

Taschenbuch für Fernmeldetechniker

Von

Hermann Goetsch

Oberingenieur

Mit 1222 Abbildungen im Text

Neunte unveränderte Auflage



München und Berlin 1942
Verlag von R. Oldenbourg

Copyright 1925 und 1938 by R. Oldenbourg, München und Berlin

Druck von R. Oldenbourg, München

Printed in Germany

Vorwort zur 8. Auflage.

Das Taschenbuch soll dem Studierenden immer ein nützlicher Ratgeber bei dem ersten Zurechtfinden in der Technik des Fernmeldewesens sein. Durch die Beschreibung einer Vielzahl von Geräten und Schaltungen sollen dem Leser möglichst alle Mittel und Methoden erläutert werden, die heute dem Ingenieur zum Aufbau von zweckmäßigen Fernmeldeanlagen zur Verfügung stehen. Das Taschenbuch ist stets bemüht, dem Studierenden einen jeweils kurzen Überblick über die Grundelemente der feinmechanischen Apparatechnik, der Vermittlungs-, der Leitungs- und der Meßtechnik zu geben. Das in den Fußnoten angezogene Schrifttum soll den weiteren Weg weisen; es ist deshalb angestrebt worden, nur leicht zugängliche Schriften anzuführen und unter diesen vornehmlich solche, die wiederum recht viele weitere Schrifttumshinweise enthalten und dabei oft einen Gesamtüberblick über den Stand der Technik eines Gebietes geben.

Diese Gesichtspunkte waren auch bei der Bearbeitung der vorliegenden 8. Auflage des Taschenbuches maßgebend, die wieder zahlreiche Verbesserungen und Ergänzungen enthält. Einige Abschnitte mußten grundsätzlich umgearbeitet, andere, veraltete gestrichen und einige neue hinzugefügt werden.

H. Goetsch.

Auszug aus dem Vorwort zur 1. Auflage.

Die leicht faßliche Form des Inhaltes wurde gewählt aus der Erwägung heraus, daß ein großer Teil der in der Fernmeldetechnik tätigen Ingenieure oder Techniker aus der Praxis hervorging und der Mehrzahl neben den beruflichen Pflichten keine Gelegenheit gegeben ist, aus der umfangreichen Fachliteratur das Wesentliche herauszuschälen und zu verwerten.

Das vorliegende Taschenbuch soll eine Lücke in der Fernmelde-Literatur insofern ausfüllen, als es in knapper Form neben der Telegrafie und dem Fernsprechwesen fast alle Gebiete der Fernmeldetechnik umfaßt. Bei der Auswahl der Abbildungen ist nach Möglichkeit davon abgesehen worden, äußere Ansichten von Geräten zu bringen, da diese den Studierenden, der sich über die Praxis des Fernmeldewesens unterrichten will, sowie den Techniker oder Installateur zumeist weniger interessieren. Von Wichtigkeit ist vielmehr der schaltungstechnische Aufbau, der Grundgedanke des Gerätes.

Durch diese auch in pädagogischer Hinsicht sorgfältig getroffene Auswahl der Abbildungen und die Kürze des Textes dürfte es wohl gelungen sein, den verfügbaren knappen Raum nutzbringend auszufüllen. Der Stoff ist außerdem so gegliedert worden, daß das Taschenbuch insbesondere dem Praktiker beim systematischen Studium auch als kurzgefaßtes Lehrbuch dienen kann.

1925.

H. Goetsch.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Vorwort zur 8. Auflage und Auszug aus dem Vorwort zur 1. Auflage	III u. IV
Einleitung	1

Erster Teil.

I. Theoretische Grundlagen	
a) Magnetismus	2
b) Elektromagnetismus	5
1. Neutrale und gepolte Elektromagnete	6
2. Bifilare und differentiale Wicklungen	7
c) Der elektrische Strom und die Gleichstromgesetze	8
1. Die Grundeinheiten und das Ohmsche Gesetz	8
2. Der elektrische Widerstand	10
3. Der Spannungsabfall	16
4. Gesetze der Stromverzweigungen	18
5. Die Stromwärme	19
d) Induktion	19
1. Selbstinduktion	23
2. Wirbelströme	25
3. Drosselspulen	25
e) Der Wechselstrom	26
f) Elektrostatik	30
g) Kondensatoren	31
h) Wechselstromkreis mit Selbstinduktion und Kapazität	33
II. Stromquellen der Fernmeldetechnik	
a) Die primären oder galvanischen Elemente	
1. Das Beutelement	36
2. Das Trockenelement	37
3. Taschenlampenbatterien	38
4. Luftsauerstoffelement	38
5. Schaltungen von Elementen	39
6. Leistung der Elemente	41
7. Berechnung der größten nutzbaren Stromstärke	41
b) Akkumulatoren oder Sammler	
1. Der Blei-Akkumulator	43
2. Aufbau des Akkumulators	44
3. Spannung und Kapazität	47
4. Anwendung der verschiedenen Plattenarten	48
5. Betrieb	49

	Seite
6. Aufstellung der Batterien	51
7. Stahl-Zellen	54
8. Gegenzellen	56
c) Gleichrichter, Glimmröhren und Stromrichter	
1. Elektrolytische Gleichrichter	57
2. Quecksilberdampf-Gleichrichter	58
3. Glühkathoden-Gleichrichter	63
4. Das Glimmrelais	64
5. Die Glimmlampe	65
6. Stromrichter	68
7. Trockengleichrichter	70
8. Umformer	73
d) Ladeeinrichtungen	
1. Ladegeräte mit Glühkathoden-Gleichrichter . . .	76
2. Ladegeräte mit Trockengleichrichter	77
3. Trockengleichrichter für mittelbare Speisung aus dem Netz	78
4. Spannungsgleichhalter	80
5. Signalgerät für Ladeeinrichtungen	80
6. Pöhler-Schalter	81
e) Wechselrichter und andere Wechselstromquellen	
1. Wechselrichter und Umrichter	81
2. Polwechsler	83
3. Der Summer	85
4. Schwingungserzeuger nach dem Kippverfahren . .	86
5. Relaisunterbrecher	86
6. Klingeltransformatoren	87
III. Anruf- und Signalgeräte	
a) Gleichstromwecker	88
b) Wechselstromwecker	91
c) Motorwecker	93
d) Elektrische Hupen und Sirenen	94
IV. Relais	
a) Relais für Signalanlagen	
1. Zeitrelais mit Hitzdrahtspule	98
2. Zeitrelais mit Pendel	99
3. Zeitrelais mit Windfang	99
4. Zeitrelais mit Schrittschaltwerk	100
5. Relais mit Kupferdämpfung	101
6. Relais mit Trockengleichrichter	102
7. Relais für Summerströme	103
8. Frequenzrelais (Resonanzrelais)	103
9. Kleinrelais für Gleich- und Wechselstrom	104
10. Das Flachrelais für Starkstrom	105
11. Das Fallklappenrelais	106

	Seite
12. Das Doppel-Fallklappenrelais	108
13. Relais mit Quecksilberkontakt	109
14. Relais mit Vakuumkontakt	109
b) Relais für Telegrafenanlagen	
1. Schnelltelegraf-Relais	111
2. Gepoltes Dosenrelais	113
3. Gepoltes Flachrelais	114
4. Neutrales Flachrelais	115
5. Das gepolte Siemens-Carpenter-Relais	116
6. Telegraf-Modler	118
c) Relais für Fernsprechanlagen	
1. Relaisberechnung	120
2. Erwärmung der Relais	125
3. Das Phasenrelais für Wechselstrom	125
4. Kontaktveränderungen und Funkenlöschung	127
5. Relaisprüfgerät	127
V. Stromkreise und Schaltungen	129

Zweiter Teil.

Die Signaltechnik.

I. Klingelanlagen	
a) Schaltungen	133
b) Optische Anrufergeräte für Ruftafeln	134
c) Relais für Klingelanlagen	136
II. Elektrische Lichtrufanlagen	137
III. Elektrische Wasserstand-Fernmelder	
a) Voll- oder Leermelder	146
b) Voll- und Leermelder	146
c) Melder für fortlaufende Anzeige mit Schwimmer	148
d) Registriergerät für Wasserstand-Fernmelder	151
e) Wasserstand-Fernmelder für Feinablesung	152
f) Wasserstand-Fernmelder ohne Schwimmer	154
g) Wasserstand-Fernmeldeanlagen mit Relais-Betrieb	154
h) Wasserstand-Fernmeldeanlagen mit Wechselstromsystemen	155
i) Wasserstand-Fernmeldeanlagen: Einfachleitungs-Betrieb	155
k) Selbsttätige Pumpen-Fernsteuerungen	156
l) Leitungsführung und Batteriebemessung	156
IV. Wassermesser mit Fernmeldeeinrichtung	158
V. Elektrische Temperaturfernmessung	
a) Elektrische Widerstands-Fernthermometer	161
b) Thermoelektrische Pyrometer	163

	Seite
VI. Elektrische Raumschutz- und Kassensicherungs- geräte	
a) Das Tresorpendel	165
b) Kassensicherungsapparat System W. Blut	168
c) Geräuschmeldeanlagen	169
d) Optischer Raumschutz	169
VII. Elektrische Türverriegelung	172
VIII. Elektrische Rauchgasprüfer	173
a) CO ₂ -Messung	173
b) CO-Messung	174
IX. Elektrisches Fernmessen	
a) Impulsfrequenzverfahren	176
b) Stromzeit-Impulsverfahren	177
X. Geräte zur Anzeigen- und Befehlsübermittlung	179
a) Anzeige-Apparate mit sinnbildlicher Darstellung . .	181
b) Signalgeräte für besondere Zwecke	
1. Elektrische Umdrehungsfernzeiger	181
2. Elektrische Wendetafeln	182
3. Leuchtwechselzahlen	184
4. Schießstand-Fernanzeiger	185
XI. Elektrische Fernsteueranlagen	
a) Fernsteuerung mit synchron umlaufenden Verteilern	186
b) Fernsteuerung mit Wählern	189
c) Fernüberwachungsanlagen	193
XII. Verkehrssignalanlagen	195
XIII. Elektrische Straßenbahn-Signalanlagen	204
XIV. Eisenbahn-Signalanlagen	
a) Elektrische Zugabrufer	206
b) Elektrische Zugfolgeanzeiger	209
c) Vorläute-Einrichtung	213
d) Strecken-Läutewerke	214
e) Selbsttätige Warnläutewerke	217
f) Registriergeräte zur Messung der Fahrgeschwindigkeit von Zügen	217
1. System Siemens & Halske	218
2. System Wetzler	220
XV. Eisenbahn-Blockanlagen	
1. Die Blockstrecke	224
2. Der Blockapparat	225
3. Das Blockfeld	226
4. Zusammenschaltung von Anfang- und Endfeld	230
5. Zugfahrt durch mehrere Blockstrecken	230
6. Die Blockabhängigkeit	231

	Seite
7. Die Hilfsklinke	232
8. Der Verschlußwechsel	233
9. Elektrische Signalfügelkuppelung	233
10. Gleisstromkreise auf Bahnhöfen	235
11. Der selbsttätige Streckenblock	236
XVI. Grubensignalanlagen	
a) Wasserdichte Apparate	240
b) Einfache Schachtsignalanlagen	243
c) Streckensignalanlagen	245
d) Optisch-akustische Signalanlagen	246
e) Signaleinrichtung für Gefäß-Förderanlagen	252
f) Torkontakte	255
g) Leitungsanlagen in Bergwerken	256
XVII. Elektrische Feuermeldeanlagen	
a) Einfache Feuermelder	258
b) Das Zeigerapparatsystem	260
c) Mannschaftsalarm	265
d) Morse-Schaltung	266
e) Morsesicherheitsschaltung	266
f) Selbsttätige Feuermelder	270
g) Gefahrmelder für Transformatoren	274
h) Feuermelde- und Wächterkontrollapparat	275
XVIII. Fernmeldeanlagen für den Luftschutz	
278	
XIX. Elektrische Uhrenanlagen	
a) Einführung	282
b) Hauptuhren	284
c) Betrieb von Nebenuhren	285
d) Nebenuhrwerke	286
e) Schaltungen von Uhrenanlagen	288
f) Schlagwerke	292
g) Nebenuhr als Turmuhr	293
h) Die „Onogo-Uhr“	295
i) Der selbsttätige Zeitensager	298
k) Das Zeitsignal im Eisenbahnbetriebe	300
l) Synchronuhren	302

Dritter Teil.

Die Telegrafentechnik.

Einleitung	306
I. Schreibtelegrafen mit symbolischer Schrift	
A. Morsetelegrafie	
a) Entwicklung	312
b) Das Morsealphabet	313

	Seite
c) Der Normalfarbschreiber	313
d) Zubehörteile	316
1. Morsetaste	316
2. Der Stromfeinzeiger	316
3. Blitzableiter	317
e) Klopfer	318
f) Selbstauslösung von Morsewerken	318
g) Morsesätze	319
h) Betriebsarten für Einfachstrom	320
i) Morse-Direktschreiber und Lokalschreiber	322
k) Übertragungsschaltungen	323
l) Morse-Telegrafie mit Doppelstrom	324
m) Telegrafenumschalter	326
B. Schnellmorse-Telegrafie	329
a) Wheatstone-Schnellmorse-Telegraf	329
1. Wheatstone-Locher	330
2. Wheatstone-Sender	332
3. Wheatstone-Empfänger	333
b) Siemens-Schnellmorsegerät	333
C. Apparate für Kabeltelegrafie	335
a) Allgemeines	335
b) Der Heberschreiber	336
c) Der Undulator von Lauritzen	338
d) Siemens-Drehspul-Schnellschreiber	338
e) Siemens-Kabel-Sender	340
 II. Drucktelegraphen (Typendrucker)	
A. Reihentelegraphen	
a) Der Hughes-Typendrucker	341
b) Der Ferndrucker von Siemens & Halske	352
c) Der Siemens-Schnelltelegraf	354
B. Wechselzeitige oder absatzweise Mehrfachtelegrafie .	361
Der Baudot-Apparat	363
 III. Die Fernschreibtechnik	
A. Springschreiber und Fernschreiber	
a) Der Siemens-Tasten-Schnelltelegraf	371
b) Der elektrische Fernschreiber	374
c) Der mechanische Fernschreiber	380
1. Der Tastensender	381
2. Der Empfänger	386
B. Vermittlungseinrichtungen und Hilfsapparate	
a) Selbsttätiger Ein- und Ausschalter	392
b) Der Namengeber	394

	Seite
c) Vermittlungszentralen	396
1. Handbediente Fernschreibzentralen	398
2. Rundschreib- und Konferenzschaltungen	405
3. Fernschreibzentrale mit Wählerbetrieb	407
IV. Abtast-Telegraphen	
a) Die Siemens-Hell-Fernschreibtechnik	411
Siemens-Hell-Feldfernreiber	418
b) Der Frequenz-Schreiber	422
c) Die Bildtelegrafie	423

Vierter Teil.

Die Fernsprechtechnik.

Einleitung

I. Einzelapparate für Fernsprechstellen	
a) Fernhörer	430
b) Mikrofone	433
c) Direkte und indirekte Schaltung	436
d) Übertrager und Abzweigspulen	440
e) Drosselspulen	441
f) Haken- und Gabelumschalter	442
g) Induktoren	442
h) Kondensatoren	446
II. Schaltungen von Fernsprechstellen	450
III. Linienwähler	457
IV. Einzelteile der Zentraleinrichtungen	
a) Anruforgane	463
b) Schlußzeichen	466
c) Klinken, Stöpsel und Schnüre	466
V. Zentrale Fernsprechvermittlungseinrichtungen	
a) Schnurloser Klappenschrank	471
b) Drehschalterschränke	472
c) Zentralumschalter mit Schnurverbindung	474
VI. Vielfachschaltungen und Fernsprechämter	479
VII. Selbsttätige Fernsprechanlagen	
Wähleranlagen	
a) Grundbegriffe	488
b) Nummernschalter	490
c) Wähler	492
d) A-B-X-Schaltung mit Drehwählern	498
e) Wählerzentrale für 100 Teilnehmeranschlüsse	500
f) A-B-X-Schaltung mit Hebdrehwählern	501
g) Vorwähler	505
h) Schleifensystem mit Vorwählern ohne Steuerschalter	508
i) Tausender-System	512
k) Schaltung eines Tausender-Systems	515
l) Zehn- und Hunderttausender-Systeme	520

	Seite
m) Anordnung der Vielfachfelder und Verbindungsleitungen in Wähleranlagen	520
1. Vollkommenes, geradliniges Bündel mit 10 Ausgängen	522
2. Gemischte Bündel	523
3. Doppelte Vorwahl	526
VIII. Die Nebenstellentechnik	
a) Die Fernsprechordnung	526
1. Gebühren	528
2. Querverbindungen und Grundstücksbezeichnung	528
3. Verbindungsmöglichkeiten	529
b) Nebenstellenanlagen mit Hausstellen	530
c) Reihenanlagen	
1. Reihenanlagen mit Druckknopf- oder Hebellinienwähler für den Innenverkehr	532
2. Reihenanlagen mit Wählereinrichtung für den Innenverkehr	535
d) Parallelschaltanlagen	537
e) Rückfrage-Einrichtungen	541
f) Zwischenstellen-Umschalter	544
g) Handbediente Nebenstellen-Zentralumschalter	550
1. Nebenstellenumschalter mit Schnurvermittlung	550
2. Schnurloser Glühlampenschrank	553
h) Wähler-Nebenstellenanlagen	554
1. Relaiszentralen	555
2. Drehwähler-Zentralen	566
IX. Fernsprechnetze	
a) Allgemeines	574
b) Verbindungsleitungen der Handämter	575
c) Fernverkehr	578
d) Netzgestaltung im Wählersystem	579
e) Fernwahl	579
1. Gleichstromfernwahl	579
2. Wechselstromfernwahl	580
3. Stromstoßübertragung	581
4. Fernwahl mittels Tonfrequenz	581
X. Linienfernsprecher oder Fernsprechanlagen mit wahlweisem Anruf	
a) Einführung	582
b) Zugmeldesystem	583
c) Gleichstromsysteme mit Erde	586
d) Wahlweiser Anruf nach dem Kurzschlußprinzip (Wechselstromwahl)	588
e) Wahlanrufsystem mit Wechselstrom ohne Zentrale	591

	Seite
XI. Fernsprechanlagen mit Schutz gegen Hochspannung	594
XII. Hochfrequenz-Übertragung über Hochspannungsleitungen	598
XIII. Lautfernsprecher und Lautsprecheranlagen	603
a) Lautfernsprecher ohne Verstärker	603
b) Lautsprecher und Großlautsprecher	605
c) Mikrofone für Übertragungsanlagen	606
1. Das Kondensatormikrofon	606
2. Das Bandmikrofon	609
3. Das Kristallmikrofon	609
XIV. Münzfernsprecher	610

Fünfter Teil.

Die Leitungstechnik.

I. Freileitungen	616
a) Bau der Freileitungen	616
b) Leitungsdrähte für Freileitungen	621
II. Kabel	
a) Allgemeines	626
b) Aufbau der Kabel	626
1. Fernsprechkabel	626
2. Breitbandkabel	629
3. Telegrafien- und Signalkabel	629
4. Zimmerleitungskabel, Systemkabel	630
5. Luftkabel	630
c) Verlegung der Kabel	631
1. Verlegung von Kabeln mit blankem Bleimantel	631
2. Verlegung bewehrter Kabel (Erdkabel)	636
d) Kabelendverschlüsse	637
III. Drähte und Schnüre	
a) Querschnitt und Widerstand von Leitungsdrähten	642
b) Gewicht und Widerstand von dünnen Kupferdrähten	643
c) Leitungen nach VDE-Normen. Schnüre. Rohrdrähte	644
IV. Telegrafien-Leitungstechnik	645
V. Vorgänge auf Telegrafienleitungen	648
VI. Fernsprech-Leitungstechnik	658
VII. Vorgänge auf Fernsprechleitungen	
a) Leitungskreuzungen	663
b) Kabelverseilung	666
c) Verzerrung und Dämpfung	666

	Seite
VIII. Verstärker und Verstärkerämter	
a) Elektronenröhre	675
b) Verstärker	682
c) Elektronenröhre als Schwingungserzeuger	685
d) Elektronenröhre als Gleichrichter	685
e) Fernsprechverstärker	686
f) Zweidrahtverstärker	688
g) Vierdrahtverstärker	690
IX. Mehrfachausnutzung von Leitungen	691
X. Kunstschaltungen in der Telegrafie	694
a) Gegenschreibschaltung für Einfachstrom	694
b) Schaltungen für Doppelstrom	696
c) Simultanschaltungen	697
d) Unterlagerungstelegrafie	702
e) Impulstelegrafie	706
f) Telegrafie mit Trägerströmen	708
1. Tonfrequenztelegrafie	709
2. Teilnehmer-Tonfrequenz-Telegrafie	710
3. Mittelfrequenztelegrafie	712
XI. Kunstschaltungen in Fernsprechleitungsnetzen	
a) Einleitung	712
b) Trägerfrequenz-Telefonie über Freileitungen	717
1. E ₁ -System	718
2. System M ₂ /M ₃	719
3. System T ₃	722
4. Pegelregelung	722
c) Trägerfrequenzsysteme für Fernkabelleitungen	723
1. L-System	723
2. S-System	724
3. Breitbandssysteme	724
d) Aufbau von Fernsprechverstärkern nach der Baukastenform	725
XII. Kunstschaltungen in der Signaltechnik	
a) Allgemeines	726
b) Uhrenbetrieb	727
c) Feuermelde- und Polizeimeldebetrieb	728
d) Feuermeldung über ein Wähler-Fernsprechamt	729
e) Zählerumschaltung	730
f) Luftschutz-Warnanlage	732

	Seite
XIII. Beeinflussung von Fernmeldeleitungen durch Starkstromleitungen	
a) Galvanische Beeinflussung	732
b) Elektrostatische Beeinflussung	733
c) Elektromagnetische Beeinflussung	734
d) Rundfunkstörerschutz	735
e) Korrosionen	736
XIV. Schutzeinrichtungen gegen Überstrom und Überspannungen	
a) Spannungsableiter	737
b) Stromsicherungen	739
c) Die Grobfeinstromsicherung	741
d) Sicherungseinrichtungen	742
e) Knallgeräuschschutz	744
Sechster Teil.	
Montage und Überwachung.	
I. Ausführung der Montagen	747
II. Messungen	754
a) Meßgeräte für Montage und Abnahmeprüfungen . .	755
Leitungsprüfer und Isolationsmesser	755
b) Elementprüfer	756
c) Messung kleiner Wechselströme	757
d) Messungen nach der Brückenmethode	757
1. Wheatstonesche Brücke	757
2. Kleine Meßbrücke für Gleich- und Wechselstrom .	758
3. Stöpselmeßbrücke für Widerstands- und Fehlerorts-	
messungen	759
4. Messung des Isolations- und Leitungswiderstandes	
an oberirdischen Leitungen	762
e) Grundsätzliches zu Wechselstrommessungen	763
f) Wechselstrommessungen und Meßgeräte	765
Der Oszillograph	776
Sachverzeichnis	780

Einleitung.

Die Fernmeldetechnik hat die Aufgabe, mit Hilfe der Wirkungen des elektrischen Stromes Signale von einer oder mehreren Geberstellen nach einer oder mehreren Empfangsstellen, die örtlich voneinander getrennt sind, zu übertragen.

Um die Vorgänge in Fernmeldeanlagen grundsätzlich zu begreifen, ist es erforderlich, die Wirkungen des elektrischen Stromes und des Magnetismus näher zu untersuchen und die Gesetzmäßigkeiten, die diesen Naturerscheinungen zugrunde liegen, soweit sie in Fernmeldeanlagen Anwendung finden, sich einzuprägen. Ferner ist es erforderlich, die Geräte, welche zur Erzeugung von elektrischen Strömen dienen, sowie Apparate, die diese Ströme und deren Wirkungen in der Fernmeldetechnik dienstbar zu machen gestatten, im Prinzip kennenzulernen.

Die Verbindung von Stromquellen mit Apparaten, die zur Wahrnehmbarmachung der Stromwirkungen dienen, wird als Schaltung bezeichnet. Der Fernmeldetechniker muß mit allen Teilen einer Schaltung: der Stromquelle, den Apparaten zur Wahrnehmbarmachung der Stromwirkungen, den Verbindungsleitungen und den Nebenapparaten, vollständig vertraut sein, um in der Lage zu sein, derartige Anlagen zu bauen, zu überwachen und Störungen in allen Teilen zu finden und zu beseitigen.

Da die Wahrnehmbarmachung des elektrischen Stromes meistens durch dessen elektromagnetische Wirkungen geschieht, sollen an erster Stelle die Erscheinungen des Magnetismus und Elektromagnetismus kurz erläutert werden.

Erster Teil.

I. Theoretische Grundlagen.

a) Magnetismus.

Permanente¹⁾ Magnete (Dauermagnete) werden meistens in Stab- oder Hufeisenform hergestellt. Magnetische Eigenschaften zeigt nur Eisen bzw. Stahl (Legierungen mit Eisengehalt). Die geringe Magnetisierbarkeit anderer Metalle hat zur Zeit nur physikalisches Interesse. Permanente Magnete sind magnetisierter Stahl²⁾. Weiches Eisen verliert sofort nach Aufhören der magnetisierenden Kraft seine Eigenschaft als Magnet fast restlos. Jeder Magnet hat einen Nord- und einen Südpol, die in der Nähe der Enden liegen.

Erfahrungsregel: Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an. Man nimmt an, daß ein Magnet in seiner Umgebung ein sog. magnetisches Feld³⁾ erzeugt und dauernd unterhält, und versteht darunter den Raum, innerhalb dessen der Magnet in merkbarer Weise magnetische Wirkungen äußert. Das Feld hat an jeder Stelle bestimmte Stärke und Richtung, was durch sog. Kraftlinien dargestellt wird. In Abb. 1 ist ein Magnet M der Übersichtlichkeit halber mit nur einigen Kraftlinien dargestellt. Die Kraftlinien treten stets am Nordpol N praktisch senkrecht zu den Magnetflächen aus und am Südpol S senkrecht ein. Die Dichte der Kraftlinien bezeichnet man als Feldstärke. Verlaufen Kraftlinien parallel und je Flächeneinheit in gleicher Zahl, so nennt man das Feld homogen, d. h. gleichmäßig.

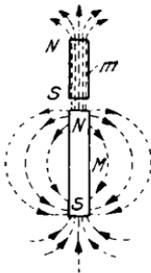


Abb. 1.

Bringt man in das Feld des Dauermagneten M ein Stück weiches Eisen m , so wird dieses unter der Wirkung des Kraftflusses ebenfalls zu einem Magneten, aber nur so lange, wie es der Wirkung dieses Feldes ausgesetzt ist. Diese Wirkung des Dauermagneten bezeichnet man als magnetische Induktion.

Zur Erklärung der magnetischen Induktion nimmt man an, daß im Eisen oder Stahl, sofern diese noch keine magnetischen Eigenschaften aufweisen, die einzelnen Elementarteilchen des Stoffes, auch Moleküle

¹⁾ Pieck, V. Permanent-Magnete in Theorie und Praxis. *Telegr.-Fernspr.-Techn.* 10, 1921, 14. — Würschmidt, J. Was wird vom Dauermagnet verlangt? *Elektr. Nachr.-Techn.* 10, 1925, 20—26.

²⁾ Kußmann, A., Stand der Forschung ferromagnetischer Werkstoffe. *Arch. Elektrotechn.* 29, 1935, 297—332. *Neue Werkstoffe f. Dauermagnete.* Z. VDI. 79, 1935, 1171—73.

³⁾ Kußmann, A., Permanent-magnetisches Feld. *ETZ* 48, 1937, 511

genannt, winzig kleine Magnete darstellen, die ganz regellos gelagert sind (Abb. 2). Erst durch Einwirkung der magnetisierenden Kraft werden die Teilchen geordnet (Abb. 3), so daß alle gleichnamigen Pole sich gegenseitig unterstützen, nach der gleichen Richtung weisen und nach außen die Wirkung von Magneten hervorbringen. Zerbricht man einen Magneten in zwei Teile, so erhält man zwei Magnete mit je einem Süd- und einem Nordpol. Zwei mit ungleichnamigen Polen aneinandergefügte Magnete ergeben einen Magneten mit einem Süd- und einem Nordpol

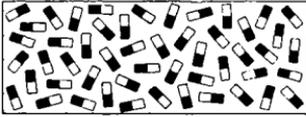


Abb. 2.

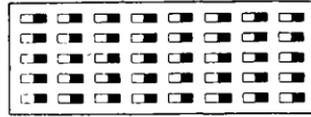


Abb. 3.

an den Enden. Legt man zwei Magnete mit den gleichnamigen Polen aneinander (Abb. 4), so erhält man einen Magneten mit zwei gleichnamigen Polen an den Enden und einem gemeinsamen Pol an der Stelle, wo die Magnete zusammengefügt sind*).

Die Kraft, mit der der Magnet (Abb. 1) das Stück Eisen m , das durch Induktion nun auch zum Magneten geworden ist, anzieht, kann nach einem experimentell gefundenen, später theoretisch begründeten Gesetz berechnet werden. Nach diesem Gesetz ist die Kraft proportional dem Produkt der aufeinanderwirkenden magnetischen Mengen M und m und umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung:

$$\text{Kraft} = \frac{M \cdot m}{r^2},$$

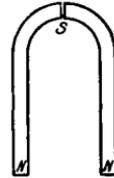


Abb. 4.

wenn r die Entfernung bedeutet. Diesem Gesetz sei nur entnommen, daß die Kraft der Anziehung bzw. Abstoßung umgekehrt mit dem Quadrat der Entfernung wächst bzw. abnimmt. Wird die Entfernung beispielsweise auf die Hälfte verringert, so wächst die Kraft auf das 2×2 fache, d. h. auf das Vierfache; wird die Entfernung auf den dritten Teil verringert, so wächst die Kraft auf das 3×3 fache, d. h. auf das Neunfache des ursprünglichen Wertes usw. Aus Abb. 1 ist noch zu ersehen, daß ein Stück Eisen im Feld eines Magneten so induziert wird, daß dem Südpol immer ein Nordpol gegenüberliegt und umgekehrt, Eisen hat die größte Durchlässigkeit für magnetische Kraftlinien. Infolgedessen bevorzugen die Kraftlinien den Weg durch das Eisen. Die Kraftlinien werden im Eisen gewissermaßen verdichtet. Das Verhältnis der Kraftliniendichte im Eisen zu der in der Luft dient als Maß für die magnetische Durchlässigkeit oder Permeabilität¹⁾ des Eisens. Bezeichnet man die Anzahl Kraftlinien je Quadratzentimeter in der Luft

*) Diese Anordnung ist als Magnetsystem bei einigen gepolten Weckern verwendet worden.

¹⁾ v. Auwers, Anfangspermeabilität wichtiger Legierungen. Helios F. Lpz. 33, 1927, 67—71.

und im Eisen mit H bzw. B , so ist die Permeabilität $\mu = \frac{B}{H}$ oder $B = \mu \cdot H$. Die Kraftliniendichte B im Eisen bezeichnet man auch kurz als Induktion und H als magnetisierende Kraft.

Nimmt man ein Stück unmagnetisches Eisen bzw. Stahl und unterwirft dieses einer magnetisierenden Kraft, indem man H von dem Werte 0 (Abb. 5) bis zu einer gewissen Stärke h steigert, so wächst die Kraftliniendichte (Induktion) B im Eisen oder Stahl von 0 bis zu einem Wert $0 - m$. Das Anwachsen von B geht bei der ersten Magnetisierung nach der sog. jungfräulichen Magnetisierungskurve $0 - a$ vor sich. Beim Abnehmen der magnetisierenden Kraft von h bis auf 0 zurück findet die Abnahme von B nicht in demselben Verhältnis zu H statt, wie beim Anstieg, sondern viel langsamer. Es erreicht B bei $H = 0$ nicht ebenfalls den Wert 0, sondern den Wert b . Dieser Rest $0 - b$ wird als Remanenz bezeichnet. Die Remanenz ist um so größer, je

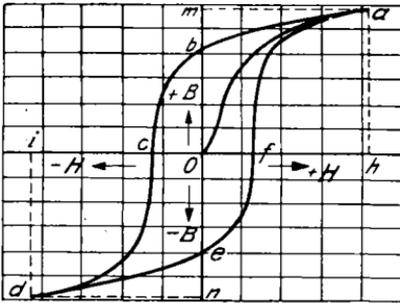


Abb. 5.

härter der Stahl ist. Weiches, ausgeglühtes Eisen hat verhältnismäßig wenig Remanenz und wird deshalb für Relaiskerne und Elektromagnete verwendet. Magnetisiert man nun dasselbe Eisen mit einer entgegengesetzt gerichteten magnetisierenden Kraft ($-H$), so wird $B = 0$, nachdem $-H$ den Wert c erreicht hat. Bei weiterer Vergrößerung von $-H$ bis zum Werte $-H = i$ steigt $-B$ nach

der Linie $c - d$ bis zum Werte n . Geht daraufhin $-H$ auf 0 zurück, so verbleibt wiederum der remanente Magnetismus $0 - e$. Die schleifenartige Kurve schließt sich von e über f nach a , wenn H von 0 bis $0 - h$ im positiven Sinne gesteigert wird. Jede Ummagnetisierung verursacht (bei Transformatoren, Induktionsspulen) Energieverluste, die als Hystereseverluste bezeichnet werden und um so größer sind, je breiter die Hysterese-schleife $a - b - c - d - e - f$ bei $c - f$ ist.

Bei weichem Eisen kann der Hystereseverlust noch dadurch verringert werden, daß man dem Eisen etwa 4 vH Silizium beimengt.

Dauermagnete dürfen nicht geklopft oder stark erschüttert werden, weil sie hierdurch an Stärke verlieren. Gewaltiges Ankerabreißen wirkt nicht immer schädlich auf den Dauermagneten. Bringt man einen Dauermagneten zum Glühen, so verliert er seine magnetischen Eigenschaften vollständig. Werden Dauermagnete längere Zeit gelagert, so ist der magnetische Kreis nach Möglichkeit durch einen Eisenanker zu schließen. Der für Dauermagnete verwendete Stahl¹⁾ wird mit verschie-

¹⁾ Gosselin, J. H., Verbesserung der im Telegraf- und Fernsprech-wesen verwendeten Elektromagnete. Telegr.-Fernspr.-Techn. 14, 1925, 199. — Jellighaus, W., Neue Legierungen mit hoher Koerzitivkraft. Z. techn. Phys. 17, 1936, 33—36.

denen Stoffen (Chrom, Cobalt, Nickel, Wolfram) legiert, wodurch der Stahl mehr remanenten Magnetismus behält. Die Kraft des Stahles, remanenten Magnetismus zu halten, nennt man Koerzitivkraft (Strecke $0 - c$ bzw. $0 - f$; Abb. 5). Folgende Zahlentafel gibt einige Durchschnittswerte für verschiedene Eisen- und Stahlsorten.

Der Energieinhalt oder das Leistungsvermögen eines Dauermagneten wird bestimmt durch den Flächeninhalt der Hystereseschleife. Der Flächeninhalt ist bedingt durch die Größe der Koerzitivkraft und die Größe der Remanenz. Das Produkt wird deshalb auch als Güteziffer bezeichnet. Nachstehender Tafel sind die Zahlenwerte der für Dauermagnete verwendeten Stähle zu entnehmen.

	Remanenz B_R Gauß		Koerzitiv- Kraft H_c Oersted		Perme- abilität μ		Energieinhalt $B \cdot H_{max}$ Erg 8π cm ²	
	max. etwa	min. etwa	max. etwa	min. etwa	max. etwa	min. etwa	max. etwa	min. etwa
Wolfram-Stahl . . .	11300	10200	67	59	145	139	13500	11500
Chrom-Stahl	11000	10000	63	57	146	140,5	12250	10750
Cobalt-Stahl (10 vH)	9000	7500	165	145	86,6	67,4	24000	20000
Cobalt-Stahl (15 vH)	9000	7500	195	175	73,3	63	28000	23000
Cobalt-Stahl (35 vH)	9500	8000	275	245	70,5	61	43000	34000

Cobalt-Magnetstähle (auch Stähle mit 35 vH Co) lassen sich durch Aluminium-Magnetstähle ersetzen (s. Fußnote ²⁾ auf S. 2).

b) Elektromagnetismus.

Fließt durch einen Draht ein elektrischer Strom*), so ist der Draht ebenfalls von einem magnetischen Feld umgeben, als Folge des Stromdurchgangs. Die Kraftlinien dieses elektromagnetischen Feldes ver-

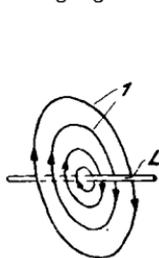


Abb. 6.

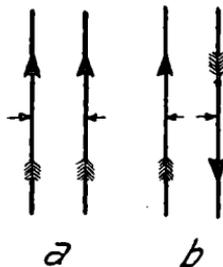


Abb. 7.

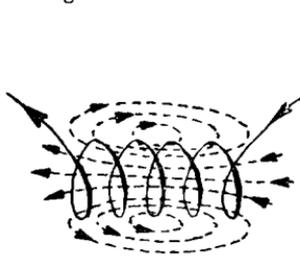


Abb. 8.

laufen konzentrisch um den Leiter L (Abb. 6). Nord- und Südpole sind nicht vorhanden. Zwei parallel verlaufende Leiter ziehen einander an, wenn der Strom in den Leitern in gleicher Richtung fließt (Abb. 7a). Die Leiter stoßen sich ab, wenn der Strom in verschiedenen Richtungen fließt (Abb. 7b). Wird ein stromdurchflossener Leiter zu einer Spule (Abb. 8) zusammengerollt, so verlaufen die magnetischen Kraftlinien

*) Siehe Seite 8

axial durch die Spule. Wird in diese Spule ein Eisenstab aus weichem Eisen eingeführt, so durchfließen die Kraftlinien den Stab, und dieser wird zu einem Magneten, den man seiner Entstehungsursache nach Elektromagnet nennt. Der Stab verliert seine magnetischen Eigenschaften, sobald der Strom zu fließen aufhört, denn mit dem Strom verschwindet auch das elektromagnetische Feld. Führt man ein Stück Stahl in eine stromdurchflossene Spule ein, so wird der Stahl magnetisiert und bleibt magnetisch. Auf diese Weise können kräftige Dauermagnete hergestellt werden. Die Elektromagnete sind in der Wirkung viel kräftiger als Dauermagnete, denn durch größere Stromstärken oder durch eine größere Anzahl Windungen kann der Magnetismus verstärkt werden bis zu einer gewissen Grenze, die Sättigungsgrenze. (Siehe Magnetisierungskurven Abb. 5 u. 34.) Um die Pole des Elektromagneten zu bestimmen, hat man verschiedene Regeln aufgestellt. Man denkt sich beispielsweise den Eisenstab als Schraube oder Korkzieher mit Rechtsgewinde (Abb. 9) und dreht ihn in der Stromrichtung (a), dann gibt die axiale Bewegung (d. h. vorwärts oder rückwärts) die Richtung des magnetischen Kraftflusses (b) an. Da die Kraftlinien immer am Nordpol des Magneten austreten, ist hierdurch auch die Polarität bestimmt. Ein Stück Eisen 1, welches im Bereiche der Kraftlinien eines Magneten oder Elektromagneten 2 (Abb. 10) so angebracht ist, daß 1 von 2 angezogen werden kann, nennt man einen Anker.

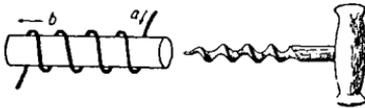


Abb. 9.

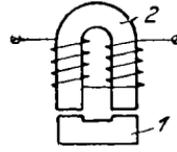


Abb. 10.

1. Gewöhnliche (neutrale) und gepolte Elektromagnete.

Beim gewöhnlichen Elektromagneten (Abb. 10) ist der Kern aus weichem Eisen, die anziehende Wirkung auf den Anker rührt lediglich vom Felde des die Spule durchfließenden Stromes her, wobei es nicht darauf ankommt, in welcher Richtung die Spule vom Strom durchflossen wird¹⁾. Eine Anziehung des Ankers findet bei Durchgang eines Stromes hinreichender Stärke immer statt.

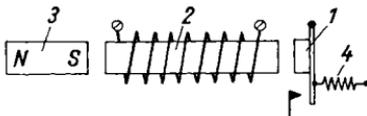


Abb. 11.

Ein gepolter Elektromagnet entsteht, wenn einem ursprünglich neutralen Elektromagneten 2 (Abb. 11) mit dem Anker 1 ein Dauermagnet 3 so zugeordnet wird, daß die Kraftlinien des permanenten Magneten über den Kern des Elektromagneten verlaufen und diesen magnetisieren. Mittels der Gegenkraft einer Feder 4 kann der Anker 1

¹⁾ Rinkel, R., Das magnetische Feld von Spulen. Z. techn. Phys. 6, 1925, 27—35.

so eingestellt werden, daß eine Anziehung nicht stattfindet, solange der Elektromagnet 2 nur von dem Dauermagneten 3 magnetisiert wird. Der Anker kann nur angezogen werden, wenn der Elektromagnet vom elektrischen Strom bestimmter Richtung erregt wird, und zwar bei einer solchen Stromrichtung, die ein Feld erzeugt, welches dem Feld des Dauermagneten gleichgerichtet ist. Geht der Strom in entgegengesetzter Richtung durch die Wicklung des Elektromagneten, so entsteht eine Schwächung des vom Dauermagneten herrührenden Feldes; eine Ankeranziehung kann nicht stattfinden. Damit die Anker nicht kleben bleiben, werden sie mit einem Klebestift aus nichtmagnetischem Metall versehen. Einen Elektromagneten, der nur auf einbestimmte Stromrichtung anspricht, nennt man gepolt.

Ist der Kern des Elektromagneten 2 (Abb. 12) hufeisenförmig und der Dauermagnet 3 polt das System so, daß die Kraftlinien des Magneten 3 sich auf beide Schenkel gleichmäßig verteilen, so wird bei Stromdurchgang durch die Wicklung des Elektromagneten der Magnetismus des einen Schenkels verstärkt, der des anderen geschwächt. Es weist je nach der Richtung des Stromes der eine oder der andere Schenkel stärkeren Magnetismus auf. Ein vor den Polen des hufeisenförmigen Elektromagneten gelagerter, um die Achse 4 drehbarer Anker 1 gerät in pendelnde Bewegung, wenn Strom wechselnder Richtung durch die Elektromagnetwicklung geht. Diese Anordnung wird bei gepolten Wechselstromweckern verwendet; siehe auch Abschnitt Wechselstromwecker.

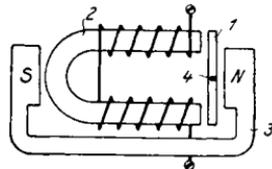


Abb. 12.

2. Bifilare und differentiale Wicklungen.

Durchfließt ein Strom eine Spulenvicklung (Abb. 13) von 1 nach 2, von 2 nach 4 und von 4 zurück nach 3, so wird der Kern 5 nicht magnetisiert, wenn die Windungszahlen in dem einen und dem anderen Sinne gleich sind. Da die magnetisierende Kraft der ersten Wicklung 1—2, der der zweiten Wicklung 4—3 nach der Korkzieherregel entgegengesetzt gerichtet ist, heben sich bei gleicher Windungszahl die Kräfte auf. Eine Wicklung, bei welcher die zwei Drähte für die Hin- und Rückleitung des Stromes nebeneinander verlaufen, bezeichnet man als bifilar.

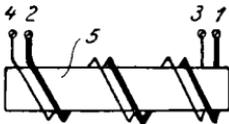


Abb. 13.

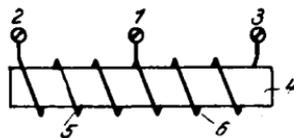


Abb. 14.

Die Differentialwicklung ist durch Abb. 14 erläutert. Wenn beispielsweise die aus zwei vollständig gleichen Teilen 5 und 6 bestehende Wicklung von 2 nach 3 oder umgekehrt vom elektrischen

Strom durchflossen wird, so wird der Kern 4 einmal in der einen und dann in der anderen Richtung magnetisiert. Geht der Strom jedoch bei 1 in die Wicklung hinein, so teilt er sich zu je zwei gleichen Hälften über 5 und 6 nach 2 bzw. 3, und es findet keine Magnetisierung des Kernes 4 statt.

In Abb. 15 ist ein Elektromagnet mit einem Anker 2 dargestellt, der als Dauermagnet ausgebildet ist. Geht durch Wicklung 1 Strom abwechselnder Richtung, so werden die Pole 3 und 4 abwechselnd Süd- bzw. Nordpol sein; der Anker wird, um 5 drehbar gelagert, zwischen 3 und 4 hin und her pendeln.

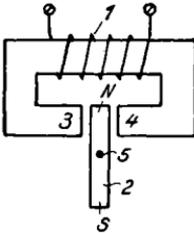


Abb. 15.

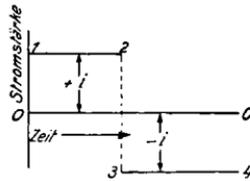


Abb. 16.

c) Der elektrische Strom und die Gleichstromgesetze.

Die Bewegung, das Fließen der elektrischen Energie in einem Leiter bezeichnet man als elektrischen Strom. Man unterscheidet grundsätzlich Gleichstrom, der in gleichbleibender Stärke und gleicher Richtung fließt, von Wechselstrom, der in gleichen Zeitabschnitten, meistens Bruchteilen einer Sekunde, seine Richtung wechselt und innerhalb jedes Zeitabschnittes seine Stärke nach einer bestimmten Gesetzmäßigkeit ändert. Der Gleichstrom kann, als Funktion der Zeit, durch eine gerade Linie 1—2 (Abb. 16) parallel zur Nulllinie 0—0 dargestellt werden. Wird die Richtung des Gleichstromes umgekehrt, so kann letzterer durch Linie 3—4 dargestellt werden, die wiederum parallel zur sog. Abszissenachse 0—0 verläuft.

1. Die Grundeinheiten und das Ohmsche Gesetz.

Die Elektrizität hat weder Gewicht noch Ausdehnung und kann somit nur an den Wirkungen, die ein Strom ausübt, gemessen werden. Als Stromeinheit wird das Ampere (A) angenommen. Ein Ampere ist diejenige Stromstärke, die beim Durchgang durch eine Silbernitratlösung in einer Sekunde 0,001118 g Silber niederschlägt. 1 Milliampere (mA) = $\frac{1}{1000}$ Ampere.

Wenn durch eine Röhre Wasser fließt, so wird die Wasserstromstärke von dem Druck abhängen, mit welchem das Wasser durch die Röhre gedrückt wird. Ist der Druck stärker, so ist bei gleicher Rohrweite auch die Wasserstromstärke größer. Dieselben Verhältnisse liegen auch beim elektrischen Strom vor, nur mit dem Unterschied, daß bei der Wasserströmung der Widerstand von dem Rohrdurchmesser, d. h. der lichten Weite und Beschaffenheit der inneren Rohrwandungen ab-

hängt, bei elektrischer Strömung außer dem Durchmesser auch noch das Material des Leiters eine Rolle spielt. Der Druck bei Wasserströmung wird in Meter-Wassersäule gemessen oder in Kilogramm je Quadratcentimeter. 10 m Wassersäule entsprechen einem Druck von 1 kg je Quadratcentimeter, auch Atmosphäre genannt. Der Druck bei elektrischer Strömung wird in Volt gemessen, der elektrische Widerstand in Ohm (Ω)*. Die Grundeinheiten der strömenden Elektrizität sind somit

Ampere, Volt, Ohm.

Der in Ohm gemessene elektrische Widerstand entspricht dem Reibungswiderstand des Wassers in der Röhre und bedingt einen Spannungsverlust in Volt, ebenso wie der Reibungswiderstand der Röhre bei Wasserströmung einen Verlust in der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers verursacht. Je größer Stromstärke und Widerstand, um so größer der Spannungsverlust. Wir können sagen

Volt = Ohm \times Ampere.

Bezeichnet man die Anzahl Volt mit U , die Anzahl Ohm mit R und die Anzahl Ampere mit I , so kann man schreiben:

$$U = R \cdot I \text{ oder } I = U : R \text{ oder } R = U : I.$$

Dieses sind die drei Formen des Grundgesetzes (Ohmsches Gesetz) der strömenden Elektrizität.

Die Elektrizitätsmenge, die einen Leiter durchfließt, wird in Coulomb (Q) gemessen, und es stellt ein Coulomb diejenige Elektrizitätsmenge dar, die in 1 Sekunde den Leiter durchfließt, wenn die Stromstärke 1 Ampere beträgt. (Die Wassermenge, die eine Röhre durchfließt, wird in Liter gemessen.) 1 Coulomb ist somit

1 Ampere \times 1 Sekunde = 1 Amperesekunde.

Fließt in einem Leiter ein Strom von 10 Ampere während 1 Stunde = 60 \times 60 Sekunden, so haben den Leiter 10 \times 60 \times 60 = 36000 Coulomb durchströmt; bei 1 Ampere und 1 Stunde, d. h. 1 Ampere-stunde (Ah) wären es 3600 Coulomb.

Beispiel: Ein Mikrofon mit 30 Ohm Widerstand wird an eine Batterie, bestehend aus zwei hintereinander geschalteten Trockenelementen, gelegt, d. h. an eine Spannung von 2 \times 1,5 Volt = 3 Volt.

Welcher Strom geht durch das Mikrofon?

Nach dem Ohmschen Gesetz ist

$$I = U : R; \text{ oder } I = 3 : 30 = 0,1 \text{ Ampere} = 100 \text{ Milliampere.}$$

Beispiel: An eine Spannung von 6 Volt soll ein solcher Widerstand gelegt werden, daß die Stromstärke 5 Milliampere beträgt.

5 Milliampere = 0,005 Ampere.

Nach der Formel 3 (oben) ist der Widerstand

$$R = U : I = 6 : 0,005 = 6 : \frac{5}{1000} = \frac{6 \cdot 1000}{5} = 1200 \text{ Ohm.}$$

Beispiel: In einem Stromkreise sind ein Mikrofon von 300 Ohm Widerstand und eine Leitung von 100 Ohm eingeschaltet. Wie groß

*) Das Ohm ist gleich dem Widerstand einer Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge bei 0° Cels., einem Gewicht von 14,4521 g und 1 mm² Querschnitt.

muß die Spannung sein, damit das Mikrofon von 60 Milliampere durchflossen wird?

Es sind 60 Milliampere = 0,060 Amperé.

Nach der Formel 1 (oben) ist

$$U = R \cdot I = (300 + 100) \cdot 0,06 = 400 \cdot 0,06 = 24 \text{ Volt.}$$

2. Der elektrische Widerstand.

Bei Drähten, die als Stromleiter Verwendung finden, ist der Widerstand um so größer, je länger und dünner der Draht ist. Auch ist, wie bereits erwähnt, der Widerstand abhängig vom Material des Drahtes. Mathematisch ausgedrückt ist

$$\text{Widerstand} = \frac{\text{Länge}}{\text{Querschnitt}} \times \text{Materialkonstante}$$

$$R = \frac{l}{q} \cdot \rho.$$

Die kleinste Materialkonstante hat Silber, an zweiter Stelle steht Kupfer. Diese Konstante ρ wird als „spezifischer Widerstand“ bezeichnet.

In nachstehender Zahlentafel sind die Materialkonstanten einiger Metalle und Mischmetalle angegeben¹⁾.

Der Widerstand eines Drahtes ändert sich auch mit der Temperatur (siehe Temperaturkoeffizient α). Als Temperaturkoeffizient wird die Zunahme bzw. Abnahme des Widerstandes (je 1° C) mit der Temperatur bezeichnet. Metalle haben einen positiven Temperaturkoeffizienten, d. h. der Widerstand wächst mit der Temperatur. Kohle hat einen negativen Temperaturkoeffizienten.*)

Hat ein Metall, z. B. ein Draht aus Eisen bei 15° C einen Widerstand von 5 Ohm, so hat er bei 50° C einen Widerstand von

$$R_{50} = R_{15} \cdot (1 + \alpha t),$$

wobei t die Temperaturerhöhung, im vorliegenden Fall 50° — 15° = 35, bedeutet. Für Eisen ist der Tabelle für α der Wert 0,0047 zu entnehmen. Es ist also:

$$R_{50} = 5(1 + \alpha \cdot t) = 5(1 + 0,0047 \cdot 35) = 5(1 + 0,164) = 5 + 0,820 = 5,820 \text{ Ohm.}$$

Der reziproke (oder umgekehrte) Wert des Widerstandes ist die Leitfähigkeit. Die Einheit der Leitfähigkeit ist 1 Siemens (S). Ist der Widerstand 0,1 Ohm, so beträgt die Leitfähigkeit 1 : 0,1 = 10 Siemens.

5 Ohm entsprechen einer Leitfähigkeit von 1 : 5 = $\frac{1}{5}$ = 0,2 Siemens.

Beispiel: Wie groß ist der Widerstand R_1 von 1 m Draht, wenn 150 m einen Widerstand R_2 von 2 Ohm haben?

Der Widerstand von 1 m ist der 150. Teil des Widerstandes vom ganzen Draht,

$$R_1 = R_2 : 150 = 2 : 150 = \frac{1}{75} \text{ Ohm.}$$

¹⁾ Klein, G., Beiträge zur Kenntnis von Widerstandsmaterialien. ETZ 45, 1924, 300—302. — Schulze, A., Elektrische Widerstandsmaterialien. Helios F. Lpz. 39, 1933, 173—74.

*) Über negative Widerstände s. Seite 14.

**Spezifischer Widerstand und Temperaturkoeffizient
von einigen Metallen.**

S t o f f	Spezifischer Widerstand ρ		Temperaturkoeffizient α	Leitfähigkeit	Spez. Gew.
	Ohm $\frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$		bez. auf 15° C	$\frac{\text{m}}{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}$	$\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$
Aluminium gewalzt	0,031	bei 20° C	0,0037	32,3	2,70
Blei	0,20	» 15° C	0,0037	5,0	11,37
Eisenblech	0,13	» 15° C	0,0046	7,7	7,86
Eisendraht (mittel)	0,143	» 20° C	0,0047	7,0	7,65
Kupfer (gut)	0,01724	» 20° C	0,00393	58	8,89
» (Leitungs-)	0,01784	» 20° C	0,00381	56,1	8,89
Nickel	0,10	» 15° C	0,0042	10	8,9
Platin	0,094	» 15° C	0,00235	10,7	21,5
Quecksilber	0,9532	» 15° C	0,000873	1,049	13,55
Silber, weich	0,0158	» 15° C	0,0036	63,5	10,55
Stahldraht	0,172	» 15° C	0,0052	5,8	7,9
Zink	0,0625	» 20° C	0,0039	16,0	7,2

**Spezifischer Widerstand und Temperaturkoeffizient
von Mischmetallen.**

Aluminiumbronze: (Cu u. 5% Al)	0,13	bei 15° C	0,0005 bis 0,001	7,5 bis 3,5	8,4
(Cu u. 10% Al)	0,29	» 15° C	0,0005 bis 0,001	3,5	7,65
Messingdraht: (30% Zn)	0,085	» 15° C	0,0012 bis 0,002	12 bis 15	8,3
Resistin (Cu-Mn)	0,51	» 15° C	$\frac{+ 2,0 \times}{10^{-8}}$	1,97	—
Manganin: (Cu-Ni-Mn)	0,42	» 15° C	$— 3,0 \times$ 10^{-6}	2,35	8,43
	0,43	» 15° C	bis $— 8,0$ $\times 10^{-6}$	2,35	8,43
Konstantan (Cu-Ni)	0,488	» 15° C	$— 5,0 \times$ 10^{-6}	2,05	8,8
Nickelin I (Cu-Ni)	0,41	» 15° C	0,000020	2,4	8,88
»	0,43	» 15° C			
Nickelin (Cu-Ni-Zn)	0,40	» 15° C	0,00022	2,5	8,75
Rheotan (Cu-Ni-Zn)	0,47	» 15° C	0,00023	2,1	8,55
Kruppin (Fe-Ni)	0,85 bis 0,86	» 90° C	0,00073 bis 0,00069	1,17	8,09

Beispiel: Etwa 45 m Draht von 1 mm Durchmesser (0,785 mm² Querschnitt) haben einen Widerstand von 1 Ohm*), wie groß ist der

*) Man merke sich diese Größenordnung: Kupferdraht 1 mm ϕ , 1 Ohm 45 m, versäume jedoch nicht in Rechnungen den Querschnitt an Stelle des Durchmessers einzusetzen.

Widerstand eines Drahtes gleicher Länge und gleichen Materials bei 0,6 mm Durchmesser (= 0,283 mm² Querschnitt)?

Nach der Formel auf S. 10 ist der Widerstand R umgekehrt proportional dem Querschnitt q . Die Widerstände zweier Drähte vom Querschnitt q_1 und q_2 verhalten sich bei gleichem Material (ρ) und gleicher Länge l wie:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{q_2}{q_1} \quad \text{weil} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{(l \cdot \rho)}{q_1} : \frac{(l \cdot \rho)}{q_2},$$

d. h. bei gleichem Material umgekehrt proportional den jeweiligen Querschnitten. Ist also im vorliegenden Beispiel

$$\begin{array}{lll} R_1 = 1 \text{ Ohm} & q_1 = 0,785 \text{ mm}^2 & l = 45 \text{ m} \\ R_2 = \text{unbekannt} & q_2 = 0,283 \text{ mm}^2 & l = 45 \text{ m} \end{array}$$

so errechnet man R_2 zu

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot q_1}{q_2} = \frac{1 \times 0,785}{0,283} = \frac{0,785}{0,283} = 2,77 \text{ Ohm.}$$

Werden mehrere Widerstände aneinander gereiht, d. h. hintereinander geschaltet, so ist der Gesamt-widerstand gleich der Summe aller Widerstände. In Abb. 17 ist der Gesamt-widerstand

$$R_g = R_1 + R_2 + R_3.$$

In einem Stromkreise, in welchem verschiedene Widerstände R_1, R_2, R_3 hintereinander geschaltet sind, fließt ein Strom

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

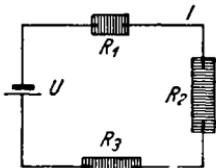


Abb. 17.

Dieser Strom ist in jedem Widerstand des Stromkreises der gleiche, unabhängig von dem Querschnitt, denn es kann der Strom auf seiner Bahn weder verloren gehen, noch kommt welcher hinzu, und es kann beispielsweise den Widerstand R_3 nur ein Strom von einer solchen Stärke durchfließen, der auch durch R_2 und R_1 geht, ebenso wie aus dem Gefäß G (Abb. 18) durch die

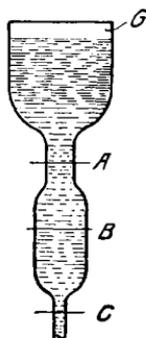


Abb. 18.

Röhren mit den Querschnitten A, B und C in der Zeiteinheit die gleiche Anzahl Liter Wasser fließt. Die Stromdichte, also die Stromstärke auf 1 mm², bezogen, ist in dem dünneren Draht allerdings größer als in dem dicken Draht.

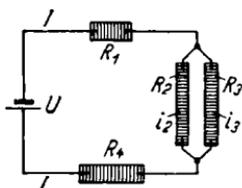


Abb. 19.

Schaltet man in den Stromkreis der Abb. 17 an Stelle des Widerstandes R_2 zwei Widerstände R_2 und R_3 (Abb. 19) von gleicher Länge, aber nur halbem Querschnitt, so fließt wie vorher in dem Gesamtstromkreis der gleiche Strom I , der sich jedoch in R_2 und R_3 je zur Hälfte verzweigt.

Kann in einer Schaltung der Strom verschiedene Wege nehmen, so sucht er vorzugs-

weise den Weg des geringsten Widerstandes, ebenso wie im magnetischen Kreis die Kraftlinien den Weg des geringsten Widerstandes bevorzugen. Um die Gesetzmäßigkeit für Stromverzweigungen zu finden, bedient man sich der Leitfähigkeiten. Die Leitfähigkeiten der Widerstände R_1 und R_2 sind $\frac{1}{R_1}$ und $\frac{1}{R_2}$. Bei Parallelschaltung kann man Leitfähigkeiten addieren und erhält somit die Gesamtleitfähigkeit:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 \cdot R_2};$$

hieraus ist der Widerstand

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_2 + R_1}.$$

Sind drei Widerstände R_1, R_2, R_3 parallel geschaltet, so ist

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_2 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3};$$

hieraus

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_1 R_3 + R_2 \cdot R_3}.$$

Beispiel: Die Batterie B (Abb. 20) habe 24 Volt Spannung. Wie groß sind die Teilströme in $R_1 = 3$ Ohm und $R_2 = 2$ Ohm?

Der Gesamtwiderstand ist:

$$R_g = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{6}{5} = 1,2 \text{ Ohm}.$$

Nach dem Ohmschen Gesetz ist der Gesamtstrom

$$I_g = 24 : 1,2 = 20 \text{ Ampere}.$$

Die Teilströme i_1 in R_1 und i_2 in R_2 (Abb. 20) verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände; also

$$i_1 : i_2 = R_2 : R_1 = 2 : 3$$

oder

$$i_1 = 2/3 i_2.$$

Der Gesamtstrom ist aber gleich der Summe der Teilströme:

$$I_g = i_1 + i_2 = 20 \text{ Ampere, woraus } i_1 = 20 - i_2.$$

Aus den beiden Gleichungen für i_1 ist

$$20 - i_2 = 2/3 i_2; \quad i_2 + 2/3 i_2 = 20;$$

$$\frac{5}{3} i_2 = 20 \text{ und } i_2 = 12 \text{ Ampere}.$$

Da aber $I = 20 = i_1 + i_2$ ist, so erhält man für i_1 :

$$i_1 = 20 - 12 = 8 \text{ Ampere}.$$

Stoffe, die den elektrischen Strom nicht leiten und als Isolierstoffe¹⁾ bezeichnet werden, sind in umstehender Zahlentafel²⁾ aufgeführt.

¹⁾ Hochwertiges Isoliermaterial. ETZ 54, 1933, 537—72, Sonderheft Isolierstoffe.

²⁾ Siehe auch Baur, Das Elektrische Kabel. Die angegebenen Werte gelten nur bis zur Durchschlagspannung.

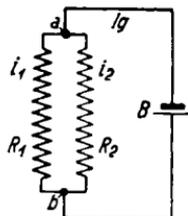


Abb. 20.

Stoff	R_s
Luft	∞
Paraffin	34,0
Ebonit	28,0
Flintglas	20,0
Bester Siemens-Vulkan- Gummi	16,17
Gummi	10,9
Schellack	9,0
Guttapercha	0,45 bis 1,0
Gewöhnliches Glas	0,91
Glimmer	0,084

Die spezifischen Widerstände (R_s) von Isolierstoffen sind so groß, daß man hier die Zahlen in Megohm (1 Megohm $[M\Omega] = 1000\ 000$ Ohm) angibt, und zwar für einen Würfel von 1 cm Seitenlänge, dessen zwei gegenüberliegende Seiten mit metallischen Zuleitungen belegt zu denken sind.

Außer den in der Zahlentafel aufgeführten Stoffen sind folgende Isolierstoffe in Verwendung: Porzellan, Marmor, Papier, Seide, Baumwolle, Wolle, Jute, Asbest, Schiefer und verschiedene Öle.

Der Vollständigkeit halber sei hier noch auf einige besondere Widerstandselemente hingewiesen. Einiges Interesse verdienen heute die sogen. negativen Widerstände. Als solche bezeichnet man heute Widerstandselemente, die aus Urandioxyd gebaut sind (Osram Urdox-Ausgleichwiderstände) und die, wie die Kohle, einen negativen Temperaturkoeffizienten haben. Erwärmt sich bei Stromdurchgang das Urandioxyd-Stäbchen, Abb. 21, so nimmt sein Widerstand mit steigender Temperatur ab, und zwar bis zu etwa $\frac{1}{25}$ — $\frac{1}{30}$ des ursprünglichen Wertes im kalten Zustand; im Temperaturgebiet von 20 bis 320° C entsprechend der Formel: $W = Ae^{b/T}$ (wobei $A = 0,18$; $b = 1,87 \cdot 10^3$).

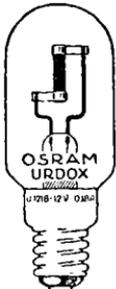


Abb. 21.

Die negativen Widerstände dienen bei Fernmeldegeräten zur Unterdrückung hoher Einschaltstromstöße, insbesondere in Verbindung mit einem Eisen-Wasserstoff-Widerstand. Die Anwendung der negativen Widerstände in der Fernmeldetechnik ist noch gering.

Größere Beachtung verdient der erwähnte Eisen-Wasserstoff-Widerstand, der in der Fernmeldetechnik für die Regelung kleiner Stromstärken (insb. in der Verstärkertechnik, s. d.) angewendet wird.

Der Eisen-Wasserstoff-Widerstand ist ein Eisendraht, der wie ein Glühlampendraht in einer mit Wasserstoff von bestimmtem Druck gefüllten Röhre, Abb. 22, angeordnet ist. Wird dieser Widerstand

mit einem Fernmeldegerät an eine in bestimmten Grenzen veränderliche Spannung gelegt, so vermag er die an dem Gerät liegende Spannung konstant zu halten. Bei steigender Spannung wächst zunächst



Abb. 22.

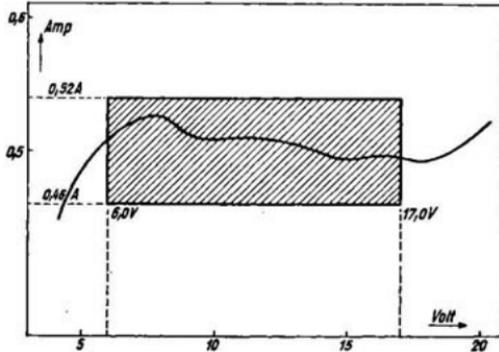


Abb. 23.

auch der Strom, der den Eisendraht erwärmt und dadurch den Widerstand des Drahtes erhöht. Infolgedessen erhöht sich aber auch der im Eisendraht auftretende Spannungsabfall. Durch geeignete Bemessung des Drahtes und des Gasdruckes in der Röhre läßt sich innerhalb gewisser Grenzen eine lineare Regelung des Spannungsabfalls als Funktion der Spannungsänderung erzielen oder in einem Stromkreis der Strom (bei Spannungsschwankung an der Stromquelle) konstant halten. Abb. 23 zeigt die Größenordnungen und die Grenzwerte.

Eine gewisse Bedeutung erlangten auch die Kohledruckwiderstände¹⁾ und sie können für ein Gesamtprojekt großer fernmelde-technischer Anlagen in Frage kommen. Kohlestoff ist ein Halbleiter, dessen Widerstand zwischen 6 Ohm mm^2/m und etwa 80 Ohm mm^2/m schwankt, je nach Zusammensetzung des Kohlegemisches. Die Kohledruckwiderstände bestehen aus Säulen einer Vielzahl flach aufeinandergelegter runder Kohleplättchen. Der Übergangswiderstand zwischen diesen aufeinandergelegten Kohleplättchen ändert sich durch den auf eine solche Säule ausgeübten Druck in sehr weiten Grenzen, und zwar gehen diese Änderungen mit dem Druck augenblicklich vor sich. Wie aus der Abb. 24 zu ersehen, sind die Säulen an

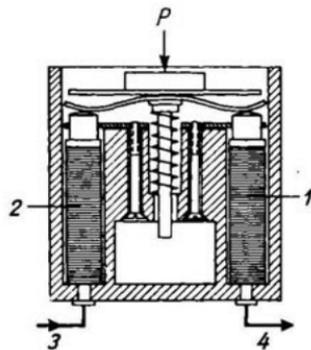


Abb. 24.

¹⁾ Hoffmann, Fr., Kohledruckwiderstände. ETZ 58. 1937, 1111—15 u. 1138—42.

den Enden mit etwas stärkeren (verkupferten) Plättchen 1, 2 abgeschlossen und mit Stromzuführungen 3, 4 versehen. Diese Säulen werden als durch Druck (P) veränderbare Widerstände in den zu

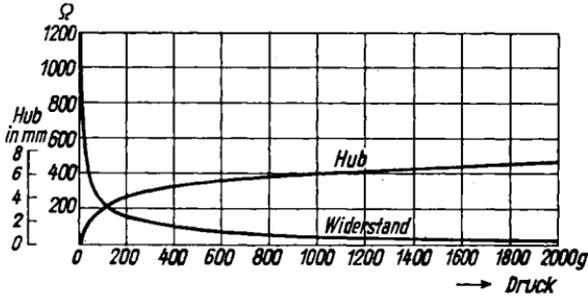


Abb. 25.

regelnden Stromkreis geschaltet. Die Abb. 24 zeigt den Aufbau eines mechanisch betätigten Kohledruckreglers, und Abb. 25 zeigt in Kurvenform die mechanischen und elektrischen Vorgänge und die Größenordnungen.

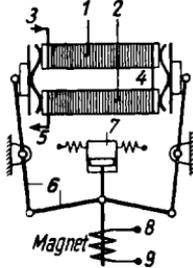


Abb. 26.

Ein Kohledruckregler kann auch elektromagnetisch betätigt werden. Die Abb. 26 zeigt ganz schematisch den Grundgedanken eines selbsttätig wirkenden Kohledruckreglers, der z. B. in Abhängigkeit von einer Netzspannung arbeitet, wenn die Spannung an die Wicklung des Elektromagneten (8, 9) gelegt wird. Zu erwähnen ist noch, daß die Kohlesäulen sich beim Zusammendrücken erwärmen, und daß nach Aufheben des Druckes der Widerstand wieder auf den ursprünglichen Wert zurückgeht.

3. Der Spannungsabfall.

Nach dem Ohmschen Gesetz ist

$$\text{Volt} = \text{Ampere} \times \text{Ohm}; \quad U = I \cdot R.$$

Den Ausdruck $I \cdot R$ nennt man allgemein Spannungsabfall. In jedem Stromkreis findet ein Spannungsabfall, ein Spannungsverbrauch, statt. Nimmt man an, daß eine Stromquelle und ein Widerstand zu einem Stromkreis geschaltet sind und daß die Spannung am positiven Pol einen Wert hat, der durch die Linie AD (Abb. 27) dargestellt sei, die Spannung am negativen Pol dagegen durch die Strecke BC , so ist die Gesamtspannungsdifferenz

$$AD + BC = ED.$$

Desgleichen kann man annehmen, daß am positiven Pol der Batterie eine Spannung ED gegenüber dem negativen Pol herrscht. Diese Spannung wird im Widerstand verbraucht, und zwar nach dem Ohmschen Gesetz $U = I \cdot R$. Der Spannungsabfall wird durch die Linie DC dargestellt. Die Linien EC oder AB stellen den Widerstand in Ohm und ED die Spannung in Volt dar.

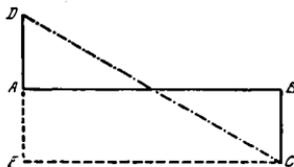


Abb. 27.

Die elektrische Spannung, die von einer Batterie oder einer Dynamo hervorgebracht wird, nennt man elektromotorische Kraft, EMK. Verbindet man die beiden Pole einer Stromquelle mit einem Draht, so erzeugt und unterhält die EMK in diesem Kreise einen Strom, der den äußeren Schließungsdraht und den inneren Widerstand der Stromquelle durchfließt. Der Spannungsausgleich (Verbrauch) findet also nicht nur im äußeren, sondern auch im inneren Widerstand statt. Der innere Spannungsabfall ist ein Verlust innerhalb des Stromerzeugers, und es ist aus diesem Grunde die Spannung an den Klemmen, die sog. Klemmenspannung, bei Stromentnahme immer kleiner als die EMK.

Die EMK ist für jede Batterie eine charakteristische Größe und wird bestimmt beispielsweise bei Elementen durch die chemische Natur der verwendeten Stoffe, ist aber unabhängig von der Größe der Elektroden, siehe S. 34. Die Klemmenspannung ist bei stromlosem Element gleich der EMK und bei Stromentnahme um so kleiner, je größer die Stromentnahme ist.

In der Abb. 28 ist der Spannungsabfall durch die Linie BCD dargestellt. AB ist die EMK, CF die Klemmenspannung, $BH = AB - CF$ ist der Spannungsabfall innerhalb des Elementes, während die Spannung FC im äußeren Stromkreise R_a verbraucht wird.

Bezeichnet man diese Klemmenspannung FC mit U , so ist $U = \text{EMK} - (I \cdot R_i)$, wenn I der der Batterie entnommene Strom ist und R_i den inneren Widerstand der Batterie bedeutet. Ist der Strom I größer, so ist auch $I \cdot R_i$ größer und die Klemmenspannung U somit kleiner.

Beispiel: Es sind drei Widerstände a, b, c hintereinander geschaltet und an eine Spannung U gelegt, deren Größe der Linie AD (Abb. 29) entspricht. Der Spannungsabfall erfolgt nach der Linie

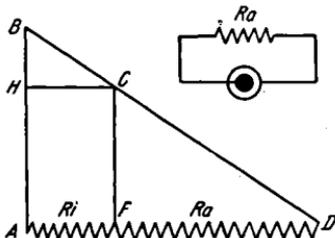


Abb. 28.

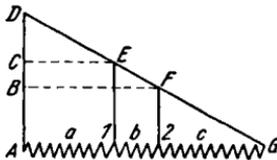


Abb. 29.

DEFG. Der die Widerstände durchfließende Strom ist $i = AD : (a + b + c)$. Es ist

der Spannungsabfall in $a = a \cdot i = DC$,
 " " " $b = b \cdot i = CB$,
 " " " $c = c \cdot i = BA$.

Mißt man die Spannung an den Enden eines jeden Widerstandes mit einem Spannungsmesser, so erhält man

zwischen *A* und 1 eine Spannung von *CD* Volt
 " 1 " 2 " " " *CB*
 " 2 " *G* " " " *AB* "

Es sei $a = 3$ Ohm, $b = 5$ Ohm, $c = 1$ Ohm und $AD = 18$ Volt. Dann ist $i = 18 : (3 + 5 + 1) = 18 : 9 = 2$ Ampere.

$CD = 3 \cdot 2 = 6$ Volt, $BC = 5 \cdot 2 = 10$ Volt, $AB = 1 \cdot 2 = 2$ Volt.

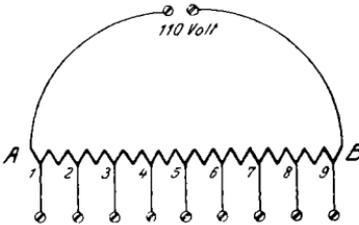


Abb. 30.

Auf dem Prinzip des Spannungsabfalles beruht der Spannungsteiler. In der Abb. 30 ist ein Widerstand *AB* an 110 Volt Spannung gelegt. Der Widerstand ist an verschiedenen Stellen 1, 2, 3 usw. angezapft und an Klemmen geführt, so daß eine große Anzahl verschiedener Spannungen zur Verfügung steht. Bei Spannungsteilern, die Spannungen verschiedener

Größe unabhängig von der Stärke des entnommenen Stromes liefern sollen, ist darauf zu achten, daß der entnommene Strom nach Möglichkeit klein ist im Verhältnis zum Strom, der durch den Widerstand *AB* fließt.

4. Gesetze der Stromverzweigungen.

Im Stromkreis der Abb. 20 verzweigt sich der Strom I_g in zwei Teilströme i_1 und i_2 . Nach dem I. Kirchhoffschen Gesetz ist in jedem Punkt einer Stromverzweigung die algebraische Summe der zu- und abfließenden Ströme gleich Null. Im Punkt *a* oder *b* ist immer $I_g - i_1 - i_2 = 0$ oder $I_g = i_1 + i_2$. Dieses Gesetz besagt, daß in jedem Stromverzweigungspunkte so viel Strom abfließen muß, wie Strom zufließt, denn eine Anhäufung kann nicht stattfinden. Das II. Kirchhoffsche Gesetz lautet: In allen Leitern einer Stromverzweigung, die zusammen einen geschlossenen Kreis bilden, ist die algebraische Summe der Produkte aus der Stromstärke in jedem Leiter und dem Widerstande desselben gleich der algebraischen Summe der in diesem Stromkreise vorhandenen elektromotorischen Kräfte. Hierbei sind die Stromstärken und elektromotorischen Kräfte gleichgerichteter Ströme mit demselben Vorzeichen, die entgegengesetzt gerichteten mit dem entgegengesetzten Vorzeichen zu versehen.

In dem Beispiel der Abb. 20 können drei geschlossene Stromkreise betrachtet werden, und zwar:

- I. $I_g \cdot R + i_1 \cdot R_1 = U$ im Stromkreise $B, a, R_1, b, B.$
- II. $I_g \cdot R + i_2 \cdot R_2 = U$ im Stromkreise $B, a, R_2, b, B.$
- III. $i_1 \cdot R_1 - i_2 \cdot R_2 = 0$ im Stromkreise $a, R_1, b, R_2, a.$

Hierbei ist $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ und U die Spannung der Batterie $B.$

5. Die Stromwärme.

Die Wärmewirkung des elektrischen Stromes wird nach dem Jouleschen Gesetz bestimmt, welches besagt, daß die Zahl der Wärmeeinheiten, die durch einen Strom in einem Widerstand entwickelt werden, proportional ist diesem Widerstande, dem Quadrate der Stromstärke und der Zeit. Die Wärmeeinheit ist die Kalorie (kleine oder Gramm-Kalorie, Cal) und bedeutet diejenige Wärmemenge, die die Temperatur von 1 g Wasser (= 1 ccm Wasser) um 1° C erhöht. Bezeichnet man die Zahl der Kalorien mit $K,$ den Widerstand mit $R,$ die Stromstärke mit I und die Zeit in Sekunden mit $t,$ so ist nach dem Jouleschen Gesetz $K = I^2 R \cdot t \cdot 0,24 = I \cdot I \cdot R \cdot t \cdot 0,24^*$, oder wenn man für $I \cdot R$ die Spannung U setzt (siehe S. 9), so ist $K = I \cdot U \cdot t \cdot 0,24$ Kalorien. Die Leistung des elektrischen Stromes in einem Stromkreise wird durch das Produkt aus der Ampere- und Voltzahl bestimmt: 1 Volt \times 1 Ampere = 1 Watt (siehe auch S. 30). Fließt in einem Leiter ein Strom von 5 Ampere und ist die Spannung an den Enden dieses Leiters 10 Volt, so leistet der Strom sekundlich eine Arbeit von 50 Wattsekunden; in 1 Stunde $50 \times 60 \times 60 = 180000$ Wattsekunden

= 180 Kilowattsekunden = $\frac{180}{3600} = 0,05$ Kilowattstunden. Wird diese Arbeit in einem Widerstand in Wärme umgewandelt, so wird sekundlich eine der Arbeit 5×10 Wattsekunden entsprechende Wärmemenge erzeugt. Dasselbe Resultat erhält man nach dem Jouleschen Gesetz, da der Widerstand des Leiters $10 : 5 = 2$ Ohm betragen muß und K Watt = $I^2 R = 5^2 \cdot 2 = 50$ Watt ergibt. Um die Leistung N des Stromes in mechanischen Maß in Kilogramm-Metern/s zu erhalten, rechnet man

$N = \frac{U \cdot I \text{ mkg}}{9,81 \text{ s}}$. Es ist also 1 Watt = $\frac{1}{9,81} = 0,1019 \frac{\text{mkg}}{\text{s}}$, und da $75 \frac{\text{mkg}}{\text{s}} = 1 \text{ PS (Pferdestärke)},$ so ist $1 \text{ PS} = \frac{75}{0,1019} = 736 \text{ Watt}.$

d) Induktion.

Wie bereits erwähnt, ist jeder stromdurchflossene Leiter von einem magnetischen Kraftfeld umgeben. Die Kraftliniendichte ist ein Maß für die Stärke des magnetischen Kraftfeldes, und dieses ist in

*) 0,24 Cal ist diejenige Wärmemenge, die erzeugt wird, wenn 1 Watt 1 Sekunde lang in einem Widerstand wirkt, d. h. also die einer Wattsekunde entsprechende Wärmemenge.

unmittelbarer Nähe des Leiters am größten. Bringt man einen Leiter b (Abb. 31) in die Nähe eines stromdurchflossenen Leiters a , so umschlingen die konzentrisch um den Leiter a verlaufenden Kraftlinien auch den Leiter b . Bewegt

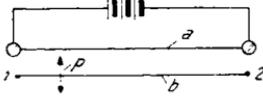


Abb. 31.

man den Leiter b in den Richtungen der Pfeile p rasch hin und her, so entsteht erfahrungsgemäß in dem bewegten Leiter eine EMK. Es wird eine EMK induziert. Der Spannungsunterschied an den Enden 1 und 2 des Leiters b ändert ihre Polarität bei jeder Änderung der Bewegungsrichtung. Die EMK ist um so größer, je schneller der

Leiter bewegt wird und je näher man an den Leiter a herankommt. Hieraus geht hervor, daß die Größe der in einem Leiter induzierten EMK proportional der Anzahl der vom Leiter in der Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinien ist. Dabei ist es belanglos, ob der Leiter in bezug auf das magnetische Feld bewegt wird, oder ob das Kraftfeld sich in bezug auf den Leiter bewegt. Die gleiche Induktionswirkung findet statt, wenn das magnetische Feld von einem Dauermagneten oder einem Elektromagneten herrührt. Das magnetische Kraftfeld um einen Leiter ist nur so lange vorhanden, wie Strom durch den Leiter fließt; wird der Strom unterbrochen, so verschwindet auch das magnetische Feld. Es schrumpft gewissermaßen in sich zusammen. Beim Schließen des Stromkreises entsteht das Kraftfeld von neuem, indem es gleichsam aus dem Leiter herausquillt und nach Erlangen einer bestimmten Stärke, welche der jeweilig fließenden Stromstärke entspricht, unverändert bestehen bleibt. Da der Strom in einem Leiter niemals augenblicklich seinen vollen, aus Spannung und Widerstand bedingten Wert erreichen kann, sondern hierzu immer eine gewisse Zeit erforderlich ist, werden unmittelbar nach dem Stromschluß auch die magnetischen Kraftlinien nicht sofort in endgültiger Lage und Gestalt ausbilden, sondern sich vom Leiter aus in diese endgültige Lage verschieben bzw. beim Öffnen des Stromkreises sich aus der ursprünglichen Lage nach dem stromdurchflossenen Leiter hin bewegen. Die Kraftlinien werden somit beim Entstehen und beim Verschwinden des elektrischen Stromes den um den Leiter liegenden Raum in der einen oder anderen Richtung durchschreiten. Bringt man, wie im vorherigen Beispiel, in die Nähe des stromdurchflossenen Leiters a (Abb. 32) einen zweiten Leiter b , so wird



Abb. 32.

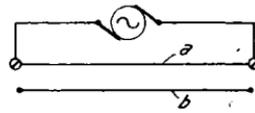


Abb. 33.

dieser beim Entstehen und Verschwinden des Stromes im Leiter a von den sich ausbreitenden oder wieder verschwindenden Kraftlinien geschnitten, und es wird im Leiter b (Abb. 32) wieder eine EMK induziert. Die Polarität dieser EMK ist beim Öffnen des Stromkreises eine andere als beim Schließen. Durch abwechselndes Schließen und Öffnen

des Schalters S läßt sich eine Spannung wechselnder Richtung im Leiter b induzieren. Die gleiche Erscheinung findet statt, wenn an den Leiter a eine Wechselstromquelle angeschlossen wird (Abb. 33). Um eine Induktionswirkung hervorzurufen, ist es nicht erforderlich, daß der Strom im primären Draht a jedesmal bis auf Null abnimmt, sondern jegliche Stromschwankungen bedingen eine Veränderung im magnetischen Kraftfeld, und diese Veränderung bewirkt eine Induktion in dem Leiter, der sich im Bereich dieses veränderlichen Kraftfeldes befindet. Werden die Enden des Leiters b mit einem Draht zu einem Stromkreis verbunden, so fließt in diesem ein Strom — im vorliegenden Fall ein Wechselstrom.

In Wirklichkeit werden die Leiter a und b nicht in gestreckter Form nebeneinander gelegt, sondern in Form von 2 Spulen übereinander geschoben, da zur Erhöhung der Induktionswirkung die Leiter lang sein müssen. Die Induktionswirkung wird außerdem noch dadurch bedeutend gesteigert, daß man die Kraftlinien des magnetischen Feldes teilweise oder ganz in Eisen verlaufen läßt, da Eisen eine bedeutend größere magnetische Durchlässigkeit*) hat als Luft und sämtliche anderen Stoffe. Abb. 34 zeigt die Abhängigkeit der Kraftliniendichte B von den Amperewindungen $i \cdot n$ je cm Länge des Elektromagneten, die dazu erforderlich sind, um eine gewisse Kraftliniendichte B je cm^2 zu erzeugen. Mit Amperewindungen (AW) bezeichnet man das Produkt aus der

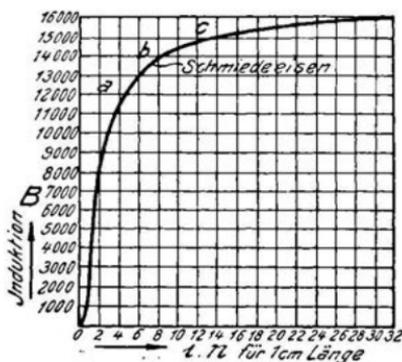


Abb. 34.

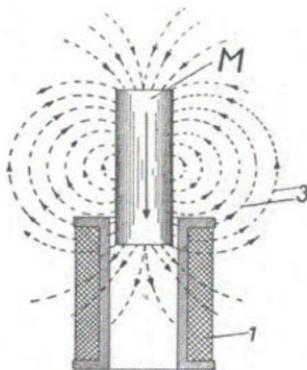


Abb. 35.

Anzahl Umwindungen n und der Stromstärke i , d. h.: 100 Umwindungen, durch welche 5 Ampere fließen, erzeugen dieselbe Kraftliniendichte B wie 5 Umwindungen, durch die 100 Ampere fließen, denn in beiden Fällen ist das Produkt $i \cdot n = 100 \times 5 = 5 \times 100 = 500$ AW. Aus der Schaulinie in Abb. 34 ist zu ersehen, daß bei Steigerung der Amperewindungszahlen $i \cdot n$ B nicht dauernd gleichmäßig steigt, sondern bei Punkt a langsamer zunimmt, noch langsamer bei b und nach Punkt c , d. h. bei

*) Siehe auch S. 3.

12 Amperewindungen, bereits keine wesentliche Zunahme zu verzeichnen ist; das Eisen ist nahezu gesättigt. Der Knick *a-b-c* dieser sog. Magnetisierungskurve wird auch als Knie bezeichnet.

Die Induktionswirkung kann auch mit Hilfe eines Dauermagneten oder Elektromagneten hervorgebracht werden (Abb. 35). Der Magnet *M* wird rasch in die Spule 1 eingesetzt und rasch wieder herausgehoben. Die Kraftlinien 3 schneiden hierbei die Windungen des Spulendrahtes. Führt man die Enden des Spulendrahtes über einen Stromzeiger, so kann bei jeder Bewegung von *M* ein kurzer Stromstoß beobachtet werden.

Die Richtung des induzierten Stromes kann am bequemsten nach der „Rechte-Hand-Regel“ bestimmt werden. Man halte die rechte Hand im magnetischen Felde so, daß die Kraftlinien die innere Handfläche senkrecht treffen und der Daumen in die Bewegungsrichtung des Leiters zeigt, so zeigen die Fingerspitzen in die Richtung des induzierten Stromes.

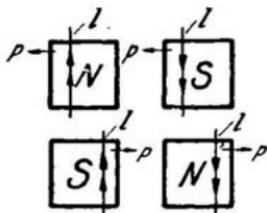


Abb. 36.

Aus der Abb. 36 ist der Zusammenhang zwischen Kraftlinienrichtung, Bewegungsrichtung und Richtung des induzierten Stromes (Pfeile an den Leitern) zu erkennen. Die Bewegungsrichtung des Leiters *l* ist durch die Pfeile *p* angedeutet. Bei Betrachtung der Abbildung ist zu beachten: Beim Nordpol treten die Kraftlinien (aus dem Papier) aus, beim Südpol treten sie ein.

Die Induktionserscheinung wird in der Technik zur Erzeugung von Maschinenstrom durch Gleich- und Wechselstromgeneratoren (siehe vierten Teil, Induktoren) verwendet, ferner um Wechselströme auf andere Spannungen umzuspannen. Zum Zwecke der Spannungswandlung werden die zwei Leiter in Form von Spulen über einen eisernen Kern gewickelt und in die primäre Spule der umzuspannende Wechselstrom geleitet. Der Sekundärspule kann sodann der umgespannte Wechselstrom entnommen werden. Die Spannungen *U* verhalten sich hierbei bei Wechselstrom wie die Windungszahlen *n*, d. h. $U_1 : U_2 = n_1 : n_2$. Hat die primäre Wicklung des Wandlers 100 Umwindungen und die auf demselben Kern angeordnete sekundäre Wicklung 1000 Umwindungen, so ist die

Spannung an der Sekundärseite U_2 bei bekanntem U_1 , z. B. 100 Volt, leicht zu berechnen:

$$U_1 : U_2 = n_1 : n_2;$$

$$100 \text{ Volt} : U_2 = 100 : 1000;$$

hieraus erhält man

$$U_2 = 1000 \text{ Volt.}$$

Der Ruhmkorffsche Induktor (Abb. 37) ist ein bekannter Apparat zur Erzeugung hochgespannten Wechselstromes. Auf einem Eisenkern *E*

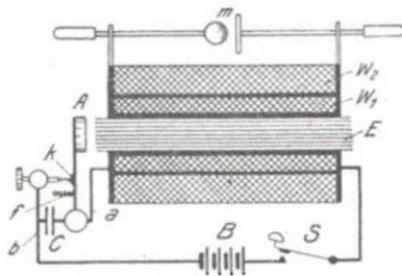


Abb. 37.

aus weichen, ausgeglühten Eisendrähten ist eine Wicklung W_1 aus verhältnismäßig dickem, isoliertem Kupferdraht in wenigen Windungen aufgebracht. Diese Wicklung ist über Leitung a , Unterbrecherkontakt k , Leitung b an eine Batterie B gelegt. Wird ein Schalter S geschlossen, so zieht Kern E den Anker A an. Hierdurch wird jedoch der Kontakt k geöffnet, so daß auch der Stromweg unterbrochen ist. Anker A wird wieder losgelassen und durch Federkraft (f) an den Gegenkontakt gelegt, wodurch der Stromkreis wieder geschlossen wird. Es arbeitet Anker A mit Kontakt k somit als Selbstunterbrecher. Bei Unterbrechung des Stromes am Kontakt k wird der Extrastrom (siehe S. 24) vom Kondensator*) C aufgenommen und hierdurch eine zu starke Funkenbildung am Unterbrechungskontakt k vermieden. Über die Wicklung W_1 , auch Primärwicklung genannt, wird eine zweite Wicklung, die Sekundärwicklung W_2 , eines langen, dünnen Drahtes mit sehr vielen Windungen gebracht.

Wie wir oben gesehen haben, ist die Spannung auf der Sekundärseite eines Spannungswandlers um so höher, je größer das Übersetzungsverhältnis, d. h. das Verhältnis der primären zur sekundären Windungszahl ist. An die Funkenstrecke m sind die Enden der sekundären Wicklung gelegt, und es kann die Länge der Funkenstrecke, die von der Sekundärspannung überbrückt wird, als Maß für die Höhe dieser Spannung dienen. Es werden Induktoren gebaut, die Funkenlängen von 1 m und darüber aufweisen und früher in der Funkentelegrafie Verwendung fanden. Für so große Induktoren sind besondere Primärstrom-Unterbrecher vorzusehen, zur gegenseitigen Isolation der Windungen des Induktors sind besondere Maßnahmen erforderlich.

1. Selbstinduktion.

Eine Spule (Abb. 38) mit 5 Windungen sei über einen Schalter s an eine Batterie B gelegt. Sobald Strom durch die Spule fließt, besteht ein elektromagnetisches Feld. Wird der Stromkreis bei s wieder unterbrochen, so verschwindet innerhalb eines Bruchteiles einer Sekunde auch das magnetische Feld. Wenn wir die Wirkung des von Windung 3 herrührenden Feldes betrachten, so ist offenbar mit dem Verschwinden des Feldes dieses Leiters eine Induktion in den Windungen 1, 2, 4 und 5 verbunden und bei weiterer Überlegung auch im Draht der Windung 3 selbst. Das gleiche gilt von Windung 4 gegen die restlichen usw. Beim Öffnen des Stromkreises wird somit durch das Verschwinden des magnetischen Kraftfeldes in sämtlichen Windungen der Spule, die das magnetische Kraftfeld hervorbrachte, eine EMK induziert, die man als EMK der Selbstinduktion bezeichnet — eine Wechselwirkung zwischen Strom und elektromagnetischem Feld.

Die EMK der Selbstinduktion, die von einem Strom i in einer Spule mit der Selbstinduktion L erzeugt wird, ist von der Änderung des Stromes i in der Zeiteinheit abhängig:

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

*) Siehe vierten Teil, Kondensatoren.

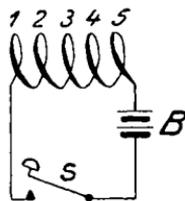


Abb. 38.

Das Minuszeichen bedeutet, daß die EMK der Selbstinduktion dem Strom i entgegenwirkt.

In einem Gleichstromkreise ist die Klemmenspannung

$$U_1 = i \cdot r, \text{ in einem Wechselstromkreise}$$

$$U_2 = i \cdot r + L \frac{di}{dt}.$$

Aus diesen Gleichungen geht hervor, daß zur Erzeugung eines Stromes i in einer Spule vom Widerstand r eine Gleichspannung $U_1 = i \cdot r$ erforderlich ist und, um einen Wechselstrom i von der gleichen Stärke durch die Spule mit der Selbstinduktion L hindurchzuschicken, braucht man eine um $L \frac{di}{dt}$ größere Spannung U_2 .

Wird die Spule mit einem Eisenkern versehen, so kann dadurch die Selbstinduktion bedeutend erhöht werden, und zwar um so mehr, je besser der Eisenschluß ist; denn dadurch, daß das magnetische Kraftfeld im Eisen verläuft, wird es sich bedeutend kräftiger ausbilden, d. h. größere Werte annehmen. Verläuft das magnetische Kraftfeld ganz in Eisen, wenn der Eisenkern geschlossen ist, so ist auch die Selbstinduktion am größten. Eine EMK der Selbstinduktion entsteht nicht nur beim Verschwinden des magnetischen Feldes, sondern auch beim Entstehen desselben. Die induzierte Spannung (und der Strom) ist beim Schließen des Stromkreises dem induzierenden Strom entgegengesetzt gerichtet, bei Stromunterbrechung fließt er jedoch in gleicher Richtung wie der induzierende Strom. Es ist somit der induzierte Strom, auch Extrastrom genannt, bestrebt, die bestehenden Stromverhältnisse aufrechtzuerhalten. Dadurch, daß der Extrastrom bei Unterbrechung des Stromkreises sich zum induzierenden Strom addiert, ist der Unterbrechungsfunke (Öffnungsfunke) bei induktiven Stromkreisen größer als der Schließungsfunke. Die Selbstinduktion ist proportional dem Quadrat der Windungszahl der Spule. Verdoppelt man die Windungszahl einer Spule, so wird hierdurch die Selbstinduktion vervierfacht. Um den Selbstinduktionskoeffizienten L einer Spule zu bestimmen, verwendet man am einfachsten eine Brückenmethode.*) Die Einheit der Selbstinduktion bezeichnet man mit Henry (H). Langgestreckte Drähte besitzen bei genügender Länge auch eine gewisse Selbstinduktion. Telegrafleitungen aus Bronze oder Kupfer z. B. haben je km etwa $L = 0,003$ Henry, Eisendrähte etwa $L = 0,015$ Henry.

Rechnerisch ist der Selbstinduktionskoeffizient schwer zu bestimmen. Für eine dünne langgestreckte Spule (Länge etwa 25 mal so groß wie der Durchmesser) ohne Eisen ist

$$L = \frac{4 \pi^2 r^2 N^2}{l \cdot 10^9}.$$

r = mittlerer Halbmesser, l = Länge der Spule, N = Windungszahl. Um bei Eisenspulen L zu bestimmen, muß B , die Kraftliniendichte, bekannt sein. Ist die Amperewindungszahl bekannt, so kann B der Schaulinie (Abb. 34) entnommen werden.

*) Vergleichsmessung, Brückenmessungen siehe Kapitel Messungen.

2. Wirbelströme.

Als Wirbelströme bezeichnet man die Ströme, die durch Induktion in ausgedehnten Metallmassen, z. B. massiven Eisenkernen, entstehen. Diese Wirbelströme, die bei Wechselstromapparaten, wie Induktoren, Wechselstromweckern usw., sehr lästig erscheinen, weil zu ihrer Erzeugung ein Aufwand elektrischer Energie erforderlich ist, der in nutzlose, manchmal gefährliche Wärme umgewandelt wird, lassen sich dadurch verhindern, daß man die Eisenmassen in der Richtung unterteilt (lamelliert), die quer zur Richtung der entstehenden Wirbelströme liegt. Zur Isolation genügt manchmal schon eine dünne Oxydschicht geglühter Drähte (siehe Ruhmkorffscher Induktor).

3. Drosselspulen.

In der Fernmeldetechnik benutzt man Selbstinduktionsspulen für verschiedene Schaltungszwecke. Man bezeichnet solche Spulen, die mit oder ohne Eisenkern gebräuchlich sind, als Drosselspulen (s. auch im vierten Teil den Abschnitt Drosselspulen).

Der scheinbare Widerstand einer Drosselspule ist für Wechselströme verschiedener Frequenzen verschieden und um so größer, je höher die Frequenz ist. Er wird durch den Selbstinduktionskoeffizienten L , der wiederum von der Windungszahl und der Beschaffenheit des Kernes abhängt, bestimmt.

Beispiel. Hat eine eisenlose Drosselspule ein L von 2 Henry und 300 Ohm Gleichstromwiderstand und ist sie an eine Wechselspannung von 1000 Perioden (Sprechstrom) gelegt, so bietet diese Spule dem Wechselstrom einen Widerstand, der nach der Formel:

$$R_w = \sqrt{R^2 + (2\pi f)^2 L^2} \text{ Ohm}$$

berechnet werden kann. Hierin bedeutet R^*) den Gleichstromwiderstand, L den Selbstinduktionskoeffizienten und f die Frequenz des Wechselstromes. Im vorliegenden Beispiel ist:

$$R^2 = 300^2 = 90000;$$

$$(2\pi f)^2 = (2 \cdot 3,14 \cdot 1000)^2 = (6280)^2 = 39400000;$$

$$L^2 = 4; L^2 \cdot (2\pi f)^2 = 4 \cdot 39400000 = 158000000;$$

$$R_w = \sqrt{90000 + 158000000} = 12600 \text{ Ohm.}$$

Wir sehen hier bereits, daß der Gleichstromwiderstand (R^2) gegenüber dem zweiten Glied unter dem Wurzelzeichen fast keinen Einfluß auf den Gesamtwiderstand hat.

Bei einer kleineren Frequenz von $f = 50$ (Starkstrom-Wechselstromfrequenz) hat die Drosselspule einen geringeren Widerstand, der sich auf gleichem Wege errechnen läßt:

$$R^2 = 300^2 = 90000;$$

$$(2\pi f)^2 = (2 \cdot 3,14 \cdot 50)^2 = (314)^2 = 98700;$$

$$L^2 = 4; (2\pi f)^2 L^2 = 4 \cdot 98700 = 396000;$$

$$R_w = \sqrt{90000 + 396000} = 697 \text{ Ohm.}$$

*) Weitere Verluste sollen unberücksichtigt bleiben.

Bei Induktorwechselstrom von 15 Perioden ist:

$$R^2 = 90000; (2\pi f)^2 = (2 \cdot 3,14 \cdot 15)^2 = 8840;$$

$$L^2 \cdot (2\pi f)^2 = 4 \cdot 8840 = 35400;$$

$$R_w = \sqrt{90000 + 35400} = 353 \text{ Ohm.}$$

Der Scheinwiderstand wird somit um so kleiner, je niedriger die Frequenz f des Wechselstromes ist. Ist $f = 0$, d. h. der Strom ein Gleichstrom, so ist in

$$R_w = \sqrt{R^2 + (2\pi f)^2 L^2}$$

das Glied

$$(2\pi f)^2 L^2 = 0 \text{ und } R_w = \sqrt{R^2} = R.$$

Haben die Drosselspulen einen Eisenkern, so sind die Verhältnisse nicht mehr so einfach, denn durch die Wärmeverluste im Eisen verschieben sich die Werte des Widerstandes und der Selbstinduktion. Der sogen. äquivalente Widerstand ist größer als der wahre Widerstand und die äquivalente Selbstinduktion kleiner als die wahre Selbstinduktion, und zwar solange die Permeabilität (μ) unverändert bleibt.

Die Gesamtverluste bei der Ummagnetisierung im Eisen setzen sich zusammen aus den Hystereseverlusten v_h und den Wirbelstromverlusten v_w :

$$V = v_h + v_w.$$

Diese Verluste erfordern einen Aufwand an elektrischer Energie, die, wie erwähnt in Wärme umgesetzt wird. Nach einer von Steinmetz durch Versuche gefundenen Formel beträgt der Hysteresewattverlust für jede vollständige Ummagnetisierung zwischen $+B$ und $-B$ je cm^3 Eisen

$$v_h = \eta \cdot B^{1,6} \cdot 10^{-7} \text{ Watt,}$$

wenn B die Induktion (Kraftlinien je cm^2 im Eisen) bedeutet; η ist eine Konstante und hat für Dynamoblech den Wert von etwa 0,0018.

Für Sprechstrom von 1000 Perioden (= 1000 Hertz) ist

$$v_h = \eta \cdot B^{1,6} \cdot 10^{-4} \text{ Watt.}$$

Die Wirbelstromverluste (je cm^3) können nach der Formel

$$v_w = \beta \cdot f^2 B^2 \cdot 10^{-7} \text{ Watt berechnet werden.}$$

Der Faktor β wird als Wirbelstromkoeffizient bezeichnet, f ist die Periodenzahl je Sekunde. Der Wirbelstromkoeffizient muß durch Versuche bestimmt werden, da er sich auch mit der Temperatur ändert.

Praktisch wird man so verfahren, daß man die Verluste für das Volumen des Eisenkernes auf dem Versuchswege bestimmten Schaulinien entnimmt.

e) Der Wechselstrom.

Der zeitliche Strom- und Spannungsverlauf technischer Wechselströme ist zumeist sinusförmig (Abb. 39). Die Sinuskurve erhält man, indem man einen Kreis k schlägt und den Durchmesser BC nach D verlängert. Der Kreis wird in gleiche Teile 1, 2, 3 usw. und die Linie

von einem Anfangspunkt C aus in die gleichen Teile I, II, III usw. geteilt. Durch die Punkte I, II, III legt man senkrechte Linien und projiziert die Punkte 1, 2, 3, 4 in gezeichneter Reihenfolge nach $1'$, $2'$, $3'$ usw. Verbindet man die so erhaltenen Punkte durch eine Linie, so erhält man eine Sinuskurve.

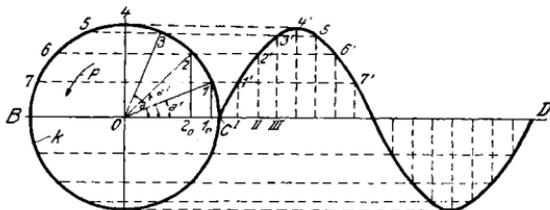


Abb. 39.

Man stelle sich vor, der Halbmesser $O-C$ des Kreises k drehe sich mit gleichmäßiger Geschwindigkeit um O in der Pfeilrichtung p . Nach einer gewissen Zeit erreicht der Halbmesser die Lage $O-1$. Die senkrechte Linie aus 1 auf OC , d. h. das Lot $1-1_0$ heißt trigonometrisch der Sinus des Winkels α^1 , wenn $OC = 1$ angenommen ist. Der Abschnitt $O-1_0$ ist der Kosinus vom Winkel α^1 . Ebenso ist $2-2_0$ der Sinus und $O-2_0$ der Kosinus vom Winkel α^2 usw. Es stellen also die Linien $I-1'$, $II-2'$, $III-3'$ usw. den Sinus der Winkel α^1 , α^2 , α^3 usw. dar.

Die physikalische Bedeutung der Sinuslinie ist folgende:

Dreht sich eine Leiterschleife s (Abb. 40) in einem homogenen magnetischen Felde \mathfrak{H} um die Achse $a-b$ mit gleichmäßiger Geschwindigkeit, so ist die im Leiter induzierte EMK proportional der Anzahl der in der Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinien. Es ist also die induzierte EMK am größten, wenn die Leiterschleife die waagerechte Lage durchläuft, da hierbei in der Zeiteinheit die größte Anzahl Kraftlinien (Z) geschnitten wird. Die Zahl der geschnittenen Kraftlinien ist $= 0$, wenn die Leiterschleife die senkrechte Lage durchläuft. Da die Zahl der geschnittenen Kraftlinien von 0 (in der Lage $1-1$) bis zu Z (in der waagerechten Lage) mit dem Sinus des Winkels α zunimmt, ist die induzierte EMK

$$e = Z \cdot \sin \alpha \frac{d\alpha}{dt},$$

wenn durch $\frac{d\alpha}{dt}$ die Geschwindigkeit der Änderung von α in bezug auf die Zeit t bezeichnet wird.

Bei gleichmäßiger Drehgeschwindigkeit ist der Winkel α aber immer proportional der Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi n$ ($n = \text{Um-}$

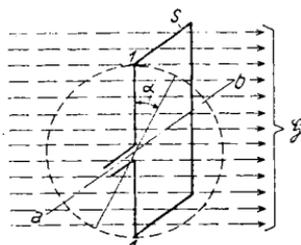


Abb. 40.

drehungszahl) und der Zeit t ; also

$$a = \omega t \text{ und } \frac{da}{dt} = \omega.$$

Es ist dann $e = Z \cdot \sin \omega t \cdot \omega$. Bezeichnet man $\omega \cdot Z$ mit E , so ist $e = E \sin \omega t$ oder $e = E \sin a$. Dieser letzte Ausdruck besagt, daß die jeweils induzierte EMK dem Winkel a proportional ist. Ist $a = 0$, so ist e auch = 0. Ist $a = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$ so ist $e = E$. Somit ist E das

Maximum der in verschiedenen Lagen induzierten EMK. Der sinusförmige Wechselstrom ändert also während der Dauer einer Sekunde nicht nur mehrmals seine Richtung, sondern auch seine Stärke. Wird auf der Nulllinie 1—2 (Abb. 41) eines rechtwinkligen Koordinatensystems in der Richtung von 1 nach 2 in einem beliebigen Maßstabe die Zeit und in der Richtung 1—3 oder 1—4 (je nach der jeweiligen Stromrichtung) in ebenfalls beliebigem Maßstabe die Stromstärke zu den genannten Zeiten aufgetragen, so bekommt man die Wechselstromkurve. Beträgt

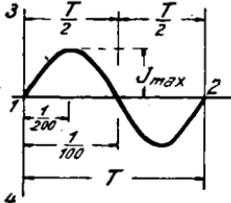


Abb. 41.

die Stromstärke nach $\frac{1}{200}$ Sekunde, von einem gewissen Nullpunkt an gerechnet, I Ampere positiver Richtung, so wird dieser Wert nach oben von der Nulllinie eingetragen. Nach $\frac{1}{100}$ Sekunde hört der Strom ganz zu fließen auf, er erreicht den Wert Null, fließt dann in der anderen, negativen Richtung, erreicht den maximalen (größten) negativen Wert bei $\frac{3}{200}$ Sekunden, um dann nach einer weiteren $\frac{1}{200}$ Sekunde wieder den Wert Null zu erreichen. In $\frac{1}{50}$ Sekunde hat der Strom somit alle positiven und negativen Werte durchschritten. Diesen Kurvenabschnitt bezeichnet man als eine Periode = 2 Stromwechsel = T = einer ganzen Welle. Da nach Abb. 41 die Strecke T der Linie 1—2 und diese wiederum dem Kreisumfang entspricht, indem man annimmt, daß der Halbmesser $O-C$ (Abb. 39) um den Mittelpunkt O sich in der Pfeilrichtung dreht, so ist eine Wellenlänge gleich dem Umfang eines Kreises = $360^\circ = 2\pi$, wenn $OC = 1$. Die Zeitdauer der positiven Halbwelle $\frac{T}{2}$ ist gleich der Zeitdauer der negativen Halbwelle $\frac{T}{2}$. Die Anzahl Perioden je Sekunde bezeichnet¹⁾ man als die Frequenz des Wechselstromes = f .

Im Beispiel der Abb. 41 ist $f = 50$ und $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50}$ Sekunde.

Hieraus folgt $T \cdot f = 1$.

Technische Verwendung finden:

Maschinenstrom von $f = 16\frac{2}{3}, 25, 50$,

Kurbelinduktor „ „ = 15, 21 je nach dem Übersetzungsverhältnis des Vorgeleges,

Polwechsler „ „ = 25, 30,

Sprechströme „ „ = 300 bis 2000

¹⁾ Wallot, J., Elektrische und magnetische Einheiten. ETZ 55, 1934, 189—190. Internationale und absolute elektrische Einheiten. ETZ 57, 1936, 813—815.

und für besondere Zwecke (drahtlose Telegrafie, Telefonie, Hochfrequenztelefonie usw.) Frequenzen von $f = 10\,000$ und darüber. Den maximalen Wert des Wechselstromes nennt man seine Schwingweite. Die Wirkungen des Wechselstromes hängen von einem Mittelwert ab. Der gewöhnliche Mittelwert ist hier allerdings nicht anzuwenden, da sowohl magnetische Wirkungen als auch Wärmewirkungen vom Quadrate des Stromes abhängig sind. Als Stromstärke bezeichnet man deshalb den sog. quadratischen oder effektiven Mittelwert, den auch die gebräuchlichen Wechselstrom-Meßgeräte anzeigen. Bezeichnet man den maximalen Wert mit I_{\max} , so ist der Effektivwert $I = I_{\max} \cdot 0,707$. Die gleiche Sinusform hat die Wechselspannung, die von den gebräuchlichen Starkstrom-Wechselstromgeneratoren geliefert wird. Wird diese Wechselspannung an einen Widerstand, z. B. Glühlampen, gelegt, so schneiden Spannungs- und Stromkurve zur gleichen Zeit die Nulllinie (Abb. 42 a). Man sagt: Strom und Spannung sind in Phase.

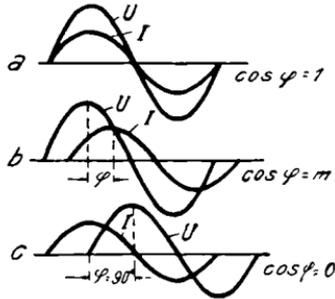


Abb. 42.

In der Abb. 42 b ist die Stromkurve I gegen die Spannungskurve U zeitlich, wie man sagt, in der Phase um den Winkel φ verschoben, und zwar eilt die Spannung um den Winkel φ dem Strom voraus, d. h. es erreicht die Spannung eher ihren Maximalwert als der Strom; die Zeit verläuft von links nach rechts.

Dieser Fall tritt ein, wenn eine Wechselspannung an eine Drosselspule (siehe S. 25) gelegt wird. Durch die Gegenkraft der Selbstinduktion ist der Strom in der Spule kleiner, als es durch den Ohmschen Widerstand bedingt wäre; es wird der Spannung ein größerer Widerstand entgegengesetzt.

Ist eine Wechselspannung an einen Kondensator (siehe S. 31) gelegt, so bleibt die Spannung am Kondensator in der Phase um 90° gegen die Stromstärke zurück, da, solange Strom in der gleichen Richtung zufließt, die Spannung am Kondensator steigen muß (Abb. 42 c).

Hat ein Stromkreis den scheinbaren Widerstand $\sqrt{R^2 + (2\pi f)^2 L^2}$, so berechnet man den Strom nach dem Ohmschen Gesetz

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (2\pi f)^2 L^2}}$$

Hieraus ist $I^2 (R^2 + \omega^2 L^2) = U^2$ und $U^2 = I^2 R^2 + I^2 \omega^2 L^2$. Geometrisch ist die Spannung U die Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks mit den Katheten RI und ωLI (Abb. 43). Den Winkel φ zwischen Spannung U und Strom I bezeichnet man als Phasenverschiebungswinkel. Aus dem Diagramm in Abb. 43 ergibt sich:

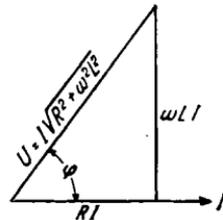


Abb. 43.

$$\omega L I = U \cdot \sin \varphi = e_w \dots (I)$$

$$R I = U \cdot \cos \varphi = e_r \dots (II)$$

Multipliziert man die letzte Gleichung mit I , so erhält man

$$R I^2 = I \cdot U \cdot \cos \varphi = e_r I.$$

Dieser Ausdruck stellt die Leistung N des Wechselstromes I mit der Spannung U dar, wobei $\cos \varphi$ als Leistungsfaktor bezeichnet wird. Den Winkel φ kann man leicht berechnen, indem man die Gleichung I durch II dividiert

$$\frac{\omega L I}{R I} = \frac{\omega L}{R} = \frac{U \cdot \sin \varphi}{U \cdot \cos \varphi} = \operatorname{tg} \varphi.$$

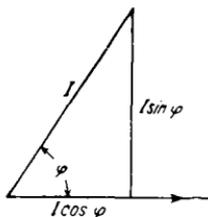


Abb. 44.

In analoger Weise wie in Abb. 43 kann man auch das Stromdiagramm zeichnen (Abb. 44) und nennt dann $I \sin \varphi$ den wattlosen Strom, $I \cos \varphi$ den Wattstrom, denn $I \cos \varphi$ fällt in der Richtung mit der Spannung zusammen, und dieser ist der die Leistung N hervorbringende Strom. $I \sin \varphi$ ist der Verluststrom der, um

90° gegen die Spannung U verschoben, keine Nutzleistung abgibt.

Die Leistung des Wechselstromes ist also nicht unbedingt, wie bei Gleichstrom, das Produkt aus Strom und Spannung. Sind Strom und Spannung nicht zu gleicher Zeit im Maximum, so ist die Leistung gegeben durch Spannung \times Strombetrag, der zur gleichen Zeit wirksam ist.

f) Elektrostatik.

Im Gegensatz zur Elektrodynamik, der Lehre von der strömenden Elektrizität, behandelt die Elektrostatik die Erscheinungen und die Gesetzmäßigkeiten der ruhenden Elektrizität, der elektrischen Ladungen. Man unterscheidet positive und negative elektrische Ladungen (Potentiale). Solche Ladungen können sich auf Leitern sowie auf Nichtleitern befinden. Besitzt ein Leiter eine elektrische Ladung, so hat diese Ladung auch ein elektrisches Feld, und die Kraftlinien des Feldes stehen senkrecht zur Oberfläche des Leiters. Die potentielle Energie der elektrischen Ladung übt eine Wirkung nach außen aus unter Vermittlung der Kraftlinien des elektrischen Feldes. Zwei gleichnamige Ladungen stoßen einander ab, zwei ungleichnamige Ladungen ziehen einander an. Die abstoßende oder anziehende Kraft kann nach dem Coulombschen Gesetz berechnet werden. Werden die Ladungen mit Q_1 und Q_2 , die Entfernung zwischen diesen mit r bezeichnet, so ist die Kraft

$$P = c \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2},$$

wobei c eine Konstante ist. Als Einheit der Elektrizitätsmenge wurde bereits auf S. 9 das Coulomb angegeben. Um einen Begriff von der Größe der elektrostatischen Elektrizitätsmenge von 1 Coulomb zu erhalten, sei hier erwähnt, daß zwei punktförmige Elektrizitätsmengen von je 1 Coulomb, die sich 1000 m voneinander befinden, eine Kraft von etwa 1000 kg aufeinander ausüben. Dieselbe Elektrizitätsmenge

fließt in einer Sekunde durch einen Draht, wenn der Strom 1 Ampere beträgt.

Wenn wir eine isolierte Metallkugel mit einem Halbmesser von r Meter mit einer Ladung Q versehen, so beträgt die Spannung auf der Kugel

$$U = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{Q}{r} \text{ Volt.}$$

Ist U und r bekannt, so kann man die Ladung

$$Q = \frac{r}{9 \cdot 10^9} \cdot U \text{ Coulomb}$$

berechnen. Die Größe $r/9 \cdot 10^9$ (eine Konstante), wird als Kapazität = Fassungsvermögen = C bezeichnet: $C = Q : U$. Die Kapazität einer Kugel vom Halbmesser r beträgt

$$C = \frac{r}{9 \cdot 10^9} \text{ Farad.}$$

Eine Kugel, die eine Kapazität von 1 Farad hat, also durch 1 Coulomb auf ein Volt geladen wird, hat einen Halbmesser $r = 9 \cdot 10^9$ Meter = 9 000 000 Kilometer.

An einer Stelle eines elektrischen Feldes ist die Spannung 1 Volt zu nennen, wenn an dieser Stelle die Elektrizitätsmenge von 1 Coulomb die potentielle Energie von 1 Joule besitzt, d. h. die Ladung von 1 Coulomb mit einer solchen Kraft vom Feld fortgetrieben oder angezogen wird, daß hierbei eine mechanische Arbeit von 1 Joule gewonnen werden könnte. 1 Joule = $1/g = 1 : 9,81$ Kilogramm-meter.

g) Kondensatoren*).

Zwei Metallplatten, die durch eine Isolationsschicht (durch ein Dielektrikum) getrennt sind, bezeichnet man als Kondensator. Wirkt eine EMK auf ein Dielektrikum, so findet im Dielektrikum eine Verschiebung von Elektrizitätsquanten statt, die aber eine gegen elektromotorische Kraft hervorbringen, durch die eine weitere Verschiebung unterbunden wird¹⁾. Wechselt die aufgedrückte EMK in Stärke und Richtung, so fließt über das Dielektrikum infolge des Verschiebungsstromes ein Wechselstrom.

Um die Wirkung des Kondensators in einem Wechselstromkreise, d. h. seine Stromdurchlässigkeit für Wechselstrom, zu verstehen, sei ein Vergleich mit einem Versuch in der Hydrodynamik gemacht. In der Mitte eines Zylinders z (Abb. 45), sei eine vollkommen elastische Membran m angebracht. Bewegt man den Kolben a rasch hin und her, so wird unter Vermittlung des elastischen Mediums C_1 , C_2 und der Membran m , der Kolben b genau die gleichen Bewegungen ausführen wie

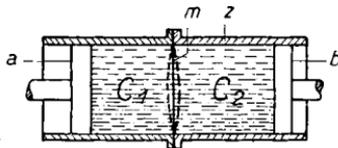


Abb. 45.

*.) Siehe auch vierten Teil, Kondensatoren.

¹⁾ Lübben, K., Anomales Verhalten des Dielektrikums von Kondensatoren bei Gleich- und Wechselstrom. Z. Fernmeldetechn. 3, 1922, 40–44.

der Kolben a , d. h. obgleich die beiden Hälften der Zylinderfüllung durch eine elastische Membran voneinander getrennt sind, wird der Druckzustand und der Entspannungszustand des Mediums C_1 auf das Medium C_2 und die Arbeit des Kolbens a auf den Kolben b übertragen.

In der Abb. 46 ist zwischen zwei Metallbelegungen 1 und 2 eine Isolierschicht 3, ein Dielektrikum, angeordnet. Ist an 1 z. B. in einem Augenblick eine negative Ladung wirksam, so influenziert

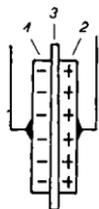


Abb. 46.

dieser negative Belag durch das Dielektrikum auf 2 eine positive Ladung oder, wie man sich das noch anders deuten kann, die negative Ladung auf 1 hält auf 2 eine gleich große positive Ladung gebunden — der negative Rest von 2 kann abwandern. Wird die an 1 liegende Ladung gleich 0, so wandert die vorher gebundene Ladung von 2 ebenfalls ab. Lädt sich der Metallbelag 1 positiv, so wird auf 2 eine gleich große negative Ladung gebunden und eine gleich große positive frei usw. Es hat also nach außen hin den Anschein, als ob sich Ladungen durch das Dielektrikum verschieben würden. Man nennt daher den Vorgang „dielektrische Verschiebung“ und den Strom „Verschiebungsstrom“.

Ein Kondensator ist somit für Wechselstrom durchlässig und sein scheinbarer Widerstand um so kleiner, je höher die Frequenz des Wechselstromes ist. Legt man Gleichstrom an einen Kondensator, so wird er geladen, und zwar auf eine Spannung, die der angelegten Spannung gleich ist. Der geladene Kondensator sperrt mit dieser gleichgroßen Gegenspannung den weiteren Stromdurchgang.

Die Stromdurchlässigkeit des Kondensators hängt außer von der Frequenz des Wechselstromes auch noch von seinem Fassungsvermögen, der Kapazität, ab, und diese wiederum ist um so größer, je größer die Flächen und je dünner die (dielektrische) Isolationsschicht ist. Auch hat der Stoff des Dielektrikums Einfluß auf die Kapazität.

Die Kapazitätseinheit ist das Farad (F). Der millionste Teil eines Farad, ein Mikrofarad (μF) = 10^{-6} Farad ist für die Fernmeldetechnik als gebräuchlichste Einheit zu betrachten.

Bezeichnet man mit U die Spannung zwischen zwei Platten eines Kondensators von der Kapazität C so ist die Ladung $Q = C \cdot U$ und die Kapazität $C = Q/U$. Die elektrische Energie ist gegeben durch das Produkt aus Ladung und Spannung:

$$W_e = \frac{1}{2} Q \cdot U.$$

Da aber $Q = C \cdot U$, so ist

$$W_e = \frac{C \cdot U^2}{2}$$

gemessen in Joule.

Die elektrische Feldstärke ist die Zahl der elektrischen Kraftlinien je Flächeneinheit (cm^2). Zwischen zwei parallelen Platten in r cm Entfernung mit der Ladung Q und der Fläche F besteht eine Feldstärke

$$\mathcal{E} = 4\pi \frac{Q}{F}$$

Die Feldstärke \mathcal{E} als Spannungsgradient $\mathcal{E} = dU/dr$ ist für zwei parallele Platten $\mathcal{E} = U/r$ und

$$\frac{U}{r} = \frac{4\pi Q}{F} \text{ oder } \frac{r}{U} = \frac{F}{4\pi Q} \text{ und } \frac{Q}{U} = \frac{F}{4\pi r}.$$

Nun ist aber $Q : U = C$, also

$$C = \frac{F}{4\pi r}$$

in absoluten Maßen (cm) ausgedrückt. Im praktischen Maßsystem ist bei einer Dielektrizitätskonstanten k des Dielektrikums

$$C = k \cdot \frac{F}{4\pi r} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \text{ Farad.}$$

Kennt man also die Fläche F der Platten in cm^2 , die Entfernung r der Platten voneinander in cm sowie die Dielektrizitätskonstante k des Dielektrikums, so kann man die Kapazität eines Plattenkondensators berechnen.

Verhältnismäßig einfach läßt sich noch die Kapazität eines Zylinderkondensators berechnen. Praktisch wird man Kapazitäten am zweckmäßigsten durch Vergleichsmessung mit einem Normalkondensator feststellen.

Nachstehend sind die Dielektrizitätskonstanten (bezogen auf das Vakuum = 1) einiger gebräuchlichen Isolierstoffe angeführt:

Ebonit — 2,0 bis 3,0	Kautschuk — 2,12	Paraffin — 1,9 bis 2,2
Flintglas — 6,6 bis 9,9	Kautschuk (vulkan.) — 2,69	Porzellan — 4,4 bis 5,3
Glimmer — 4 bis 8	Luft (20° C) — 1,00053	Wandleröl — 2,2 bis 2,5
Guttapercha — 2,8 bis 4,2	Papier — 1,8 bis 2,6	Schwefel — 2,42

h) Wechselstromkreis mit Selbstinduktion und Kapazität.

Ist in einem Stromkreis ein Kondensator von der Kapazität C Farad eingeschaltet und beträgt der Gleichstromwiderstand R Ohm, so berechnet sich der Gesamtwiderstand aus der Formel:

$$R_g = \sqrt{R^2 + \frac{1}{(2\pi f)^2 C^2}} \text{ Ohm.}$$

Aus dieser Formel ist zu ersehen, daß der Widerstand um so kleiner ist, je höher der Wert von C und f ist.

Den Kondensatorwiderstand allein berechnet man aus der Formel:

$$R_e = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Beispiel: Ist $C = 2 \mu F = 2 \cdot 10^{-6}$ Farad, so ist bei einer Periodenzahl von $f = 800$

$$R_e = 1 : (2\pi \cdot 800 \cdot 2 \cdot 10^{-6}) = 100 \text{ Ohm.}$$

Besitzt ein Stromkreis Selbstinduktion und Kapazität in Hintereinanderschaltung, so errechnet man den Gesamtwiderstand aus der Formel:

$$R_g = \sqrt{R^2 + \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}\right)^2}.$$

Es kann vorkommen, daß für bestimmte Werte von L und C und eine bestimmte Periodenzahl die Differenz:

$$2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C} = 0 \text{ wird.}$$

Für diesen Fall ist der gesamte Widerstand gleich dem Ohmschen Gleichstromwiderstand R . Diesen Fall nennt man Resonanz.

Aus der Formel:

$$2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C}$$

kann der Wert für f , die Resonanzfrequenz, berechnet werden.

Aus $2\pi f^2 L = \frac{1}{2\pi C}$ berechnet man

$$f^2 = \frac{1}{(2\pi)^2 LC} = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{LC},$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{LC}} = \text{die Resonanzfrequenz.}$$

Hieraus ist zu erklären, daß L und C enthaltende Stromkreise unter Umständen für einen Wechselstrom bestimmter Frequenz nur den Gleichstrom- (Ohmschen) Widerstand aufweisen.

Schaltet man n Kondensatoren mit einer Kapazität von je $C \mu F$ hintereinander, so beträgt die Gesamtkapazität $C_g = \frac{C}{n} \mu F$. Schaltet man die gleichen Kondensatoren parallel, so ist $C_g = C \cdot n \mu F$.

II. Stromquellen der Fernmeldetechnik.

a) Die primären oder galvanischen Elemente¹⁾.

Galvanische Elemente sind die ältesten Stromquellen, die in der Technik der elektrischen Telegrafie, des Fernsprechens und des elektrischen Signalwesens in großem Umfange gebraucht wurden. In Deutschland sind im Jahre 1938 über 300 Millionen Braunsteinelemente hergestellt worden.

Das erste galvanische Element (Cu—Säure—Zn) wurde vom ital. Physiker Volta 1794 gebaut. Es folgten Verbesserungen und neue Erfindungen von Daniell 1826, Bunsen 1841, Leclanché 1865.

¹⁾ Arndt, K., Ein halbes Jahrhundert Trockenelemente. ETZ 60, 1939, 1065—1067. — Jumeau, L., Die elektrischen Elemente nach den neuen Patentschriften. Rev. Gen. Electr. 45, 1939, 397—403.

In jedem primären Element wird chemische Energie in elektrische umgewandelt. Zu jedem Element gehören 2 Elektroden (Metalle, Kohle) und der Elektrolyt. Das galvanische Element gibt elektrischen Strom ab und verbraucht (zersetzt) dabei seine Elektroden im Elektrolyt. Ist das Elektrodenmaterial verbraucht, so hört auch die Stromabgabe auf. Durch sekundäre Prozesse innerhalb des Elementes und Verunreinigung werden jedoch Elemente unbrauchbar, bevor das Elektrodenmaterial aufgebraucht ist. Bei Betrachtungen über die Wirkungsweise der Elemente ist zu beachten, daß die chemischen Vorgänge, die der Ursprung der Stromabgabe sind, durch verschiedene Nebenerscheinungen begleitet sind. Unebene und unreine Zinkplatten oder Becher können lokale Zersetzungen im Element verursachen, die das Element, wie erwähnt, auch bei Nichtgebrauch vorzeitig zerstören. Das Amalgamieren (Auftragung einer Quecksilberschicht auf das Zink auf galvanischem Wege) verhindert diesen Vorgang zum Teil.

Ein anderer Vorgang, der bei der Zusammenstellung der Elemente berücksichtigt werden muß, ist die Polarisation. Diese besteht, kurz ausgedrückt, in der Bildung einer Gegenspannung innerhalb des Elementes, welche der ursprünglichen EMK entgegenwirkt und diese vermindert. Bei der Zersetzung des Elektrolyts wird in den meisten Elementen Wasserstoff gebildet. Da Wasserstoff in den chemischen Reihen zu einem Metall (in gasförmigem Zustande) zählt und Metalle im Element selbst in der Richtung des Stromes sich bewegen, wandern die Wasserstoff-Ionen zur Anode*) und werden dort als Moleküle abgeschieden. Dieser abgeschiedene Wasserstoff als Metall bildet mit dem Material der Anode ein elektrisches Paar mit einer EMK, die der EMK des Elements entgegengesetzt gerichtet ist. Je mehr Wasserstoff sich dann beispielsweise auf Kupfer oder Kohle ansammelt, um so größer wird die Gegen-EMK und um so kleiner die Klemmenspannung des Elementes. Man sagt, das Element wird polarisiert. Dieser Vorgang der Polarisation kann unter Umständen sehr rasch vor sich gehen. In den früher in der Fernmeldetechnik viel gebräuchlichen Polarisationszellen (zwei Platindrähtchen in einem zugeschmolzenen Glasröhrchen mit angesäuertem Wasser, $H_2SO_4 + H_2O$) ging der Vorgang der Polarisation fast augenblicklich vor sich. Siehe auch Abschnitt „Alkalische Gegenzellen“. Der Polarisationsstrom kann durch folgenden Versuch beobachtet werden (Abb. 47):

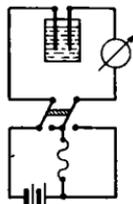


Abb. 47.

In ein Gefäß mit angesäuertem Wasser sind zwei Platindrähte getaucht. Aus der Batterie wird über einen Schalter ein Strom in diese Zelle gesandt. Nach kurzer Zeit legt man den Schalter um und beobachtet am Strommesser einen Strom, der in entgegengesetzter Richtung fließt als beim Laden der Zelle.

*) Als Anode bezeichnet man diejenige Elektrode eines galvanischen Elements, von welcher der Strom ausgeht (im inneren Stromkreis zufließt). Als Träger des Stromes wandern aber die Elektronen und negativ geladenen Ionen von der Kathode zur Anode (des äußeren Stromkreises), also entgegengesetzt der üblichen Stromrichtungsbezeichnung.

Bei den gebräuchlichen Elementen, in denen eine Polarisation zu befürchten ist, wird aus diesem Grunde der Anode ein Stoff beigefügt, der die Eigenschaft besitzt, den Wasserstoff zu binden, z. B. beim Beutel- und beim Trockenelement der Braunstein MnO_2 , welcher, reich an Sauerstoff, den Wasserstoff zu Wasser oxydiert und selbst dabei auf eine niedrigere Oxydationsstufe reduziert wird. Diesen Vorgang nennt man Depolarisation und den betreffenden Stoff Depolarisator. Am wirksamsten sind die flüssigen Depolarisatoren, wie z. B. in Elementen mit zwei Flüssigkeiten das Kupfervitriol, welches durch eine chemische Reaktion den Wasserstoff bindet, wobei Kupfer als Metall ausgeschieden wird. Beim Luft-Sauerstoffelement wird der Sauerstoff der Luft als Depolarisator verwendet. Siehe S. 38.

Die gebräuchlichsten galvanischen Elemente¹⁾ sind die sog. Zink-Kohle- oder Braunsteinelemente. Das sind Zink-Salmiaklösung-Kohle-Zellen, ausgeführt als Beutelement, als Trockenelement oder als Füll- (bzw. Lager-) Element mit Braunstein (MnO_2) als Depolarisator.

Der Strom fließt innerhalb des Elementes vom Zink zur Kohle und außerhalb des Elementes von der Kohle zum Zink. Je stärkere Ströme man dem Element entnimmt oder je länger man Strom entnimmt, um so mehr steigt der innere Widerstand des Elementes an, um so schneller sinkt die Spannung an den Klemmen, d. h. um so schneller wird das Element verbraucht.

Zink-Kohle-Elemente dürfen nicht dauernd unter starkem Strom stehen oder gar kurzgeschlossen werden, da sie dann längere Zeit brauchen, um sich zu erholen, d. h. zu depolarisieren. Elemente dürfen nicht warm stehen, sondern möglichst im Kellerraum bei mittlerer Temperatur. Reserveelemente lagert man kalt, denn bei Trockenelementen geht auch bei offenen Klemmen ein Zersetzungsprozeß vor sich, und zwar um so schneller, je höher die Temperatur des Lager-raumes ist.

Elemente mit großen Elektroden und größeren Mengen an Elektrolyt können höhere Stromstärken abgeben oder sie geben geringere Ströme längere Zeit ab als kleine Elemente. Man sagt, die großen Elemente haben größere Kapazität. Die Spannung eines Elementes ist aber immer unabhängig von der Größe und nimmt ab mit dem Alter des Elementes.

Aus der Abb. 53 ist der Spannungsabfall einer flachen Taschenlampenbatterie (drei kleine Zink-Kohle-Elemente in Hintereinanderschaltung) zu ersehen, gemessen bei einer Entladung von täglich 10 Minuten über 15 Ohm äußeren Widerstand. Ist die Batterie bei 3 Volt Klemmenspannung noch brauchbar, so hat sie bei dieser Benutzungsart insgesamt 150 Minuten = 150:10 = 15 Tage vorgehalten.

1. Das Beutelement (Abb. 48)

ist praktisch die heute gebräuchliche Ausführung des Leclanché-Elementes. Mittlere Spannung etwa 1,4 Volt. Die Kohle (Abb. 49) ist mit der Depolarisationsmasse (Graphit und MnO_2) zu einem Zylinder ge-

¹⁾ Drücker, K., Galvanische Elemente und Akkumulatoren. Leipzig 1932, 425 S.

preßt, mit einem Nesseltuch od. dgl. umwickelt (Beutel) und verschnürt. Das Zink wird in Form eines zylindrisch gerollten Bleches verwendet. Um ein Kriechen des Salmiaksalzes einzugrenzen, ist der Kohlenstab in Paraffin gekocht und das Glas am oberen Rande paraffiniert. **Das Ansetzen des Beutelementes** geschieht folgendermaßen. Das Glas wird mit möglichst reinem Wasser (besser destilliertes Wasser) bis zur Hälfte gefüllt und die vorgeschriebene Menge Salmiaksalz (z. B. 150 g für ein 25 cm hohes Element und 75 g für ein 16 cm Element) in dem Wasser gelöst. Der Beutel der Kohlelektrode muß etwa 1 cm über den Elektrolyt hinausragen. Gebrauchte



Abb. 48.



Abb. 49.

Elemente können nach erfolgter Säuberung mit doppelter Salzmenge wieder angesetzt werden.

2. Das Trockenelement.

Die Zusammensetzung der Trocken- und Lagerelemente ist dieselbe wie die der Beutelemente. An Stelle des flüssigen Elektrolyts wird eine eingedickte Masse verwendet, die ebenfalls eine Salmiaklösung enthält. Trockenelemente, Abb. 50, sind gebrauchsfertig. Lagerelemente, Abb. 51, müssen mit Wasser aufgefüllt werden, 12 Stunden stehen und sind dann nach Abschütten des überflüssigen Wassers und Verschließen der Eingußöffnung mit dem Kork gebrauchsfertig wie gewöhnliche Trockenelemente. Abb. 52 zeigt einen Schnitt durch ein Füll- oder Lagerelement. Es bedeuten: 1 Kork zum Verschuß der Füllöffnung, 2 Pluspolklemme, 3 Draht zum Minuspol, 4 Entlüftungsröhrchen,



Abb. 50.



Abb. 51.

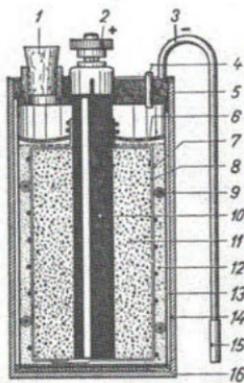


Abb. 52.

5 Vergußmasse, 6 Fließpapierscheibe, 7 Wickelfaden, 8 Puppenwicklung, 9 Zentrierperle, 10 Kohlestift, 11 Depolarisationsmasse, 12 Füllmasse (Elektrolyt), 13 Zinkbecher, 14 Pappbecher, 15 Schutzschlauch, 16 Bodenverguß. EMK beider Elemente etwa 1,5 Volt. Der innere

Widerstand ändert sich mit der Größe und dem Alter des Elementes, im Durchschnitt beträgt er etwa 0,1 Ohm bei größeren und 0,3 Ohm bei kleineren Elementen.

3. Taschenlampenbatterien.

Eine außerordentlich große Verbreitung haben Kleinbeleuchtungsbatterien erfahren, die auch infolge ihrer überall erhältlichen gleichen Form und Größe in der Fernmeldetechnik Eingang gefunden haben.

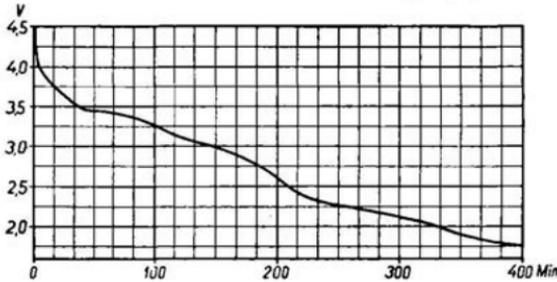


Abb. 53.

Die kleinen Trockenelemente (20 mm \varnothing , 60 mm Höhe) können mit verhältnismäßig hohen Stromstärken belastet werden. Die Grenzen der Belastung liegen etwa zwischen 200 und 300 mA, je nach Belastungsdauer. Die Abb. 53 veranschaulicht die Entladekurve einer Taschenlampenbatterie normaler Ausführung mit 3 Elementen.

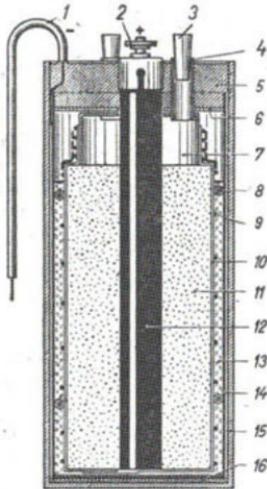


Abb. 54.

Gleiche oder ähnliche Trockenelemente werden auch für die Herstellung von Anodenbatterien verwendet, die bei tragbaren Geräten trotz der Entwicklung der Netzanschlußgeräte Verwendung finden.

4. Luftsauerstoff-Element (Abb. 54).

Da der wirksame Bestandteil in den Leclanché-Elementen der Sauerstoff des Braunsteins ist, wurde schon seit langer Zeit versucht, an Stelle des im Braunstein chemisch gebundenen Sauerstoffes den Luftsauerstoff zur Depolarisation auszunutzen. Es geschieht dies neuerdings auf dem Wege über die sog. „Aktivkohle“. Die Aktivkohle hat die Eigenschaft, den Sauerstoff der Luft schnell aufzunehmen, aber auch leicht wieder an den Wasserstoff abzugeben. Der Aufbau der Elemente ist grundsätzlich derselbe wie der von

Trockenelementen; es müssen natürlich Öffnungen vorgesehen sein, die den Luftsauerstoff an die positive Elektrode (Kohlebeutel) heranzuführen. In der Abb. 54 bedeuten: 1 und 2 die negative und die positive Polklemme, 3 den Belüftungsstopfen, 4 die Belüftungstülle, 5 die Vergußmasse, 6 eine Abdeckscheibe, 7 die Belüftungskappe, 8 Zentrierperlen, 9 den Wickelfaden, 10 die Puppenwicklung, 11 die Depolarisationsmasse, 12 den Kohlestift, 13 den Elektrolyt, 14 den Zinkbecher, 15 den Pappbecher, 16 den Bodenverguß. Die offene Spannung dieser Elemente beträgt etwa 1,4 Volt, ihre Belastbarkeit bewegt sich in denselben Grenzen wie die der Braunstein-Elemente; auch der innere Widerstand hat die gleiche Größenordnung.

Die Entladungskurven von Luftsauerstoff-Elementen sind grundsätzlich dadurch charakterisiert, daß sie zwischen 1 und 0,8 Volt einen ziemlich waagerechten akkumulatorenähnlichen Verlauf haben. Die Abb. 55 zeigt den Spannungsverlauf beim Luftsauerstoff-Element (*L*) und beim Füllelement (*F*) bei ununterbrochener Entladung über 15 Ohm äußeren Widerstand.

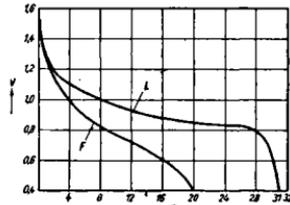


Abb. 55.

Die Verwendbarkeit von Luftsauerstoff-Elementen ist an bestimmte räumliche Bedingungen gebunden, da bei vollkommen luftdichtem Abschluß natürlich die Ausnutzbarkeit des Elementes stark sinkt.

Bei verschiedenen Typen von Luftsauerstoff-Elementen sind größere oder kleinere bzw. eine größere Anzahl von Belüftungsöffnungen vorgesehen, die bei der Lagerung ohne Stromentnahme geschlossen bleiben. Je nach entnommener täglicher Strommenge sind diese Öffnungen entsprechend der Gebrauchsanweisung freizulegen.

5. Schaltungen von Elementen.

Die Stromstärke eines Elementes ist bedingt durch seine EMK, den inneren (r) und äußeren (R) Widerstand und wird nach dem Ohmschen Gesetz

$$I = \frac{\text{EMK}}{r + R}$$

berechnet. Von diesem Strom I wird im Element selbst verbraucht $I \cdot r$ und im äußeren Schließungsdraht $I \cdot R$. Es sind dieses die Spannungsabfälle im Element und im äußeren Schließungskreis. Die Summe dieser Spannungsabfälle ist gleich der EMK,

$$\text{d. h. EMK} = I \cdot r + I \cdot R$$

oder

$$(\text{EMK} - I \cdot r) = I \cdot R = U.$$

U ist die Klemmenspannung des Elementes. Wird ein Element mit einer EMK von 1,5 Volt und einem inneren Widerstand von 0,25 Ohm kurzgeschlossen, d. h. der negative Pol mit dem positiven Pol durch einen Draht von äußerst geringem Widerstand verbunden, so fließt in

diesem Stromkreis ein Strom

$$I = \frac{\text{EMK}}{r} = \frac{1,5}{0,25} = 6 \text{ Ampere.}$$

R ist klein und darum in der Rechnung vernachlässigt. Die ganze Spannung des Elementes wird im Element selbst verbraucht.

Werden vier solcher Elemente hintereinander geschaltet (Abb. 56), so addieren sich sowohl die elektromotorischen Kräfte als auch die inneren Widerstände. Die Kurzschlußstromstärke ist in diesem Fall ebenfalls



$$I = \frac{1,5 \cdot 4}{0,25 \cdot 4} = 6 \text{ Ampere.}$$

Obgleich vier Elemente hintereinander geschaltet sind, erhalten wir trotzdem die Kurzschluß-Stromstärke eines Elementes.

Anders verhält sich die Kurzschluß-Stromstärke bei Parallelschaltung. Werden vier Elemente parallel geschaltet (Abb. 57), so ist die EMK dieser Batterie aus vier Elementen immer noch 1,5 Volt. Der innere Widerstand der ganzen Batterie ist jedoch nur $\frac{1}{4}$ des Widerstandes eines Elementes, d. h. $0,25 : 4$; die Stromstärke bei Kurzschluß der Batterie ergibt sich zu:



$$I = \frac{1,5}{\frac{0,25}{4}} = \frac{1,5 \cdot 4}{0,25} = 24 \text{ Ampere.}$$

Abb. 57.

Dieses Bild ändert sich wesentlich, sobald der Strom der Elemente zur Arbeitsleistung in einem äußeren Schließungskreis herangezogen wird. Bei einem äußeren Widerstand von 0,1 Ohm erhält man bei Hintereinanderschaltung von vier Elementen

$$I = \frac{1,5 \cdot 4}{(0,25 \cdot 4) + 0,1} = 5,45 \text{ Ampere}$$

bei Parallelschaltung

$$I = \frac{1,5}{\frac{0,25}{4} + 0,1} = \frac{1,5 \cdot 4}{0,25 + 0,4} = \frac{6}{0,65} = 9,2 \text{ Ampere.}$$

Beträgt der äußere Widerstand 100 Ohm, so ist bei Hintereinanderschaltung von vier Elementen

$$I = \frac{1,5 \cdot 4}{(0,25 \cdot 4) + 100} = \frac{6}{101} = 0,06 \text{ Ampere}$$

bei Parallelschaltung

$$I = \frac{1,5}{\frac{0,25}{4} + 100} = \frac{1,5 \cdot 4}{0,25 + 400} = \frac{6}{400,25} = 0,015 \text{ Ampere.}$$

Aus den vier letzten Beispielen geht hervor, daß es zur Erzielung einer möglichst großen Stromstärke zweckmäßig ist, die Elemente bei kleinem äußeren Widerstande parallel und bei großen äußeren Widerständen hintereinander zu schalten.

6. Leistung der Elemente.

Die größte nutzbare Stromstärke erhält man aus einer Batterie, wenn man den äußeren Widerstand des betreffenden Stromkreises gleich dem inneren Widerstand der Batterie macht. Es sind in diesem Fall Elemente so zu schalten, daß der innere Widerstand der Batterie nahezu gleich dem Widerstande der Leitungen und der Apparate ist. Der Nutzeffekt oder Wirkungsgrad der Batterie ist bei Gleichheit des inneren und des äußeren Widerstandes allerdings nur 50 vH, denn die Hälfte der Leistung wird in der Batterie selbst verbraucht.

Je größer der äußere Widerstand gegenüber dem inneren, um so größer der Nutzeffekt, wie auch aus dem Gesetz des Spannungsabfalles hervorgeht.

Es widersprechen sich somit die beiden Bedingungen der größten nutzbaren Stromstärke und der größten nutzbaren Leistung. Man wird daher von Fall zu Fall zu entscheiden haben, wieviel Elemente zu nehmen sind und wie die Gruppierung erfolgen soll. Anschaffungskosten sind dabei auch zu berücksichtigen. Abb. 58 zeigt eine Gruppenschaltung von Elementen.

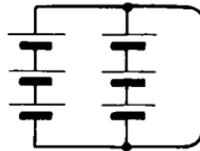


Abb. 58.

Zur Gegenüberstellung der Kapazität*) der Elemente in Amperestunden und der Leistung sei nochmals ein Beispiel unter Vernachlässigung des äußeren Widerstandes angeführt. Die Kapazität eines Elementes mit einer EMK von 2 Volt bei 100 Stunden Stromabgabe und einer Stromstärke von etwa 0,1 Ampere ist $= 0,1 \cdot 100 = 10$ Amperestunden. Bei Hintereinanderschaltung von 10 solchen Elementen fließt gleichfalls nur ein Strom von 0,1 Ampere; mithin werden in 100 Stunden ebenfalls $0,1 \times 100 = 10$ Amperestunden geliefert. Schaltet man jedoch die Elemente parallel, so verzehnfacht sich die Kapazität in Amperestunden. Es ist dann die gesamte Kapazität $0,1 \times 10 \times 100 = 100$ Amperestunden.

Die Leistung ist bei Hintereinander- und bei Parallelschaltung von 10 Elementen die gleiche, nämlich:

bei Hintereinanderschaltung

$$10 \text{ Amperestunden} \times 20 \text{ Volt} = 200 \text{ Wattstunden,}$$

bei Parallelschaltung

$$100 \text{ Amperestunden} \times 2 \text{ Volt} = 200 \text{ Wattstunden.}$$

7. Berechnung der größten nutzbaren Stromstärke.

Wenn n Elemente mit je einer EMK von e Volt hintereinander geschaltet werden und der innere Widerstand eines jeden dieser Elemente r Ohm beträgt, so ist die EMK der Batterie $= e \cdot n$ und der innere Widerstand der Batterie $= n \cdot r$. Schaltet man z Batterien zu

je n Elementen parallel, so ist der gesamte innere Widerstand $\frac{n \cdot r}{z}$.

Bei einem äußeren Widerstand R ist der Gesamtwiderstand $\frac{n \cdot r}{z} + R$.

*) Fassungsvermögen.

und der Strom nach dem Ohmschen Gesetz

$$I = \frac{e \cdot n}{\frac{n \cdot r}{z} + R}$$

Beispiel: 20 Elemente mit einer EMK von 1,5 Volt und einem inneren Widerstand $r = 0,2$ Ohm sind zu einer Batterie zusammengeschaltet, die aus 2 Reihen zu 10 Elementen besteht. Diese Batterie ist an einen äußeren Widerstand R von 50 Ohm gelegt. Wie groß ist der Gesamtstrom im äußeren Stromkreis und in jeder Batteriereihe?

Nach der Formel ist der Gesamtstrom

$$I = \frac{e \cdot n}{\frac{n \cdot r}{z} + R} = \frac{1,5 \cdot 10}{\frac{10 \cdot 0,2}{2} + 50} = \frac{15}{1 + 50} = \text{etwa } 0,3 \text{ Ampere.}$$

In jeder Reihe fließt ein Strom

$$i = \frac{I}{2} = \frac{0,3}{2} = 0,15 \text{ Ampere.}$$

Beispiel: 20 Elemente von je 1,5 Volt und 0,2 Ohm inneren Widerstand sind so zu gruppieren, daß eine größtmögliche Stromstärke bei 0,25 Ohm äußerem Widerstand erzielt wird.

Bedingung ist für diesen Fall, daß

$$R = \frac{n r}{z} \text{ oder } z = \frac{n r}{R} \text{ ist,}$$

d. h. äußerer Widerstand = innerer Widerstand. Es ist:

z = Anzahl der parallel geschalteten Reihen,

n = Anzahl der Elemente in jeder Reihe,

$n \cdot z$ ist offenbar = 20; $z = \frac{20}{n}$.

In unserem Beispiel ist aus der Bedingungsgleichung

$$z = \frac{0,2 n}{0,25},$$

$$z \text{ ist aber auch } = \frac{20}{n},$$

woraus

$$\frac{20}{n} = \frac{0,2 n}{0,25}$$

Hieraus errechnet sich

$$0,2 \cdot n^2 = 20 \cdot 0,25$$

$$n = \sqrt{\frac{20 \cdot 0,25}{0,2}} = \sqrt{25}; n = 5.$$

In jeder Reihe sind somit $n = 5$ Elemente; das ergibt bei 20 Elementen $z = 4$ Reihen.

b) Akkumulatoren oder Sammler.

Akkumulatoren oder Sammler sind galvanische Elemente, deren Elektroden nach der Entladung durch einen in umgekehrter Richtung wie bei der Entladung hineingeleiteten Strom wieder in den ursprünglichen Zustand zurückgeführt werden können. Man kann also in ihnen die von einem Gleichstromerzeuger gelieferte Energie aufspeichern, um sie später zu beliebiger Zeit oder auch an einem anderen Orte wieder abzugeben. Steht zum Laden des Akkumulators nur Wechselstrom zur Verfügung oder soll durch den Akkumulator ein Wechselstromnetz gespeist werden, so muß eine Umformung des Stromes vorgenommen werden. Von den zahlreichen vorgeschlagenen und theoretisch möglichen Bauarten eines Akkumulators haben sich in der Praxis nur zwei durchgesetzt:

1. der Blei-Akkumulator mit Schwefelsäure als Elektrolyt,
2. der Stahl-Akkumulator mit Kalilauge als Elektrolyt.

1. Der Blei-Akkumulator.

Theorie. Taucht man zwei Bleiplatten, von denen die eine einen Überzug aus Bleidioxid (PbO_2) von schwarzbrauner Farbe, die andere einen solchen aus fein verteiltem schwammigem Blei (Pb) von grauer Farbe hat, in ein Gefäß mit verdünnter Schwefelsäure (H_2SO_4) und verbindet sie über einen äußeren Widerstand, so fließt in diesem ein Strom von der PbO_2 -Platte (+-Platte) zur Pb -Platte (-Platte), Abb. 59 rechts. Durch den Elektrolyt, im Innern der Zelle, fließt der Strom von der -Platte zur +-Platte, wobei die Schwefelsäure in H_2 und SO_4 zerlegt wird. H_2 wandert in der Stromrichtung und es bildet sich an beiden Elektroden Bleisulfat ($PbSO_4$) nach der Formel:

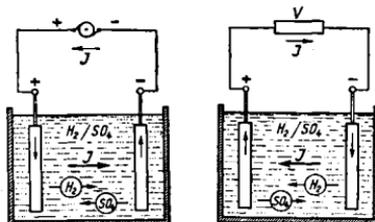
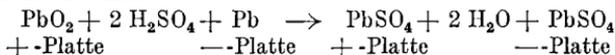
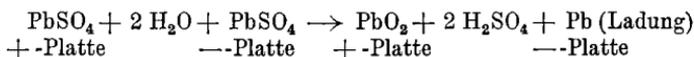


Abb. 59.



Die Zelle liefert solange einen Strom, bis die wirksamen Massen der Platten PbO_2 und Pb , in $PbSO_4$ überführt sind (Entladung). Schickt man nun einen Strom in umgekehrter Richtung durch die Zelle, Abb. 59, links, so werden die Elektroden nach derselben Gleichung, nur von rechts nach links gelesen, wieder in den ursprünglichen Zustand zurückverwandelt:



Bei der Entladung wird dem Elektrolyt Schwefelsäure entzogen und Wasser gebildet. Die Dichte des Elektrolyt sinkt daher. Umgekehrt

wird bei der Ladung dem Elektrolyt Wasser entzogen und Schwefelsäure gebildet, die Dichte des Elektrolyt steigt daher.

2. Aufbau des Akkumulators.

Platten. Um eine Platte zu bilden, müssen die wirksamen Massen auf einem Träger untergebracht werden, der verschiedene Formen erhalten kann. Für Akkumulatoren, die in der Fernmeldetechnik verwendet werden, kommen in Betracht:

Positive Groboberflächenplatten. Der Träger ist ein aus Weichblei gegossener Körper, der mit zahlreichen feinen Rippen versehen ist. Die Abb. 60 zeigt ein Stück einer Groboberflächen-Platte. Auf der durch die Rippen gebildeten großen Oberfläche wird durch ein elektromechanisches Verfahren (Formation) die wirksame Masse in dünner Schicht aus dem Blei selbst gebildet. Die ganze positive Groboberflächenplatte ist in Abb. 61 zu sehen.

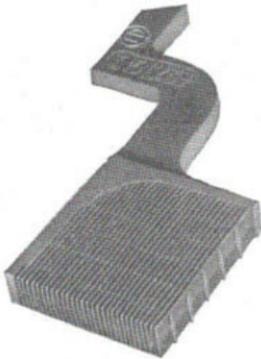


Abb. 60.



Abb. 61.

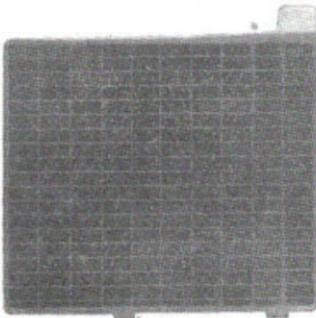


Abb. 62.

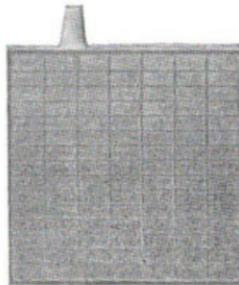


Abb. 63.

Positive und negative Gitterplatten. Der Träger ist ein gitterförmiger Körper aus Hartblei, in dessen Felder Bleiverbindungen in Form einer Paste eingetragen werden. Durch die Formation werden diese in PbO_2 bzw. Pb umgewandelt. Positive und negative Platten unterscheiden sich nur durch die Gitterform und die Zusammensetzung der Paste. Abb. 62 zeigt die positive, Abb. 63 die negative Gitterplatte.

Positive Rahmen- oder Masseplatten (Abb. 64). Der Träger ist ein großfeldriger Rahmen aus Hartblei zur Aufnahme der wirksamen Masse.

Negative Kastenplatten. Der Träger ist ein weitmaschiges Gitter, das auf beiden Seiten durch fein gelochtes Bleiblech abgedeckt ist. Diese Platte wird in der Regel mit der Großoberflächenplatte als positiver Platte verwendet. Aus der Abb. 65 ist der Aufbau der Kastenplatte zu erkennen. Abb. 66 zeigt die Gesamtform.

Gefäße. Zur Aufnahme der Platten und des Elektrolyts dienen Glasgefäße, Holzkästen mit Bleiblech ausschlag, Hartgummikästen oder Steinzeugkästen. Wegen der Bruchgefahr können Glasgefäße nur bis zu einer gewissen Zellengröße (etwa 500 Ah Kapazität bei 10stündiger

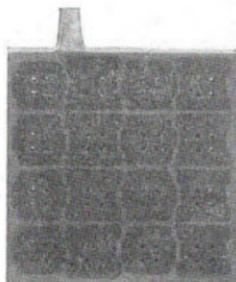


Abb. 64.

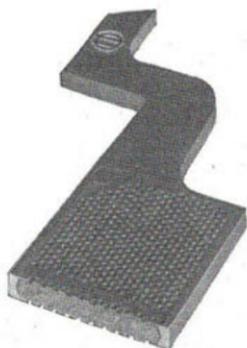


Abb. 65.

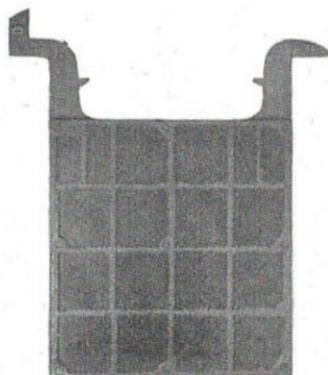


Abb. 66.

Entladung) verwendet werden. Durch Parallelschalten mehrerer Einzelzellen in Glasgefäßen lassen sich Zweifach- und Dreifachzellen bilden. Bei Holzkästen mit Bleiblech ausschlag werden die Platten auf Glasstützscheiben aufgehängt.

Einbau und Plattentrennung. Großoberflächenplatten hängen mit seitlichen Nasen auf dem Gefäßrand, Abb. 67, oder auf Einbuchtungen des Gefäßes, bei Holzkästen auf Glasstützscheiben. Gitter-

und Rahmenplatten stehen auf Vorsprüngen am Boden des Gefäßes. Die Platten werden so eingebaut, daß immer eine positive Platte zwischen zwei negative Platten kommt, Abb. 68. Die Endplatten sind

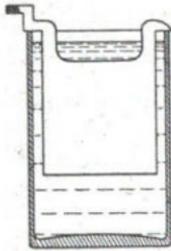


Abb. 67.

immer negativ; jede Einzelzelle hat also eine negative Platte mehr als positive (nur einige wenige Sonderausführungen haben eine positive und eine negative Platte). Zur Plattentrennung dienen Glasstäbe, Hartgummistäbe, besonders behandelte Holzbrettchen oder Rippen, die in die Wände der Glasgefäße eingepreßt sind. Die Platten gleicher Polarität werden an eine gemeinsame Bleileiste

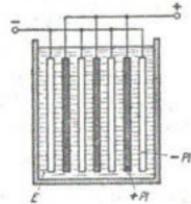


Abb. 68.

oder Polbrücke angeschlossen. Die Verbindungen dürfen nicht mit den üblichen Lötmitteln hergestellt werden, da diese nicht säurebeständig sind, sondern müssen aus Blei bestehen; zur Herstellung wird eine sehr heiße Flamme benötigt, meist ein Knallgasgebläse. Bei größeren Batterien werden diese Arbeiten durch einen Akkumulatorenfachmann ausgeführt. Da das aber mit gewissen Umständen verknüpft ist und auch Kosten verursacht, wendet man bei kleineren Anlagen vielfach die fertig verlötete Ausführung an; bei dieser sind die Platten gleich im Lieferwerk zu Sätzen zusammengebaut und

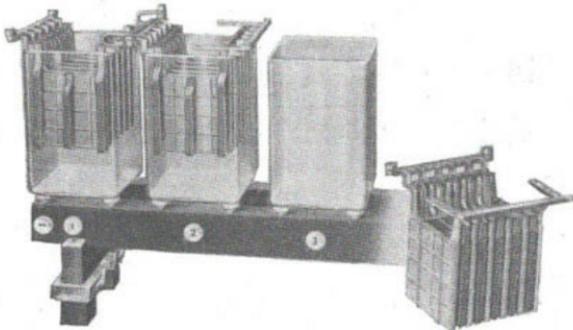


Abb. 69.

brauchen an Ort und Stelle nur in die Gefäße eingehängt zu werden. Siehe Abb. 69. Die einzelnen Zellen werden dann durch Schraubverbindungen hintereinandergeschaltet, alle Lötarbeiten sind vermieden.

Elektrolyt. Als Elektrolyt dient verdünnte Schwefelsäure, die besonderen Reinheitsvorschriften genügen muß. Insbesondere schädigen Chlor- und Stickstoffverbindungen sowie die Metalle der Schwefelwasserstoffgruppe die Platten. Die Dichte des Elektrolyts ist 1,20 bis 1,24 g/cm³, gemessen am Ende der Ladung, und zwar wird die

stärkere Säure benutzt, wenn die in der Zelle verfügbare Säuremenge verhältnismäßig klein zur Kapazität der Zelle ist, umgekehrt die schwächere Säure, wenn viel Elektrolyt zur Verfügung steht.

3. Spannung und Kapazität.

In der Ruhe, d. h. wenn ihm weder Strom entnommen oder zugeführt wird, zeigt ein Akkumulator eine Spannung, die mit genügender Genauigkeit $E = \text{Säuredichte} + 0,84$ Volt beträgt (Ruhespannung = Elektromotorische Kraft). Bei der Entladung sinkt die Klemmenspannung sofort um einen Betrag gleich dem durch den inneren Widerstand verursachten Spannungsabfall. Bei weiterer Entladung wird, wie oben ausgeführt, durch das gebildete Wasser die Säure verdünnt, die Klemmenspannung sinkt daher allmählich, um gegen Schluß der Entladung steil abzufallen. Dieses Sinken der Klemmenspannung wird um so rascher vor sich gehen, je stärker die Entladeströme sind. Man betrachtet die Entladung als beendet, wenn der steil abfallende Knick in der Entladekurve erreicht ist. Die Abb. 70, Schaulinie E , zeigt den

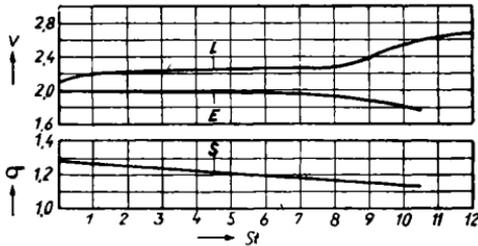


Abb. 70.

Spannungsverlauf (Klemmenspannung) an einem Akkumulator während einer 10stündigen Entladung. Schaulinie S veranschaulicht die Abnahme der Säuredichte σ bei der Entladung. Bei ganz langsamer Entladung behält der Akkumulator während längerer Zeit eine Spannung von 2 Volt je Zelle. Sobald man die Entladung unterbricht, steigt die Klemmenspannung sehr plötzlich und erreicht wieder den Betrag der Ruhespannung. Aus vorstehendem läßt sich auch die Tatsache erklären, daß man einer Akkumulatorenzelle um so mehr Amperestunden entnehmen kann, je geringer die Entladestromstärke ist. Die Kapazität einer Zelle steigt also bei Entladung mit hoher Stromstärke. Beispielsweise kann eine Zelle mit Großoberflächenplatten, die 90 A 3 Stunden lang hergibt, also 270 Ah hat, 36 A 10 Stunden lang hergeben, hat dann also eine Kapazität von 360 Ah, 1 Stunde lang würde sie 190 Ah hergeben. Bei der Ladung, siehe Abb. 70, Linie L , steigt die Spannung nach einem kurzen plötzlichen Anstieg allmählich, bis eine Klemmenspannung von 2,4 Volt erreicht ist. Hier setzt die Gasentwicklung ein, d. h. der hineingeleitete Strom wird nicht mehr vollständig zur Umwandlung der wirksamen Masse verwendet, sondern ein Teil zersetzt den Elektrolyt in Wasserstoff und Sauerstoff. Die

Spannung steigt deshalb sehr plötzlich und erreicht schließlich einen Wert von 2,75 Volt. Damit ist dann die Ladung beendet.

4. Anwendung der verschiedenen Plattenbauarten.

Akkumulatoren arbeiten im Fernmeldewesen unter den verschiedensten Betriebsbedingungen. Beim Betrieb mit Wechselbatterien wird die eine Batterie auf das Netz entladen, in der Zwischenzeit wird die zweite Batterie aufgeladen. Dann werden die Batterien umgeschaltet, Batterie 2 kommt nunmehr zur Entladung, Batterie 1 auf Ladung. Der Wechsel findet in verhältnismäßig kurzer Zeit täglich oder alle zwei Tage statt. Eine andere Betriebsart ist der Pufferbetrieb oder die Dauerladung. Hierbei liegt die Batterie parallel zum Stromerzeuger am Netz. Der Stromerzeuger ist auf die mittlere Netzbelastung eingestellt, übersteigt diese die Leistung des Stromerzeugers, so liefert die Batterie den Überschuß, liegt die Netzbelastung unter der Leistung des Stromerzeugers, so wird die Batterie aufgeladen. Für diese Betriebsverhältnisse eignet sich eine Batterie mit positiven Groboberflächenplatten und negativen Kastenplatten oder Gitterplatten. Mitunter liegt der Betrieb aber auch so, daß der Strombedarf des Netzes durch eine verhältnismäßig kleine Batterie längere Zeit gedeckt werden kann, also eine Aufladung nur in größeren Zwischenräumen notwendig wird. In diesem Fall werden Gitterplatten angewendet, die bis zu etwa zwei Monaten ohne Neuaufladung arbeiten können. Ist der Strombedarf sehr gering, so daß die Batterie in noch längeren Zwischenräumen aufgeladen werden kann, werden Zellen mit Rahmenplatten vorgesehen. Akkumulatoren mit Rahmenplatten dienen daher auch vielfach als Ersatz für Primärelemente, und zwar dann, wenn die erforderlichen Leistungen durch diese nicht mehr aufgebracht werden können oder die Wartung und Instandhaltung, insbesondere bei NaBelementen, zu umständlich ist. Für solche Zwecke sind besondere Bauarten ge-

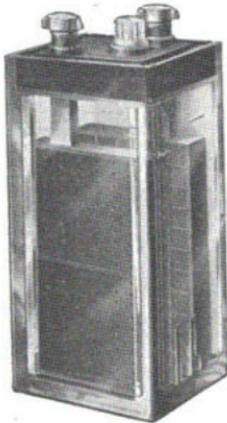


Abb. 71.

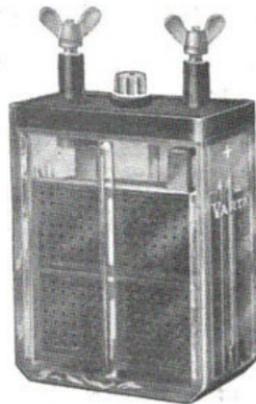


Abb. 72.

schaffen worden, die VARTA-Typen „Accomet“ und „Ad“, die bis zu einem Jahr ohne Zwischenladung arbeiten können. Diese Zellen haben nur eine positive und eine negative Platte.

Die Abb. 71 zeigt die äußere Form der Accomet-Zelle, Abb. 72 die der Ad-Zelle. Die technischen Daten sind der nachstehenden Übersicht zu entnehmen.

Typ	Kapazität bei 1000 Std. Entladung		Höchst-Ladestrom A	Ausmaße der Zelle in mm			Gewicht kg	
	Ah	mit mA		lang	breit	hoch	Zelle	Säure
Accomet I	20	20	0,4	70	70	155	1,4	0,29
Accomet II	40	40	0,8	80	80	200	2,25	0,55
Ad	80	80	1,5	80	142	240	4,4	1,05

Im Vergleich zu den Primärelementen ist der innere Widerstand der Accomet-Zellen sehr gering und sie haben während der ganzen Entladezeit von nahezu 1000 Stunden (s. Übersichtstafel) eine fast gleichbleibende Klemmenspannung. Abb. 73 zeigt den Verlauf der Entladekurve *A* im Vergleich zu der Entladekurve *P* einer Primärelementbatterie mit 3 Zellen.

Die Accomet-Zellen brauchen nur etwa in Abständen von einigen Monaten wieder aufgeladen zu werden.

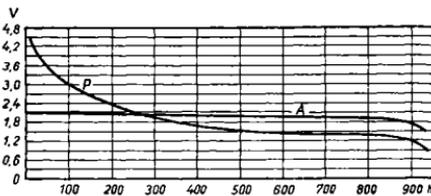


Abb. 73.

5. Betrieb.

Die Batterien können mit dem normalen Ladestrom aufgeladen werden, der auf der vom Lieferwerk der Batterie beigelegten Behandlungsvorschrift jedesmal angegeben ist. Der Ladestrom entspricht bei Batterien mit Großoberflächenplatten dem dreistündigen Entladestrom, bei Batterien mit Gitter- und Rahmenplatten dem zehnstündigen Entladestrom. Es schadet aber nichts, wenn die Batterien mit geringerem Ladestrom aufgeladen werden, nur dauert dann die Aufladung entsprechend länger. Außerordentlich empfehlenswert ist es, bei Batterien mit Großoberflächenplatten den Ladestrom nach Eintritt der Gasentwicklung etwa auf die Hälfte herabzusetzen. Die Verluste durch zu starke Gasentwicklung und die damit verbundene mechanische Beanspruchung der Platten wird auf diese Weise herabgesetzt.

Die Umwandlung von elektrischer Energie in chemische und umgekehrt geht nicht ganz verlustlos vor sich. Es müssen deshalb in die Batterie mehr Amperestunden hineingeladen werden als herausgenommen worden sind. Die Praxis hat gezeigt, daß hierfür etwa 10vH ausreichen. Die Lieferwerke geben deshalb allgemein als Wirkungsgrad in Ah = herausgenommene Ah zu hineingeladene Ah, 90vH an. Zur Feststellung des Wirkungsgrades in Wh müssen noch die herausge-

genommenen Ah mit der mittleren Entladespannung und die hineingeladenen Ah mit der mittleren Ladespannung multipliziert werden. Bei Lade- und Entladebetrieb kann man im Fernmeldewesen mit etwa 75vH Wirkungsgrad in Wh rechnen, bei Pufferbetrieb ist dieser Wirkungsgrad höher. Bei Pufferbetrieb wird die Leistung des Stromerzeugers auf die mittlere Netzbelastung eingestellt. Hierbei ist nicht berücksichtigt, daß jeder Akkumulator eine gewisse Selbstentladung hat, einerlei ob er arbeitet oder in Ruhe steht. Damit die Batterie nun immer in gleichem Ladezustand ist, muß ihr zusätzlich ein Strom zugeführt werden, der die inneren Verluste durch Selbstentladung gerade ausgleicht. Man bezeichnet diesen Strom als Ladungserhaltungsstrom. Er beträgt bei Batterien mit Großoberflächenplatten etwa $\frac{1}{500}$ des normalen Ladestromes.

Einen Anhalt für die Beurteilung des Entladezustandes einer Batterie gibt die Spannung unter Belastung, wobei zu berücksichtigen ist, daß diese sich mit der Höhe der jeweiligen Entladestromstärke ändert.



Abb. 74.

Die Ruhespannung ist kein Kennzeichen für den Entladezustand. Für die Praxis genügend genaue und leicht feststellbare Ergebnisse erreicht man durch Messen der Säuredichte, die während der Entladung proportional mit der entnommenen Strommenge zurückgeht. Um wieviel die Säuredichte sinkt, hängt von der Größe der Zellen und der in diesen vorhandenen Säure ab, so daß sich allgemeine Angaben darüber nicht machen lassen. Im einzelnen Falle mißt man daher bei einer Entladung die herausgenommenen Strommengen (Kapazitätsprobe) und stellt zum Schluß der Entladung fest, bis zu welchem Wert die Säuredichte abgesunken ist, und betrachtet diesen als Grenzwert der Säuredichte für die späteren Entladungen im Betrieb. Gelegentliche Änderungen der Säuredichte durch Nachfüllen von destilliertem Wasser müssen von Zeit zu Zeit durch eine Kontrollmessung richtiggestellt werden.

Zur Prüfung der Säuredichte dient das Aräometer. Das Aräometer ist ein Schwimmkörper *k* (Abb. 74), durch ein Gewicht *G* belastet und

Grad Bé	Spez. Gewicht σ	H ₂ SO ₄ vH
3,4	1,025	3,76
6,7	1,050	7,37
10,0	1,075	10,90
13,0	1,100	14,35
16,0	1,125	17,66
18,8	1,150	20,91
21,4	1,175	24,12
24,0	1,200	27,32
26,4	1,225	30,48
28,8	1,250	33,43
31,1	1,275	36,29
33,3	1,300	39,19

mit einer Tauchskaia *S* versehen, die in Baumégraden geeicht ist. Nachstehender Zahlentafel ist das Verhältnis zwischen den Graden Baumé (Bé), dem spezifischen Gewicht und dem vH-Gehalt an H_2SO_4 zu entnehmen. Die Grade Bé werden abgelesen, indem man am freischwimmenden Aräometer den Flüssigkeitsspiegel (Eintauchtiefe) an der Skala *S* beobachtet.

Der Zusammenhang zwischen EMK der Batterie, dem spez. Gewicht und der Säuredichte ist aus der nachstehenden Zahlentafel zu ersehen.

H_2SO_4 vH	Spez. Gewicht σ	EMK Volt
5	1,037	1,878
10	1,076	1,925
15	1,116	1,958
20	1,162	1,992
25	1,210	2,026
30	1,263	2,059
35	1,320	2,093
40	1,383	2,130

6. Aufstellung der Batterien.

Größere Batterien werden in einem besonderen Batterieraum aufgestellt, der nach den Vorschriften des VDE ausgeführt sein muß. Der Fußboden muß genügend tragfähig und säurefest sein. Zementfußböden sind nicht säurefest. Besonders bewährt hat sich ein Fußboden aus hartgebrannten Klinkern, dessen Fugen mit Asphalt oder Steinkohlenteer ausgegossen sind. Die einzelnen Reihen der Akkumulatorenzellen

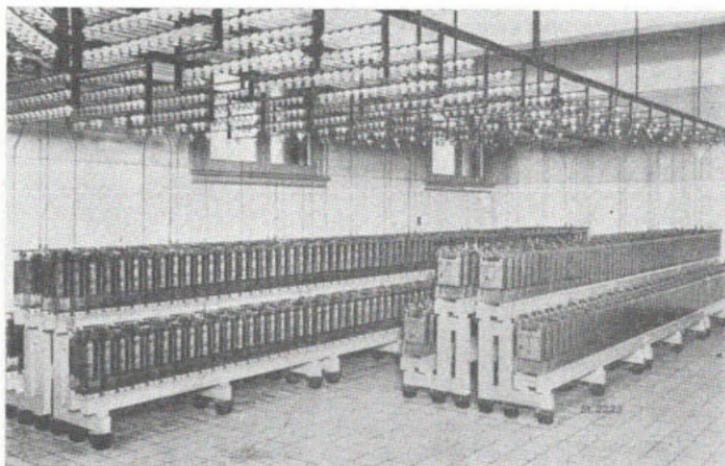


Abb. 75.

sind so anzuordnen, daß genügend breite Gänge für die Bedienung vorhanden sind. Diese sollen möglichst 80 cm breit sein, jedenfalls aber nicht $\frac{1}{2}$ m unterschreiten. In der Abb. 75 ist die Innenansicht eines mustergültigen Sammlerraumes einer Fernsprech- und Signalanlage zu sehen. Bei Holzkastenbatterien muß auch Vorsorge getroffen werden, daß ein Kasten einmal bei Instandhaltungsarbeiten aus der Zellenreihe herausgenommen und im Gang aufgestellt werden kann. Bei Batterien in Hartgummikästen kann man auf das Holzgestell verzichten, die Kästen stehen dann mit ihren Isolatoren direkt auf dem Fußboden.

Für größere ortsfeste Sammlerbatterien ist der Fußboden des Sammlerraumes auf Tragfähigkeit zu prüfen, bevor mit dem Aufstellen begonnen wird. Holz- und Zementfußboden werden von der Säure angegriffen. Die Sammlerräume sollen trocken, kühl, gut lüftbar und möglichst geringen Temperaturschwankungen unterworfen sein.

Von erheblichem Einfluß auf die Kapazität der Sammler ist die Temperatur des Elektrolyts. Die von den Lieferfirmen gewährleistete Kapazität bezieht sich gewöhnlich auf eine bestimmte Temperatur, z. B. 15° C. Man muß damit rechnen, daß die Kapazität mit steigender Temperatur zunimmt. Bei größeren Sammlerbatterien der großen Fernsprechämter könnte diese Abhängigkeit eine Rolle spielen.

Als Mindesthöhe für Sammlerräume sind 2 m anzunehmen. Heizung ist in Sammlerräumen meist nicht erforderlich, aber die Räume müssen frostfrei sein, und für eine gute Lüftung muß gesorgt werden, da beim Kochen der Zellen Knallgas entwickelt wird. Läßt sich eine ausreichende Lüftung durch Fenster nicht erreichen, oder besteht die Gefahr, daß die entweichenden Säuredünste Schaden anrichten, so sollen besondere Abzugsrohre oder Abzugskanäle vorgesehen werden (Druckventilator), die nicht in den Schornstein führen dürfen. Wände des Raumes werden mit säurefestem Anstrich versehen.

Zur Beleuchtung der Sammlerräume sind nur Glühlampen, mit Überlocken versehen, zu verwenden. Schalter, Fassungen und Leitungen müssen säurefest sein. Schalter sind außerhalb des Raumes anzubringen.

Verbindungsleitungen innerhalb des Sammlerraumes sollen durch blanke Kupferleitungen hergestellt werden, die bis zur isolierenden Wanddurchführung zu führen sind. Diese Leitungen sollen gut eingefettet oder mit einem haltbaren Emaillack gestrichen werden, und zwar der Pluspol rot und der Minuspol blau. Wenn aus besonderen Gründen keine blanke Leitung genommen werden soll, so darf keine NGA-Leitung, sondern NGAW oder eine gleichwertige isolierte Leitung benutzt werden, die nach den „Vorschriften für isolierte Leitungen VIL“ zu verlegen ist.

Sogenannte Bodengestelle geben den besten Überblick über die Batterie und erleichtern dadurch die Wartung. Nur die kleineren Batteriegrößen kann man auch auf Etagengestellen in zwei Reihen oder auch ganz kleine Zellen in drei Reihen übereinander aufstellen. Ist bei kleinen Batterien die Schaffung eines besonderen Akkumulatorenraumes schwierig, so können die Zellen auch in einem schrankartigen Verschlag untergebracht werden, der einen Abzug in die freie Luft hat. Eiserne Rohre dürfen dazu nicht verwendet werden. Man benutzt dazu Tonrohre oder einen Abzug aus Holz.

Die kleineren Ausführungen ortsfester Batterien werden auch als sog. Blockbatterien geliefert, und zwar für eine Spannung von 12 Volt. Ein gemeinsamer Hartgummikasten hat 6 Abteilungen zur Aufnahme der Plattensätze. Für Spannungen von 24 Volt werden zwei derartige Batterien hintereinandergeschaltet. Sie werden bis zu einer Leistung von 108 Ah (10stündig) geliefert.

Die Batterien für ortsfeste Aufstellung erhalten eine Glasscheiben-Abdeckung oder besonders ausgebildete abnehmbare Deckel, um die bei der Ladung auftretenden Säurenebel zurückzuhalten und die Verdunstung des Elektrolyts zu verhindern.

Tragbare Batterien, also solche, die zum Zwecke der Aufladung in eine Ladestelle gebracht werden müssen, werden in Holzkästen eingebaut. Die Zellen sind vollständig geschlossen und der Deckel hat einen Schraubstöpsel. Um die Batterie nachzufüllen und die Säure-



Abb. 76.

dichte messen zu können, wird der Stöpsel entfernt, so daß durch die Öffnung ein Aräometer eingetaucht oder Wasser eingegossen werden kann. Diese Ausführung erfordert keinen besonderen Batterieraum. Tragbare Batterien, Abb. 76, werden deshalb auch manchmal ortsfest benutzt.

Kann von einer Unterbringung der Sammlerbatterie in Schränken nicht abgesehen werden, so sollen diese Schränke gegen Fäulnis und chemische Einflüsse geschützt und so angeordnet werden, daß sich der Zustand jeder einzelnen Zelle leicht prüfen läßt. Die Schränke müssen auch ausreichend mit Lüftungslöchern versehen sein, nach Möglichkeit auch einen Abzug nach dem Freien haben (frostfrei!).

In dem Sammlerraum sind die Unfallverhütungs- und Bedienungsvorschriften aufzuhängen. An der Tür des Sammlerraumes ist ein Schild anzubringen, das auf das Verbot des Betretens mit offenem

Feuer und auf das Rauchverbot hinweist. Das Essen ist in Sammlerräumen laut Verbandsvorschrift verboten.

Die Wartung der Batterie erstreckt sich auf die Beobachtung der Ladung und Entladung. Blei-Akkumulatoren sollen nicht längere Zeit tief entladen stehen, weil sonst eine schädliche Sulfatation der Platten eintritt. Die Zellen sind stets sauber zu halten und gelegentlich nachzufüllen. Im allgemeinen ist hierzu nur destilliertes Wasser zu benutzen, nur wenn bei ortsfesten Zellen die Säuredichte im Laufe der Zeit gesunken ist, darf auch gelegentlich mit verdünnter Säure nachgefüllt werden. Konzentrierte Säure oder Säure höherer Dichte, als in den Bedienungsvorschriften angegeben, darf unter keinen Umständen benutzt werden.

Bei Masseplatten, bei denen ein allmähliches Abbröckeln der Masse als Folgeerscheinung einer zu raschen Ladung mit der Zeit stattfindet, muß darauf geachtet werden, daß herunterfallende größere Brocken keinen Kurzschluß zwischen den Platten bilden. Aus dem gleichen Grunde sind krumme Platten zu entfernen und durch neue zu ersetzen, oder die alten Platten zu richten.

Die Glasgefäße der Batterie sind in regelmäßigen Zeitabständen zu durchleuchten und die Beschaffenheit der Platten zu untersuchen. Hat sich am Boden des Gefäßes so viel Schlamm angesammelt, daß die Gefahr eines Kurzschlusses besteht, so ist der Schlamm mit einem Heber zu entfernen.

7. Stahl-Zellen.

Für Fernmeldezwecke werden Stahl-Zellen ausschließlich als Nickel-Kadmium-Zellen, und zwar mit sog. Taschenplatten verwendet. Der Elektrolyt ist verdünnte Kalilauge von 1,20 Dichte. Die elektrochemischen Vorgänge in diesen Zellen verlaufen nicht so einfach wie beim Blei-Akkumulator, es soll deshalb auch nicht näher auf sie eingegangen werden, es sei nur erwähnt, daß die Kalilauge sowohl bei der Ladung als auch bei der Entladung praktisch unverändert bleibt, die Lauge-dichte also kein Kennzeichen für den Lade- und Entladezustand der Zellen ist. Die wirksame Masse der positiven Platte ist Nickel-Hydroxyd, die der negativen Platte Kadmium-Hydroxyd. Die Massen werden in Taschen aus fein perforiertem Stahlband eingepreßt, mehrere solcher Taschen übereinander werden durch einen Stahlrahmen gehalten und bilden so die Platte, Abb. 77. Die Zellengefäße sind aus vernickeltem Stahlblech hergestellt. Gegeneinander und gegen das Gefäß sind die Platten durch Hartgummi isoliert. In der Abb. 78 bedeuten: 1 positiver Pol, 2 negativer Pol, 3 Verschlußstopfen, 4 Zellenkasten, 5 positive Platte, 6 perforierter Hartgummischeider, 7 negative Platte, 8 Seitenisolator, 9 Randisolator. Die Spannung der Nickel-Kadmium-Zellen liegt tiefer als die der Bleizellen. Im Mittel ist die Entladungsspannung 1,2—1,25 Volt. Um dieselbe Spannung zu erzielen, sind daher 60vH mehr Zellen als bei Blei erforderlich. Die Kapazität ändert sich nur unwesentlich mit der Höhe des Entladestromes. Eine Zelle, die 100 Ah bei 5stündiger Entladung hat, gibt bei 10stündiger Entladung 104 Ah und bei 3stündiger Entladung 95 Ah her. Den Verlauf der Entlade- und Ladespannung zeigt Abb. 79.

Bei Stahlzellen ist auch das Zellengefäß leitend. Es muß deshalb bei Aufstellung besonders darauf geachtet werden, daß die Zellen sich nicht gegenseitig berühren. Im allgemeinen werden deshalb die Zellen gruppenweise in Träger eingebaut, an deren Längswänden sie an angeschweißten Vor-



Abb. 77.

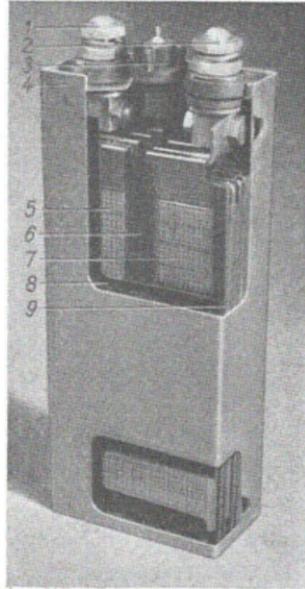


Abb. 78.

sprüngen, die in Isolierbuchsen ruhen, unverrückbar gehalten werden. Dieser Einbau ermöglicht die Anwendung sowohl als ortsfeste wie als tragbare Batterie.

Stahl-Akkumulatoren zeichnen sich durch außerordentliche Unempfindlichkeit gegen elektrische und mechanische Beanspruchungen

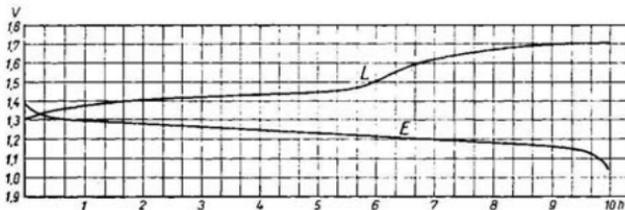


Abb. 79.

aus, insbesondere können sie, ohne Schaden zu nehmen, lange Zeit unbenutzt stehen. Sie sind daher die gegebene Stromquelle für alle

tragbaren Geräte, die unregelmäßig benutzt werden sowie für solche Anlagen, in denen mit einer dauernden Überwachung nicht gerechnet werden kann.

Die Lebensdauer der Stahl-Akkumulatoren ist sehr groß. Zu ihrer Pflege ist zu bemerken, daß die Zellen sauber und trocken gehalten werden müssen, um den ursprünglichen hohen Isolationswert zu erhalten und Zerstörungen durch Kriechströme zu vermeiden. Vor allem ist streng darauf zu achten, daß zum Nachfüllen niemals Schwefelsäure oder, wie bei Bleibatterien üblich, angesäuertes destilliertes Wasser verwendet wird; auch der Gebrauch von säurebenetzten Werkzeugen, Dichtmessern usw. muß vermieden werden.

8. Gegenzellen.

Verschiedene Anlagen der Fernmeldetechnik, z. B. Wähleranlagen, verlangen eine Spannung, die nur in verhältnismäßig engen Grenzen schwanken darf. Wenn man den Pufferbetrieb nicht ununterbrochen durchführt, sondern z. B. zu Zeiten geringerer Belastung Entladebetrieb führt, so muß die während dieser Zeit entnommene Strommenge auch wieder in die Batterie hineingeladen werden. Die dabei erforderliche höhere Spannung würde also beim Einbatteriesystem auch im Fernsprechnetzt auftreten und den Betrieb stören.

Ohmsche Widerstände lassen sich in einem solchen Fall nicht verwenden, da diese stromabhängig sind. Man benutzt deshalb elektrolytische Widerstände, sog. Gegenzellen. Die Zellen werden in Glasgefäß- oder Stahlgefäßausführung gebaut, Abb. 80; in der Abbildung ist der Plattenatz aus dünnen Nickelblechen, die als Elektroden dienen, deutlich zu erkennen. Die Zusammenschaltung von Akkumulatorenbatterie und Gegenzelle ist in der

Abb. 81 gezeigt. Die Batterie *B* wird von der Gleichstrommaschine *M* (oder von einem Gleichrichter aus dem Netz) geladen; die Batterie

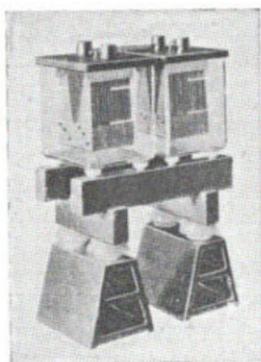


Abb. 80.

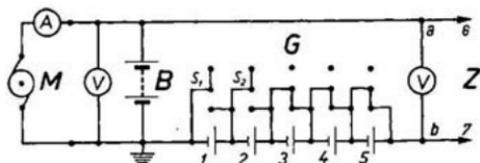


Abb. 81.

speist aber gleichzeitig die Zentrale *Z*. Die Abbildung zeigt, wie die Gegenzellen eingeschaltet werden. Steigt die Spannung der Batterie, so werden durch Umlegen der Schalter *s*₁, *s*₂ usw. immer mehr Zellen

in den Stromkreis eingeschaltet, so daß die Gesamtspannung bei $a-b$ der Differenz zwischen der Spannung der Batterie und der der Gegenzellen ist. Die Spannung der alkalischen Gegenzelle ist von der Belastung abhängig und beträgt im Mittel 2,5 Volt. Die Zellen sind so bemessen, daß sie die volle Stromstärke, die zur Zentrale fließt, vertragen. Als Elektrolyt dient Kalilauge mit einer Dichte von 1,20. Abb. 82 zeigt, wie sich die Spannung einer solchen Gegenzelle mit der Belastung ändert. Eine Eigenschaft dieser Gegenzellen ist, daß die Platten keine Kapazität haben, also auch keinen Strom abgeben können, wenn sie kurzgeschlossen sind. Über dem Elektrolyten erhalten die Zellen eine Ölfüllung, sie können deshalb auch mit einer Bleibatterie zusammen im gleichen Raum untergebracht sein. Im Betrieb entwickeln die Zellen Knallgas, die Nickelbleche der Elektroden werden hierbei nicht verbraucht.

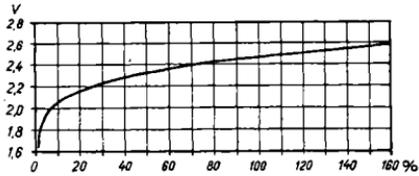


Abb. 82.

c) Gleichrichter¹⁾, Glimmröhren und Stromrichter.

Zum Laden von Sammlerbatterien ist Gleichstrom erforderlich. Städtische Elektrizitätswerke liefern meistens, Überlandzentralen ausschließlich Wechselstrom bzw. Drehstrom. Will man Sammler aus dem vorhandenen Wechselstromnetz laden, so muß der Wechselstrom in Gleichstrom umgeformt werden.

1. Elektrolytische Gleichrichter.

Ein mit Natriumbicarbonat gefülltes Glasgefäß, welches eine Aluminium- und eine Eisenelektrode enthält, besitzt die Eigenschaft einer elektrischen Ventilzelle, indem nach kurzer Formierung diese Zelle nur in der Richtung vom Eisen Fe (Abb. 83) nach Aluminium Al stromdurchlässig ist. Von dieser Eigenschaft der Zellen wird zuweilen Ge-

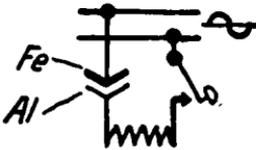


Abb. 83.

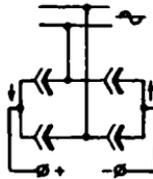


Abb. 84.

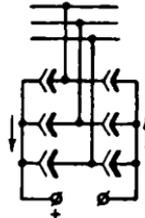


Abb. 85.

¹⁾ Günther-Schulze, A., Elektrische Gleichrichter und Ventile. 2. Auflage. Berlin 1929.

brauch gemacht, Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln. In der Schaltung nach Abb. 83 wird nur die eine Halbwelle des Einphasen-Wechselstromes ausgenützt. Schaltet man vier Ventilzellen wie in Abb. 84, so kann man beide Halbwellen ausnützen. Zum Anschluß an Drehstrom ist die sog. Graetz'sche Schaltung mit sechs Ventilzellen zu verwenden (Abb. 85). Die Ventilzellen können an Netzspannungen bis zu 300 Volt angeschlossen werden.

Elektrolytische Gleichrichter werden für Fernmeldeanlagen kaum mehr angewandt.

2. Quecksilberdampf-Gleichrichter

sind für mittlere und große Leistungen zu empfehlen, da besonders bei niedriger Spannung der Wirkungsgrad höher ist als bei Umformern (s. S. 73). Der Quecksilberdampf-Gleichrichter ist 1902 von Cooper Hewitt konstruiert worden und besteht aus einer eigentümlich geformten, luftleer gemachten Glasröhre 1 (Abb. 86), auch Glaskolben genannt, mit verschiedenen Ansätzen. Der untere, bis zu einer gewissen

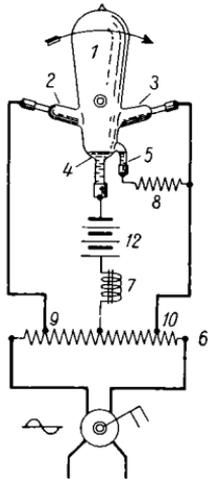


Abb. 86.

Höhe mit Quecksilber gefüllte Ansatz 4 wird als Kathode (Stromausführung) bezeichnet. In die Ansätze 2 und 3 sind Graphit- oder Eisenelektroden eingeschmolzen, die als Anoden, d. h. als Stromeinführung, dienen. 5 ist eine Hilfs- oder Zündanode. Der Gleichrichter wirkt als elektrisches Ventil. Über die physikalischen Vorgänge in gasgefüllten Röhren siehe auch die Abschnitte Glühkathoden-Gleichrichter (S. 63) und Stromrichter (S. 68). Die Ventilwirkung bei der Röhre des Quecksilberdampf-Gleichrichters kommt dadurch zustande, daß die als Kathode dienende Elektrode durch die Entladung in der Röhre erhitzt wird, wodurch eine Herabsetzung des Kathodenfalls stattfindet. Der Quecksilberdampf wird bei verhältnismäßig geringer Spannung an den Elektroden leitend, und zwar nur in der Richtung von den Anoden zur glühenden Kathode. Es genügt unter Umständen hierfür eine Spannung von etwa 20 Volt, während in umgekehrter Richtung je cm Elektrodenabstand einige Kilovolt erforderlich wären.

Die Abb. 86 zeigt die Schaltung einer Röhre für einfachen Wechselstrom. An die Wicklung 6 des in Sparschaltung gewickelten Transformators wird die Wechselspannung und an die Zapfstellen 9, 10 werden die Anoden 2 und 3 des Gleichrichters angelegt. Die Zündanode 5 bekommt Strom über einen Widerstand 8. Dieser dient zur Vermeidung eines Kurzschlusses bei Zündung. Zwischen Kathode 4 und Mitte der Transformatorwicklung ist die zu ladende Batterie 12 und Induktionsspule 7, auch Stromerhaltungsspule genannt, in Reihe geschaltet.

Wird die Röhre in Pfeilrichtung gekippt, so fließt das Quecksilber der beiden Ansätze 4 und 5 zusammen und reißt beim Zurück-

gehen der Röhre in die senkrechte Lage wieder ab. Durch den hierbei entstehenden Lichtbogen wird der Stromdurchgang eingeleitet, indem der Lichtbogen nun auch zwischen den Anoden 2, 3 und der Kathode 4 zustandekommt. Auf dem Quecksilberspiegel der Kathode bildet der durchlaufende Betriebsstrom einen helleuchtenden, ständig umherirrenden sog. Kathodenfleck, der eine sehr hohe Temperatur aufweist und als Glühkathode Elektronen aussendet. Wie wir später (S. 63 ff.) sehen werden, ist die Wirkung eines Vakuungleichrichters nicht immer abhängig von der Anwesenheit von Quecksilberdampf, sondern die Ventilwirkung tritt auch ein, wenn in einem luftleeren Raum die eine Elektrode erhitzt wird (Metalle bis zur Weißglut, Oxyde weniger) und einer verhältnismäßig kalten Elektrode gegenübersteht.

Der Kathodenfleck wird vom Strom selbst auf hoher Temperatur erhalten. Das verdampfte Quecksilber gelangt in die Kühlkammer 1 (Abb. 86) der Röhre, wird kondensiert und fließt wieder zur Kathode. Die Anoden erwärmen sich bei richtiger Bemessung verhältnismäßig wenig, etwa auf 500 bis 600° C.

Die Kurve des pulsierenden Gleichstromes würde bei Einphasenstrom an der Wechselstromseite und ohne die Drosselspule (7, Abb. 86) etwa wie in Abb. 87, I aussehen. Die schraffierten Halbwellen des Sinusstromes *a*, *b*, *c*

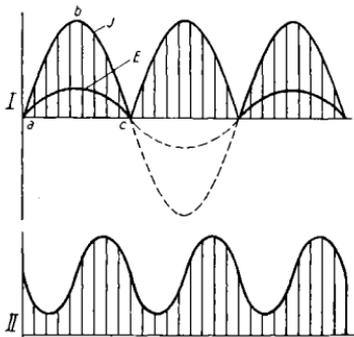


Abb. 87.

stellen den pulsierenden Gleichstrom dar. Der Strom würde nach jeder Halbwelle auf Null herabfallen und der Gleichrichter in der Zwischenzeit, bis zum Anstieg der nächsten Halbwelle, erlöschen. Um das zu vermeiden, wird die Stromerhaltungsspule 7 eingeschaltet. Der pulsierende Gleichstrom hat dann die Form II, Abb. 87.

Zum Anschluß an Drehstrom erhält der Quecksilberdampf-Gleichrichter drei Anoden, die dann nach Abb. 88 geschaltet sind.

Ein Spartransformator 8 in Sternschaltung wird einerseits an das Drehstromnetz und andererseits an die drei Anoden 4, 5, 6 angeschlossen. Die Batterie liegt zwischen Kathode 2 und dem Mittelpunkt des Transformators. Eine Stromerhaltungsspule ist beim Drehstrom-Gleichrichter nicht erforderlich, denn, wie aus Abb. 89 zu ersehen, überlappen sich die einzelnen Phasen I, II, III des Drehstromes so, daß der Strom im Gleichrichter nie ganz auf Null abfällt. Der vom Drehstrom-Gleichrichter gelieferte Gleichstrom pulsiert in viel geringerem Maße (Abb. 90) als der des Einphasen-Gleichrichters. Noch weniger pulsiert der Gleichstrom eines Sechspannen-Gleichrichters (Abb. 91). Die Sechspannenschaltung wird zum Anschluß von größeren Quecksilberdampf-Gleichrichtern an Drehstrom verwendet. Abb. 94 zeigt schematisch eine derartige Sechspannenschaltung. *T* ist der Transformator. Zwischen den sechs Phasen 1 und der Kathode 2 befindet sich der Quecksilberdampf-Gleich-

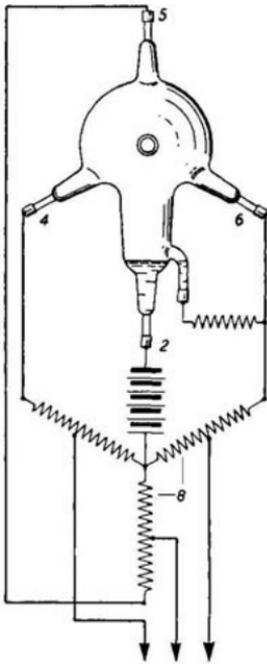


Abb. 88.

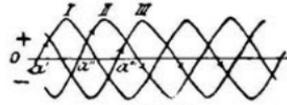


Abb. 89.

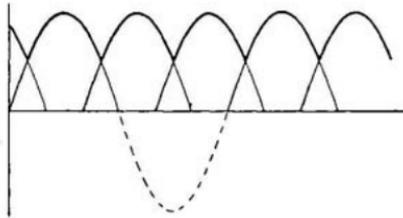


Abb. 90.

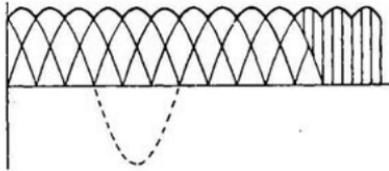


Abb. 91.

richter. Die Abb. 92 zeigt die Formen von Quecksilberdampfgleichrichter-Kolben aus Glas für Einphasen-, Dreiphasen- und Sechsphasenstrom. In der Abb. 93 ist ein

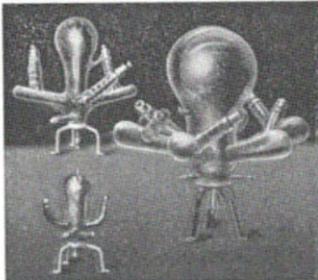


Abb. 92.

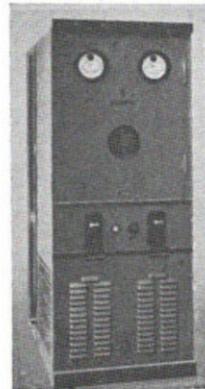


Abb. 93.

vollständiges Gleichrichtergerät zu sehen. Im Oberteil dieses Gehäuses ist der Gleichrichterkolben federnd aufgehängt.

Die Spannung des vom Quecksilberdampf-Gleichrichter*) gelieferten Gleichstromes kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$U_g = \frac{U_w \cdot C}{2} - 15.$$

U_w = Effektivwert der Wechselstromspannung,

$\frac{U_w}{2}$ = Effektivwert derselben Spannung zwischen der Mitte der Transformatorwicklung und einer Anode,

U_g = Mittelwert der Gleichstromspannung gemessen mit einem Drehspulinstrument,

15 = die Anzahl Volt Spannungsverlust im Kolben,

C = ein empirisch gefundener Faktor = 0,85.

Es ist also

$$U_g = \frac{U_w \cdot 0,85}{2} - 15.$$

Der Wirkungsgrad des Gleichrichters ist dann

$$\eta = \frac{U_g}{U_g + 15} - \text{V\%H.}$$

V sind die Verluste im Transformator, Drosselspule usw.

Beispiel:

Die Wechselstromspannung U_w sei = 380 Volt, die Verluste in der Schaltung $V = 5\text{vH}$, dann ist

$$U_g = \frac{380 \cdot 0,85}{2} - 15 = \text{etwa } 146 \text{ Volt}$$

$$\eta = \frac{146}{146 + 15} - 5 = \text{etwa } 85\text{vH.}$$

In Abb.95 ist durch eine Schaulinie der Wirkungsgrad von Quecksilberdampf-Gleichrichtern (Abb. 86) in Abhängigkeit von der Gleichstromspannung wiedergegeben. Es ist ein charakteristisches Merkmal der Quecksilberdampf-Gleichrichter, daß der Spannungsverlust in der Röhre selbst eine für jede Röhre gleichbleibende Größe ist, die sich mit der Strombelastung nicht ändert. Der Spannungsverlust beträgt bei kleineren Kolben etwa 12 Volt, bei größeren etwa 18 bis 20 Volt.

*) Einphasenstrom.

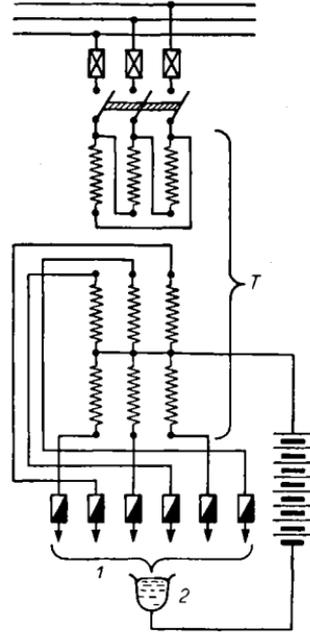


Abb. 94.

Der Glaskolben der Gleichrichter wird in der Regel in vollständigem Zusammenbau mit der Schalttafel geliefert, und zwar verwendet man Glaskolben bis zu 100 Ampere (neuerdings auch bis 250 Ampere) des zu liefernden Gleichstromes. Die Wandler werden für Einphasenstrom bis zu 132 Volt und für Drehstrom bis zu 250 Volt Gleichstrom in Sparschaltung gebaut. Für höhere Spannungen sind

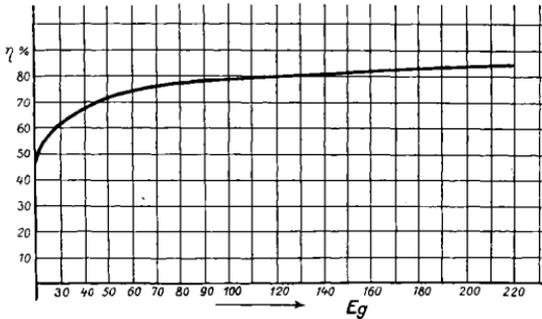


Abb. 95.

laut Verbandsvorschrift die Wandler mit getrennten Wicklungen zu versehen. Sollen Batterien mit geerdetem + Pol (von Fernmeldeanlagen) während des Betriebes geladen werden, so sind auf jeden Fall Wandler mit getrennten Wicklungen zu verwenden. Die Drosselspule, die bei Drehstrom als Stromerhaltungsspule nicht erforderlich wäre, ist bei Drehstrom-Gleichrichtern, welche auf eine im Betriebe (zur Speisung einer Fernsprechanlage) zu ladende Batterie arbeiten, immer vorhanden und mit erheblicher Selbstinduktion versehen, um die Strompulsationen restlos auszugleichen.

Es sind auch Quecksilberdampf-Gleichrichter auf dem Markt vorhanden, die außer der Zündanode noch weitere Hilfsanoden enthalten, welche zur Selbsterregung dienen.

Die bisher beschriebenen Quecksilberdampf-Gleichrichter haben die Eigenschaft, bei einer bestimmten minimalen Strombelastung zu erlöschen, und zwar bei etwa $\frac{1}{4}$ der Vollast.

In der Abb. 96 ist ein Gleichrichterkolben veranschaulicht, der außer den Anoden 2 und 3 noch zwei weitere kleine Hilfsanoden 4, 5 enthält. Die Kathode 6 mit den Hilfsanoden 4 und 5 kann als Miniaturgleichrichter innerhalb des ganzen Kolbens angesehen werden, der über den Erregertransformator 10 gespeist, bei einem kleinen Energieverbrauch von etwa 100 Watt, den Gleichrichter dauernd in Gang hält, wenn der dem Gleichrichter entnommene Strom auch in weiten Grenzen veränderbar ist. Ist die ganze Einrichtung durch das bisher übliche Kippverfahren in Betrieb genommen, so kann die Stromentnahme auch eine Zeitlang aussetzen. Der Gleichrichter bedarf keiner neuen Zündung, wenn die Stromentnahme wieder einsetzen soll, denn durch die Elektroden 4, 5, 6 bleibt er dauernd für beliebige Stromabgabe bereit.

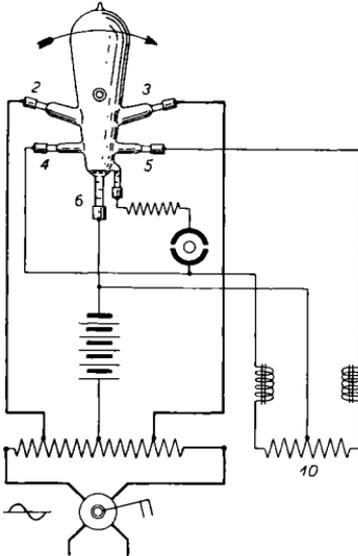


Abb. 96.

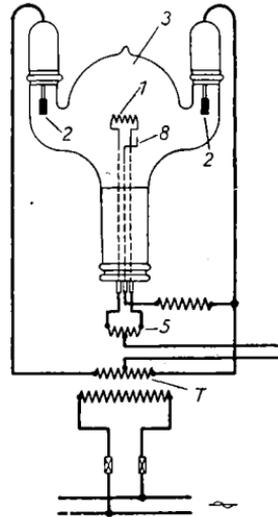


Abb. 97.

3. Glühkathoden-Gleichrichter.

Bei den Glühkathoden- oder Edelgasgleichrichtern dient als Kathode ein unmittelbar oder mittels Heizspirale geheizter Metallkörper (z. B. aus Wolfram oder Molybdän) — der Elektronen emittierende Glühfaden. Die Emission kann durch Bestreichen des Glühkörpers mit aktiver Masse (Oxyde) begünstigt werden. Der als Glaskörper durchgebildete Röhrengleichrichter ist mit Edelgas z. B. Argon bei geringem Druck gefüllt, wodurch der Spannungsabfall in der Röhre niedrig gehalten wird.

Die Abb. 97 zeigt schematisch die Anordnung der Einzelteile eines Glühkathoden-Gleichrichters. Im Glasgefäß 3 sind eine Glühkathode 1 und zwei Anoden 2 untergebracht. Der Glühkathoden-Gleichrichter spricht beim Einschalten des primären Wechselstromes sofort an.

Diese rasche Zündfähigkeit wird dadurch erhöht, daß in unmittelbarer Nähe der Kathode eine Hilfsanode (8) angeordnet wird, die über einen hohen Widerstand von etwa 40000 Ohm mit einer Anode verbunden ist. Die Glühkathode 1 wird durch eine besondere dritte Wicklung 5 des Transformators *T* geheizt und der Gleichstrom von der Mitte dieser und der der Sekundärwicklung des Transformators entnommen und direkt der Sammlerbatterie zugeführt. Die Spannungsregulierung erfolgt auf der Wechselstrom- oder Gleichstromseite.

Als Vorzüge des Glühkathoden-Gleichrichters gegenüber dem Quecksilberdampf-Gleichrichter seien angeführt:

1. Die Zündung setzt nach dem Wiedereinsetzen des ausgebliebenen Wechselstromes sofort wieder ein.

2. Der Gleichrichter ist bis zu den kleinsten Stromstärken herab belastbar, ohne auszusetzen.

Die Brenndauer guter Röhren-Gleichrichter wird mit 2500 Stunden gewährleistet, sie kann aber auch bei richtiger Behandlung 5000 Stunden betragen. Damit die Röhre gut arbeitet muß die Spannung am Heizfaden genau eingehalten werden und vor dem Einschalten der Gleichstromlast ist die Anheizzeit unbedingt abzuwarten. Der Wirkungsgrad ist gut und beträgt bei 110 V Gleichspannung etwa 85 vH.

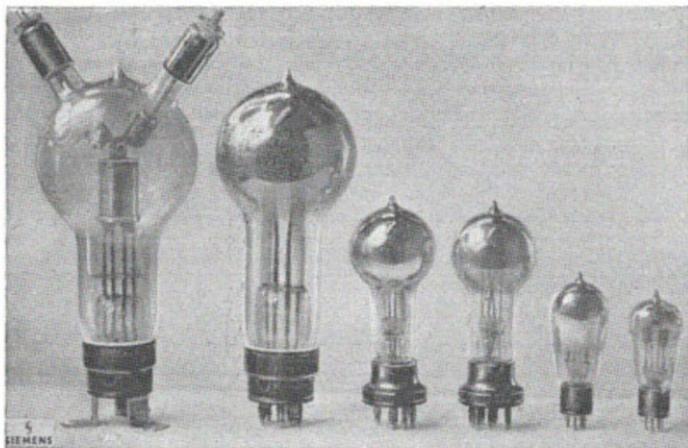


Abb. 98.

Die Abb. 98 zeigt neuzeitliche Formen von Glühkathoden-Gleichrichtern, die in geeigneter Schaltung für Ströme bis 100 Ampere und Spannungen bis 30000 Volt verwendet werden können. Die den Röhren und ganzen Gleichrichtern von den Fabrikanten beigegebenen Gebrauchsanweisungen sind zu beachten.

Schaltungen von Röhren mit einer und mehr Anoden sind im Abschnitt Ladeeinrichtungen zu finden, s. S. 75.

4. Das Glimmrelais.

Als solches wird ein in Abb. 99 dargestelltes Glimmentladungsgefäß bezeichnet, welches mit einem Bruchteil eines Milliampere über die Zündelektrode *Z* gezündet werden kann, und dazu dient Relais od. dgl. einzuschalten. Nach der Zündung zwischen *Z* und Kathode *K* tritt die Hauptkathode in Tätigkeit. Der Zündimpuls braucht nur sehr kurz zu sein, etwa 10^{-5} Sekunden. Die Röhre ist mit verdünntem Edelgas gefüllt.

5. Die Glimmlampe.

Die Glimmlampe dient in der Fernmeldetechnik als Signallampe, als Überspannungsanzeiger, als Stroboskop-Lichtquelle, als Drosselröhre zur Herabsetzung der Spannung und als Ventilröhre¹⁾.

Eine als Signallampe zu verwendende Röhre ist in Abb. 100 dargestellt. Diese als Bienenkorblampe bezeichnete Glimmröhre wird zum Anschluß an 110 und 220 Volt Gleich- oder Wechselstrom gebaut mit je einem Wattverbrauch von 2,5 und 4,5. Die Verbrauchsströme von etwa 20 bis 25 mA bei beiden Lampen sind durch einen im Fuß der Lampe eingebauten Widerstand (1500 Ohm für die 220-Volt-Lampe) begrenzt. Das orangefarbige Leuchten der Lampen entstammt der kathodischen Glimmschicht auf den

ineinanderlaufenden Drahtspiralen. Zu Reklamezwecken kann eine Elektrode die Form von Buchstaben, Zahlen oder Warenzeichen erhalten. Als Füllung dient bei diesen Lampen eine Mischung von Neon- und Heliumgas bei etwa 10 Tor²⁾.

Wird die Glimmlampe für Gleichstrom so an Spannung gelegt, daß der negative Pol mit der großen Elektrode verbunden ist, so leuchtet diese mit einem schwachen orangefarbenen Licht; das Licht überzieht gleichsam die Blechelektrode mit einer dünnen leuchtenden Schicht, dem negativen Glimmlicht.

Alle Edelgasröhren haben die Eigenschaft, einen bestimmten Spannungsabfall in der Röhre selbst zu verursachen, so daß hinter der Röhre nur eine sog. Restspannung auftreten kann, die nicht ganz unabhängig vom jeweils entnommenen Strom ist. Dieser Unterschied gegenüber dem Ohmschen Drahtwiderstand ist wohl zu merken, denn bei dem Ohmschen Widerstand ist die Restspannung um so kleiner, je stärker der Strom ist; ist der Strom sehr klein, so ist die Restspannung nahezu gleich der angelegten Spannung. Der Energieverbrauch der beschriebenen Lampe ist sehr gering; bei 220 Volt etwa 5 Watt. Spannungsabfall etwa 180 Volt; Restspannung etwa 40 Volt; Lebensdauer 3000 bis 4000 Stunden; Lichtstärke einige Hefnerkerzen.

Zum Betrieb einer Glimmlampe ist eine Mindestspannung zur Überwindung des Kathodenfalls erforderlich. Erreicht die Spannung

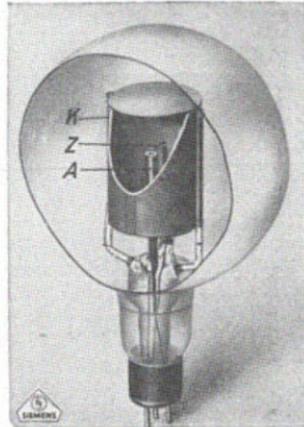


Abb. 99.



Abb. 100.

¹⁾ Schröter, F., Glimmlampen, Glimmstrecken und ihre Schaltungen. München 1939.

²⁾ 1 Tor (nach Torricelli) = 1 mm Hg-Säule.

diesen Wert nicht, so ist ein Stromdurchgang überhaupt nicht möglich. Andererseits ist eine Glimmentladung bei genügend hoher Spannung auch beim Vorschalten von hohen Widerständen möglich. Bei 0,01 Milliampere ist bereits ein Glimmen der Kathode zu beobachten.

Legt man eine Glimmlampe mit einer großen und einer kleinen Elektrode (Gleichstromlampe) mit der großen Elektrode an den + Pol, so findet überhaupt kein Stromdurchgang statt. Die Gleichstrom-Glimmlampe hat also infolge der verschieden großen Elektrodenoberflächen die Eigenschaft eines elektrischen Ventils und kann somit als Polsucher (bei genügend hoher Spannung) verwendet werden.

Abb. 101 zeigt eine Glimmröhre als Spannungsreduktor geschaltet. Die Anode der Röhre 1 ist über einen Vorwiderstand 2 und Sicherung 3 von etwa 0,25 Ampere an den + Pol eines Gleichstrom-

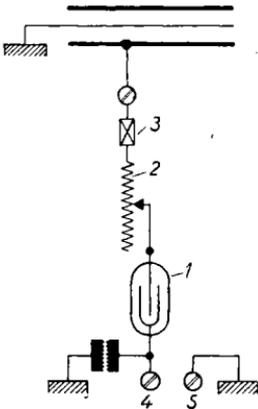


Abb. 101.

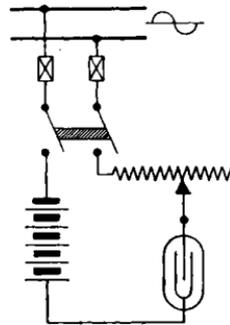


Abb. 102.

Dreileiternetzes mit geerdetem Mittelleiter gelegt. An die Klemmen 4 und 5 können beliebige Fernmeldeanlagen angeschlossen werden. Der Vorwiderstand (Silistab) wird so bemessen, daß die Röhre mit höchstens 150 mA belastet werden kann. Der Anschluß an Zweileiternetze kann erfolgen, wenn der eine Leiter betriebsmäßig geerdet ist. Es können vollständige Reduktoreinrichtungen zum Betriebe von Fernmeldeanlagen aus Gleichstrom-Starkstromnetzen von 110 und 220 Volt gebaut werden. Die reduzierte Spannung beträgt 18 bis 30 Volt. Es empfiehlt sich, vor Einbau einer Reduktorröhre von Lieferfirmen genaue Anweisungen für die Inbetriebnahme einzufordern.

Wird die Anode einer Glimmröhre ganz klein (punktförmig) ausgebildet, so ist die Ventilwirkung der Röhre so vollkommen, daß man diese zum Laden von kleinen Sammlerbatterien aus einem Wechselstromnetz benutzen kann. Abb. 102 zeigt eine Schaltung, bei der nur eine Halbwelle des Wechselstromes ausgenutzt werden kann. Um beide Wechsel auszunützen, können die Schaltungen des elektrolytischen