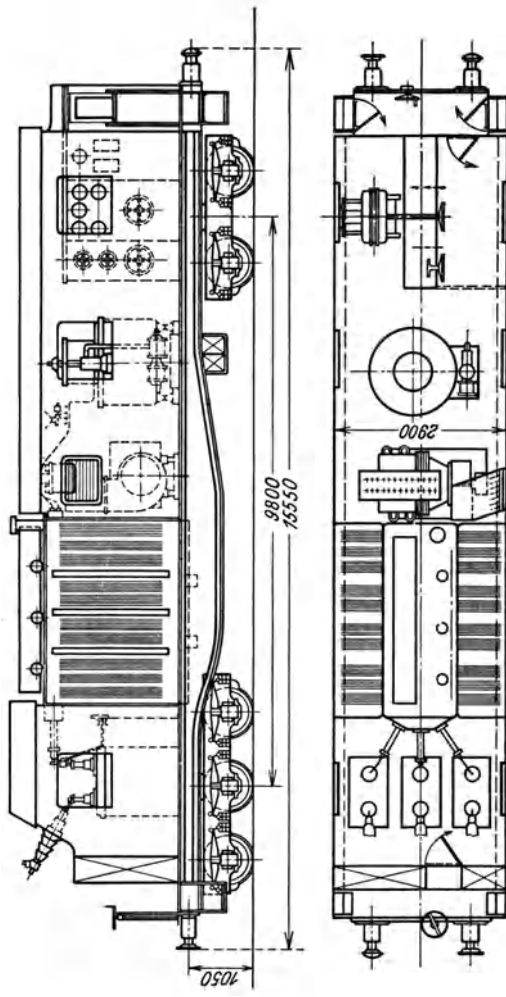


Bild 266. Übersichtszeichnung eines fahrbaren Quecksilberdampf-Großgleichrichter-Unterwerkes für 2100 kW, 3000 V, angeschlossen an Drehstrom 60000 V, 50 Hz (BBC.)

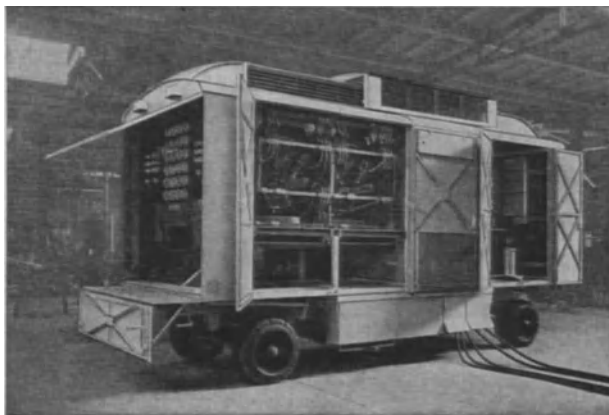
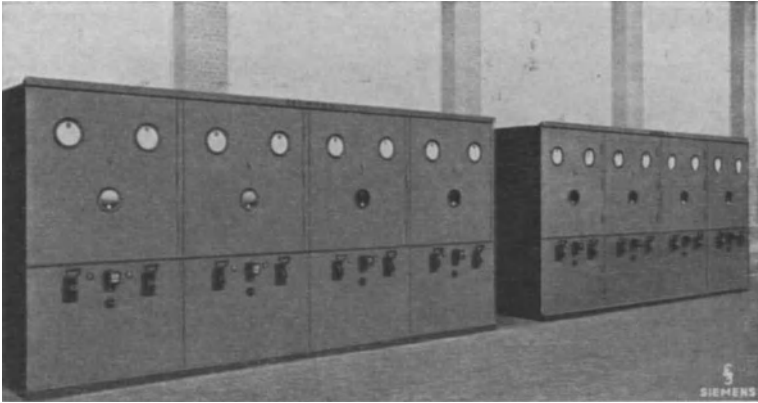


Bild 267. Eine fahrbare Glasgleichrichterstation bestehend aus zwei Gefäßen 400 A. (Vgl. auch *O. Lütze*, Stuttgart, AEG.-Mitt. 1929, H. 2. *O. Lütze* hat als erster solche Stationen erbaut)

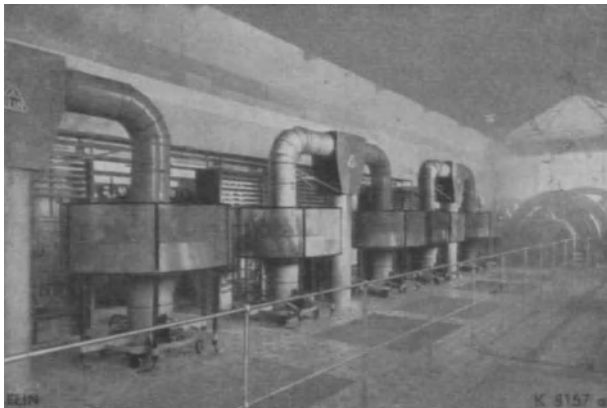


Bild 268. Ansicht einer im Betrieb befindlichen Glasgleichrichteranlage 5×400 A mit Gitterregelung durch einen Drehregler (AEG.)



Vorderansicht

Bild 269. Acht Glasgleichrichter in Parallelarbeit (8×500 A, 600 V, SSW. Vgl. Bild 115)



Gleichrichterraum im Erdgeschoß

Bild 270. Sechs Glasgleichrichter mit geführter Unter- und Oberluft (ELIN.)



Bild 271. Eine Eisgleichrichteranlage mit pumpenlosen Gefäßen, ausgeführt als Freiluftstation 2×500 A (J. Pintsch)

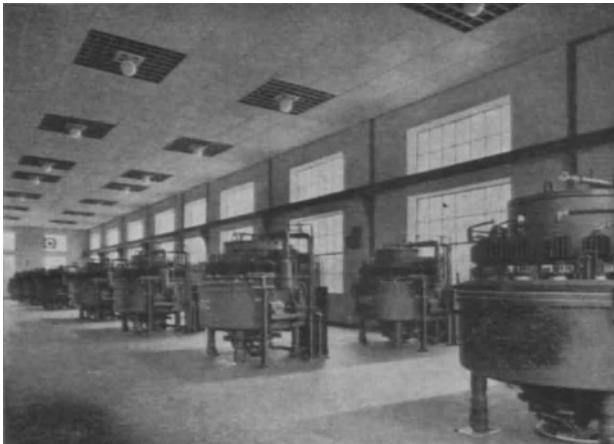


Bild 272. Eine Großstromanlage, 16 Gefäße je 5000 A 800 V (BBC.)

verteilungsschalttafel geführt. Der Minuspol wird von der Hauptschalttafel kommend mit dem Nullpunkt, entsprechend der gewählten Transformatorschaltung, verbunden. In bahnspeisenden Anlagen wird der Pluspol nicht immer an die Stromschiene oder Oberleitung geführt. Vielfach wird der Pluspol mit der Fahrschiene verbunden, wodurch die Berührungsspannung der Stromrichtergefäße und der Hilfseinrichtungen, wie Zündung, Erregung u. a., gegen Erde gering ist.

Die pumpenlosen Eisengleichrichter werden in der Installation der einen oder anderen Ausführung angepaßt, d. h. sie werden getrennt von dem Schaltergüst errichtet oder bilden mit ihm eine konstruktive Einheit. Für die Wahl zwischen beiden Ausführungsarten ist für sämtliche Stromrichterarten wohl immer die Größe der Anlage und der vorhandene Platz entscheidend. Eine neuartige Verwendung der Stromrichter zeigt Bild 271. Die in diesem erkenntliche Freiluftstation besteht aus zwei pumpenlosen Eisengleichrichtern mit zwischen beiden stehender Hilfsschalttafel und hinter den Gefäßen stehenden Haupt- und Regeltransformatoren. Die Herstellerfirma berichtet, daß die Anlage ohne Vorwärmung oder besondere Vorbereitungen auch im strengsten Winter täglich einmal eingeschaltet wurde und sofort belastet werden konnte. Die beobachteten Temperaturen waren häufig niedriger als -20° . Somit ist die Möglichkeit gegeben, beim Errichten von Stromrichter-Unterwerken analog zu den Freiluftumspannwerken an Gebäudekosten zu sparen. Bild 266 läßt die Anordnung eines Eisengleichrichters auf einem Eisenbahnwaggon und Bild 267 eine auf Straßen fahrbare Glasgleichrichteranlage erkennen. Die fahrbaren Anlagen werden als sogenannte fliegende Anlagen bei vorübergehend stark beanspruchten Betrieben eingesetzt. Die Bilder 267 bis 270 zeigen ausgeführte Stromrichteranlagen für verschiedene Anwendungsgebiete der Elektrotechnik.

Die bisher offenbar größten erstellten Anlagen bestehen aus 16 Gleichrichtern je 5000 A bei 800 V Gleichspannung und speisen Schmelzflußelektrolysen. In den letzten Jahren sind die Großgleichrichter der Berliner Schnellbahn (Deutsche Reichsbahn) von den bedeutend gewordenen Gleichrichtern für Elektrolyse in ihrer Leistung wohl überholt worden. Ebenso hat die Verwendung gittergesteuerter Gleichrichter für kleinere und größere Motorbetriebe, besonders in Walzwerksbetrieben, sehr an Umfang gewonnen. Hierzu gehören auch die Umrichteranlagen und Stromrichterlokomotiven der Deutschen Reichsbahn, die neben ihren ständigen Erweiterungen und Neubauten, gefördert durch Professor *Wechmann*, stets dazu beigetragen hat, den Stromrichtern neue Verwendungsgebiete zu schaffen.

Namenverzeichnis

- Anschütz, H.** 168, 190, 202, 214, 233, 239.
- Babat** 179.
- Baudisch, K.** 97, 143, 149, 171, 183, 188, 214, 233.
- Bauer, H.** 202.
- Bertele, H. v.** 91.
- Böhm, H.** 247.
- Bölte, K.** 119.
- Brynhildsen, C.** 157.
- Braband, C.** 176, 210.
- Brockmann, W.** 266.
- Brown** 66.
- Busch** 235.
- Cypra, H.** 201.
- Dällenbach, W.** 63, 66, 67, 98, 139, 140, 211, 217.
- Denzel, P.** 237.
- Dobke, G.** 97, 143.
- Draeger, N.** 97.
- Drobka, P.** 248.
- Drozdow** 77.
- Dushmann, S.** 132.
- Ehrensberger, C.** 200.
- Eichacker, R.** 235.
- Eitel, W.** 20.
- Engel, A. v.** 9, 76.
- Espe, W.** 18, 21, 29, 73, 74, 79.
- Falk, G.** 207.
- Fleck, B.** 267.
- Geel, W. Ch.** 148.
- Geiger, P. H.** 148.
- Geise, H.** 235.
- Gerecke, E.** 66, 67, 98, 140, 211, 217.
- Germershausen, W.** 51, 53, 60.
- Glaser, A.** 50, 52, 55, 58, 71, 157, 184, 186, 211.
- Gottschalk, A.** 157.
- Gramisch, O.** 63, 79, 211, 218, 235.
- Grieb, F.** 200.
- Grondahl, L. O.** 148.
- Grünewald, H.** 157, 158.
- Güntherschulze** 48, 61, 63, 73, 76, 87, 147, 221.
- Haase, C.** 206.
- Hahn, W.** 256.
- Hameister, G.** 253.
- Hartmann J.** 146
- Hass, W.** 53.
- Hauffe, F.** 182, 209, 211.
- Heinerich, R.** 147, 157.
- Heinze, W.** 53.
- Hellfarth, R.** 225.
- Hellmuth, Fr.** 22, 48, 71, 114, 115, 116, 179.
- Hewitt, P. C.** 47, 49, 125, 176, 177.
- Hoffmann, H.** 153, 156, 240, 247.
- Hull** 55, 66, 67.
- Ichlmann, E.** 232.
- Issendorf, J. v.** 63, 68, 69.
- Jacobi, W.** 173.
- Jäger** 235.
- Janetschke, E.** 209.
- Jong, F. H. de** 211.
- Jungmichl, H.** 73, 91, 93, 221, 228, 235.
- Kafka, W.** 149.
- Kalkner, B.** 206, 207.
- Kern, E.** 203, 211.
- Kettner, K.** 199.
- Kleeberg, F.** 90, 118.
- Kluge, W.** 50, 52, 55, 58, 157, 164.
- Kniepkamp, H.** 173.
- Knoll, M.** 18, 21, 29, 73, 74, 79.
- Kobel, E.** 74, 180.
- Kober, C. L.** 152.
- König, H.** 206.
- Kother, H.** 157, 189, 254, 256, 267.

- Krämer, Chr. 125, 197.
 Krijger, P. 228.
 Kügler, R. 119.
 Lamm 175, 259.
 Landsmann, K. 246.
 Langmuir 5, 179.
 Laub, H. 181, 183, 197.
 Lauster, F. 18, 21, 24.
 Leblanc, E. 92.
 Lebrecht, L. 25, 122, 130, 214, 228,
 229, 259.
 Leidi 139.
 Leukert, N. 183, 188, 207.
 Leuthold, A. 189, 238.
 Lieben 176.
 Lindahl, G. 259.
 Löbl, N. 195, 196.
 Loog, C. 247.
 Loosli, H. 47.
 Lübke, E. 177.
 Lütze, O. 274.
 Mair, K. 152, 156.
 Marti, O. K. 79, 211, 218, 235.
 Marx, E. 6, 158, 179, 231.
 Meier, J. A. 253.
 Meiners, G. 259, 267.
 Mertens, Fr. 157.
 Meyer, F. W. 211.
 Meyer-Delius 195, 197, 198, 211, 219,
 228.
 Michel, O. 202, 211.
 Micza, A. 46, 175.
 Miete 78.
 Müller, G. W. 23, 60, 63, 67, 69, 89,
 92, 93, 118, 166, 167, 191, 214, 244,
 263.
 Müller-Lübeck, K. 13, 61, 71, 83, 184,
 186, 211, 217, 228.
 Nienhold, J. 176, 177.
 Nowag, W. 70, 96, 190, 202, 219, 251,
 259, 265.
 Ott, A. 204.
 Partzsch, A. 97, 122, 143, 214, 229.
 Pascher, A. 259.
 Petersen, W. 188, 195.
 Pforte, W. S. 210.
 Pirani, M. 20.
 Plaß, O. 206.
 Plathner, W. 235.
 Prince, D. C. 63, 180, 218.
 Rachel, A. 157.
 Reinhardt, E. 84, 253.
 —, G. 70, 199, 211.
 Rißmüller, K. 157.
 Scheel, K. 20.
 Schenkel, M. 195, 197.
 Schilling, W. 206, 211.
 Schmer, K. 199.
 Schneider, F. 261.
 Schottky, W. 5.
 Schröter, F. 177.
 Schuhmacher, R. 61, 255.
 Schulze, E. 235.
 Seibt, G. 159.
 Siemens, A. 29, 50, 64, 65, 67, 72, 73,
 74, 96, 97, 143, 214.
 Späte 19.
 Steenbeck, M. 9, 76.
 Stöhr, M. 168, 190, 195, 203, 228, 233,
 258.
 Thompson, W. G. 141.
 Thury, R. 200.
 Toulon 165, 166.
 Tröger, R. 183, 194, 195, 199.
 Uhlmann, E. 231.
 Venzke, W. 260.
 Vogdes 63, 218.
 Voorhoeve, N. A. J. 211.
 Waibel, F. 148.
 Wechmann, W. 1, 195, 199, 252, 277.
 Weiß, F. 152.
 Wenzel, E. 157.
 Werner, O. 153, 247.
 Widmer 238.
 Winograd, H. 79, 211, 218, 235.
 Wologdin 158.

Sachverzeichnis

- Achterschaltung 188, 190, 196.
Alterung der Gefäße 86, 87.
Ammoniak als Prüfmittel 139.
Anheizzeit von Glühkathoden 57, 59.
Anlaßband 177.
Anodenarmform 68.
Anodendrosselspulen 106, 110, 111, 224.
Anodenfall 77.
Anodenmaterial 78.
Anodenschutz (Sicherungen, Schalter) 80, 84, 254.
Anodenschutzrohre (Hülsen) 67, 77, 129.
Anodentemperatur 79, 82.
Anregungsspannung 76.
Antiparallelschaltung 208.
Argon 48, 53.
Argongleichrichter 48.
Ausdehnungskoeffizient 18, 19, 21.
Ausheizanzapfungen 139.
Ausheiztemperatur 31, 140.
Ausheizzeit 31, 138.
Auswechseln der Glasgefäße 32, 101, 103.
Barometrische Messung 137.
Balkelitgleichrichter 147.
Barium 52, 143.
Baustoffe für Stromrichtergefäße 17, 18.
Begrenzungswiderstände im Gittersteuerkreis 122.
Betriebstemperatur 97.
Bewegliche Zündanode 42, 44, 45.
Bimetallzündung 45, 46.
Bleiborat 27.
Blindleistung 179, 187, 230.
Bremswiderstand 192.
Brennspannung 6, 56, 66.
Brennweite (Brenndauer) 212, 218, 220.
Charakteristik 110, 175.
Chromeisen 20, 99, 144.
Chromnickel 20.
Dämpfungssteuerung 174.
Dampfdrücke 3, 56, 132, 138.
Dampfströmung 68, 75.
Dichtigkeitsprüfung 139.
Diffusion von Wasserstoff 98, 140.
Diffusionspumpe 134.
Direkt geheizte Kathoden 52.
Dochtkathode 74.
Doppelumrichter 199.
Drosselspulen 106, 110, 112.
Edelgasgefüllte Glühkathodengleichrichter 51, 54.
Einschmelzmetalle 20.
Einsatzzylinder 91.
Eisen-Glühkathodengleichrichter 55.
Elastischer Umrichter 197.
Elektrolytgleichrichter 147.
Elektronengeschwindigkeit 7.
Elektronenkonzentration 78.
Elektronenröhren 5, 160.
Elektronentemperatur 75.
Emission 6, 59.
Entionisieren 8, 186.
Entladungsbahn 9.
Entstaubungsanlagen 6.
Entstörung von Gleichrichteranlagen 235.
Erregeranoden 9, 40, 127.
Erregerstrom 37, 38.
Erregerdrosselspulen 39.
Erregerlichtbogen 43.
Erregerspannung 39.
Erregerverluste 40.
Erregung 36, 127.
Erweichungstemperatur 18.
Federzündung 43.
Feinpumpe 135.
Fixierung des Kathodenflecks 74.
Flüssige Kathode 8, 35.
Flüssigkeitskühlung 89, 100.
Fremderregung 26, 127.
Fremdgase 66, 86.
Fremdkörper 138.
Frischwasserkühlung 250.

- Gasanreicherung** 88.
Gasreste 31.
Getterwirkung 86, 142.
Gewickelte Einschmelzung 23.
Gitter zum Schalten von Stromkreisen 204, 205, 207, 208, 209.
Gittergleichspannung 167.
Gitterleistung 166.
Gittermaterial 124.
Gitterschnellabschaltung 67, 256.
Gitterspannung 124, 165.
Gitterstrom 122, 166.
Glassorten 20.
Glättungswirkung von Drosselspulen 13, 113, 234, 236.
Gleichrichterschaltungen 13.
Gleichstrommotorantriebe 192, 201, 202.
Glimmentladung 9, 64, 79, 177.
Glimmgleichrichter 158.
Glockenanode 51, 58.
Glühkathoden 4, 50, 52.
Glühofen 30.
Graetzschaltung 153, 183.
Graphit 17, 78.
Grenzstrom 67.
Gütezahl der Trockengleichrichter 148.
Gummidichtung 24.
Gummischläuche für Wasserkühlung 97, 128.
Handschweißreste 31, 137.
Härtegrade des Kühlwassers 251.
Heizanzapfungen 139.
Hirschhornsalz 147.
Hochspannungsgleichrichter 147, 157, 159.
Hochspannungsschaltanlagen 253.
Hochspannungsstoßzündung 31, 47.
Hochvakuumgleichrichterröhren 1, 2, 161.
Hochvakuumpumpe 30, 127, 133.
Hüllkurvenumrichter 196, 199.
Ignitronzündung 48, 49.
Indirekt geheizte Kathoden 53.
Induktionsregler 124, 166.
Innenkühler 68, 127.
Ionentemperatur 75.
Ionisationsvorgang 6.
Ionisierungsspannung 76.
Ionenwolke 161.
Joubertscheibe 63.
Kappeneinschmelzungen 21, 23.
Kathodenfleck 9, 73, 131.
Kathodenflecktemperatur 73.
Kathodenkühlung 96.
Kohlendioxyd 141.
Kohlenoxyd 141.
Kombinierte Luft- und Flüssigkeitskühlung 93.
Kommutierung 13, 187, 215.
Kommutierungskondensator 185.
Kondensationsvorgang 73.
Kontraktionszündung 46.
Kreislaufprozeß 75.
Kreuzschaltung 188, 190, 196.
Kritische Spannungen 56, 122, 163.
Kritischer Strom 220.
Kühlraum 68, 94, 127.
Kühlfluchteinschaltung 114.
Kühlluftführung 89, 90, 97, 99, 143, 249.
Kühlluftmenge 90.
Kühlluftregulierung 114, 115, 116.
Kühlluftüberwachung 116.
Kühlung der Eisengleichrichter 96, 98, 99.
Kühlung der Stromrichtergefäße 88.
Kühlwasserbehälter 94, 127.
Kühlwasserbeschaffenheit 251.
Kühlwassermenge 96.
Künstliche Luftkühlung 88, 89, 151, 152.
Kupferoxydulgleichrichter 148.
Kurzschlußfestigkeit 84.
Kurzschlußschnellabschaltung 255.
Kurzschlußstrom 53, 85, 257, 269.
Lastabhängige Kühlluftregulierung 114, 115.
Lastschalter 119, 123.
Lebensdauer der Stromrichtergefäße 21, 85.
Lebensdauer der Trockengleichrichter 150.
Leistungsaustausch in Netzen 183, 188, 200.
Leistungsfaktor 179, 187, 228, 230.
Leistungsgrenzen der Stromrichtergefäße 68.
Leistungssteigerung 71.
Leonardbetrieb 191, 202.
Leuchterscheinung 77, 87.
Lichtbogenführung 67.
Lichtbogenverlust 5, 56, 69, 72.

- Lichtsäule 77.
 Löschkondensator 180.
 Löschung des Lichtbogens 179, 181.
 Luftführungsrohr 91.
 Luftleere 21, 85, 139.
 Magnesium 143.
 Magnetische Kopplung von Drossel-
 spulen 112, 113.
 Mechanische Stromrichter 146.
 Mehrstufige Hochvakuumpumpe 133.
 Messung der Überlastbarkeit 80, 81.
 Messung des Lichtbogenverlustes 69, 70.
 Messung des Rückstromes 64.
 Metallische Stromeinführung 19.
 Mikalexichtung 26.
 Minimalstrom 12, 37, 73.
 Molybdän-Glasverschmelzung 23.
 Negativer Temperaturkoeffizient 60.
 Negative Vorspannung 169, 171, 173,
 178.
 Netzgeführter Wechselrichter 183, 185.
 Neutraler Hg-Dampfstrahl 69.
 Niederspannungsschaltanlagen 253.
 Nullpunktspannungsregulierung 120,
 122.
 Oberwellen 213, 228, 229, 236.
 Ölkühlung 71, 92, 93.
 Oxydkathode 51.
 Oxydkathodentemperatur 53.
 Parallelschaltung von Stromrichtern
 106.
 Phasendreher (Schieber) 124, 166.
 Phasenschieberkondensatoren 179, 231.
 Photozelle 204, 206.
 Pilzanode 51.
 Pincheffekt 46.
 Planung 241.
 Positive Ladungsträger 7.
 Preßdichtungen 21, 132.
 Protonen 100.
 Pufferbetrieb 247.
 Quarzringe 131.
 Quetschfuß 23.
 Quecksilber (Eigenschaften des) 78, 79.
 Quecksilberdampfgeschwindigkeit 73.
 Quecksilberdichtung 25.
 Quecksilbergefüllte Glühkathoden-
 gleichrichter 55, 56.
 Quecksilberstrahlgleichrichter 146.
 Quecksilberverbindungen zur Dichtig-
 keitsprüfung 139.
 Raumanordnung der Stromrichter-
 anlagen 270.
 Raumladung 5, 9, 78, 160, 162.
 Regelung der Gleichspannung 119,
 122, 175.
 Reinigen der Vakuumgefäße 31, 137.
 Reinigungsflächen 131.
 Resonanzzündung 47.
 Restgase 31.
 Röhrensockel 58.
 Rotationszündung 50.
 Rückkühler 252.
 Rückschlagventile 135.
 Rückstrom der Trockengleichrichter
 149.
 Rückstromhöhe 63.
 Rückstrom in Stromrichtergefäßen
 60.
 Rückstromkurve 63, 64, 65.
 Rückstromschalter 254.
 Rückzündungen 32, 57, 60.
 Rückzündungsgrenzen 60.
 Saugdrosselspule 219.
 Sättigungsstrom 5.
 Sauerstoff 141.
 Saugleistung der Hochvakuumpumpe
 133.
 Schalter an Stromrichtern und Anlagen
 117, 254.
 Schieberölpumpen 134.
 Schnellschalter 84, 254.
 Schraubenlüfter 91.
 Schutz der Stromrichter beim Ausfall
 der Kühlung 117, 264.
 Schutzschilder vor den Anoden 67.
 Schweißgleichrichter 151.
 Schweißmaschinenschaltungen 207,
 208.
 Schwenktransformatoren 214.
 Schwingungen im Transformatorkreis
 66.
 Sekundäre Kühlkammer 68.
 Seelengleichrichter 148.
 Selbsterregter Wechselrichter 181.
 Selbsttätige Batterieladung 243, 245,
 247.
 Selbsttätige Gleichrichteranlagen 259,
 261, 265, 268.
 Siparlinge 131.
 Spannungsabfall in Stromrichteran-
 lagen 110, 217.
 Spannungskennlinien 175.

Spannungsregulierung an Stromrichtern 119, 122, 175, 225.
 Spannungsteilung in Dreileiteranlagen 257.
 Sparumspanner 226.
 Sperrschichten 148.
 Sperrspannung an Trockengleichrichtern 150.
 Spiegelbelag an Röhren 142.
 Spritzzündung 50.
 Sprungwellen 66.
 Starrer Umrichter 197.
 Steile Gitterspannung 163, 169, 172, 173.
 Steuerkreisgleichrichter 173.
 Stickstoff 141.
 Stifteinschmelzungen 21.
 Störspannung 236.
 Stoßsteuerung 171.
 Strahlungsschutz 53.
 Straßenbeleuchtung 205.
 Strömung von Wasserstoffionen durch Eisen 98, 99.
 Strombelastungen in Bahnnetzen 266.
 Strombremsung 190.
 Stromkennlinien 175.
 Stromrichterarten 1.
 Stromrückgewinnung bei Motorbetrieben 192, 193.
 Stromrückgewinnung in Bahnanlagen 189.
 Stromteilerdrosselspulen 111.
 Stromtor 58.
 Stromverlauf in Stromrichtern 15.
 Stufenschalter 120, 122, 123.
 Sulfid 148.
 Synchronumlaufende Kontaktwalzen 170, 197, 198, 208.
 Temperatur der Anoden 79.
 Temperatur der Elektronen 75.
 Temperatur der Gefäße 82, 83.
 Temperatur der Ionen 75.
 Temperatur des Kathodenflecks 73, 79.
 Temperaturregler 251.
 Thoriumzusatz 51.
 Thyatron 58.
 Topfanode 51.
 Transformationspunkt 21.
 Transformatorberechnung 213, 223.
 Trockengleichrichter 148.
 Übergang von einer Glimmentladung zur Bogenentladung 62, 65.
 Überlappungswinkel 184, 215, 217, 220.
 Überlastbarkeit der Stromrichter-
 gefäße 57, 80, 138.
 Überlastungsarten 138.
 Überspannungen 192.
 Umkehrbetriebe 190, 202.
 Umlaufwasserkühlung 251.
 Umrichter 194.
 Universalumrichter 195.
 Unterdruck im Lichtbogenweg 69.
 Ursache der Rückzündungen 62.
 Vagabundierende Ströme 97.
 Vakuumerhaltung 140.
 Vakuumkontrolle 32.
 Vakuummeßanordnung 128, 135, 137, 264.
 Vakuumzwischenbehälter 128.
 Ventilwirkung 3, 4.
 Verdampfte Quecksilbermenge 68, 73.
 Verlagerungsgitter 173.
 Versagen der Ventilwirkung 60.
 Verschiebungsfaktor 228.
 Verzerrungsfaktor 228.
 Verzögerungseinrichtungen für den Anodenstrom 60.
 Voltgeschwindigkeit 76.
 Vorvakuumraum 134.
 Wärmeausdehnung 18.
 Wärmestrahlungsverlust 96.
 Wasseraustrittstemperatur 96.
 Wasserdampf 141.
 Wassereintrittstemperatur 96.
 Wasserstofffreie Kühlflüssigkeiten 100.
 Wasserstoffhaut 142, 148.
 Wasserstoffionen 98.
 Wechselrichterarten 180.
 Wechselstrommotoren 195, 203.
 Wehneltoxydkathode 51, 176.
 Werkstoffprüf. m. Stromrichtern 209.
 Wiesentalbahn 199.
 Wirkungsgrad 71, 150, 237, 238.
 Wirtschaftlichkeitsberechnung 241.
 Wolfram 20.
 Zündanode 43.
 Zündeinsatz 164, 180.
 Zündeinsatzverschiebung 164, 178.
 Zündfinger 44.
 Zündkennlinie 163, 173.
 Zündspannung 70.
 Zündung 8.
 Zündungsarten 35.
 Zweispannungsumrichter 199.
 Zwölfphasengleichrichter 13, 213.