

Kohlrausch

**Praktische  
Physik** 2



B.G. Teubner · Stuttgart

**F. KOHLRAUSCH**

# Praktische Physik

ZUM GEBRAUCH FÜR UNTERRICHT, FORSCHUNG UND TECHNIK

Herausgegeben von

**GÜNTER LAUTZ · ROLF TAUBERT**

Unter Redaktion von

**H. FRÄNZ · W. FRITZ · R. HONERJÄGER  
W. KALLENBACH · H. KORTE · H. MINTROP  
U. STILLE · E. ZINN**

**BAND 2**

---

Bearbeitet von

**W. Baran · H. Bayer · G. Becker · G. Bittner · J. Bortfeldt  
W. E. Dahlke · G. v. Droste · H. Fränz · H. Göddecke  
J. Haase · K. J. Hanßen · R. Hausser · W. Hetzel  
H. Hintenberger · W. Hofmann † · H. Hoyer · W. Hübner  
R. Kohlhaas · G. Landwehr · H. J. Schrader · K. Seifert  
P. Seyfried · R. Taubert · G. Vibrans · H. Voshage  
S. Wagner · E. Waibel · H. M. Weiß · A. Winsel · W. Zeil**

22., neubearbeitete und ergänzte Auflage · 1968

Mit 505 Figuren



**B. G. TEUBNER · STUTTGART**

Verlagsnummer 3002

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des auszugsweisen Nachdruckes  
und der photomechanischen Wiedergabe, vorbehalten

© B. G. Teubner, Stuttgart 1968

Printed in Germany

Satz und Druck: Passavia Druckerei AG Passau

# INHALTSVERZEICHNIS

## 6. ELEKTRIZITÄT UND MAGNETISMUS

<b>6.1. Gleichstrom (Hetzel)</b> .....	<b>5</b>
6.1.1. Gleichstrom-Meßtechnik .....	5
6.1.2. Normale und Normalgeräte für Gleichstrom .....	19
6.1.3. Nachweis- und Anzeigegeräte für Gleichstrom .....	27
6.1.4. Stromstärke- und Ladungsmessung .....	48
6.1.5. Spannungsmessung im Gleichstromkreis .....	58
6.1.6. Leistungs- und Arbeitsmessung .....	69
6.1.7. Widerstandsmessung .....	72
<b>6.2. Niederfrequenter Wechselstrom (Schrader)</b> .....	<b>89</b>
6.2.1. Definition von Wechselgrößen .....	89
6.2.2. Symbolische Darstellung von Wechselstromgrößen .....	93
6.2.3. Erzeugung und Regelung von Wechselspannungen .....	96
6.2.4. Messungen bei Wechselstrom .....	99
<b>6.3. Hochfrequenter Wechselstrom</b> .....	<b>111</b>
6.3.1. Allgemeines (Bittner) .....	111
6.3.2. Erzeugung von hochfrequentem Wechselstrom (G. Becker) .....	112
6.3.3. Frequenztransformation (G. Becker) .....	131
6.3.4. Fortleitung der HF-Energie (Bittner) .....	135
6.3.5. Hochfrequenz-Wirk- und Blindwiderstände. Resonanzkreise (Bittner) .....	146
6.3.6. Störende elektromagnetische Einflüsse und ihre Verminderung (Bittner) ..	155
6.3.7. Frequenzmessung (G. Becker) .....	156
6.3.8. Messung von Spannung, Strom und Leistung (Bittner) .....	163
<b>6.4. Mikrowellen (Bayer)</b> .....	<b>172</b>
6.4.1. Allgemeines .....	172
6.4.2. Erzeugung von Mikrowellen-Schwingungen .....	174
6.4.3. Nachweis von Mikrowellen-Schwingungen .....	179
6.4.4. Mikrowellen-Leitungen .....	182
6.4.5. Mikrowellen-Schalt- und Bauelemente .....	187
6.4.6. Meßtechnik .....	195
<b>6.5. Widerstand bei Wechselstrom, Induktivität und Kapazität (Hoyer)</b> .....	<b>207</b>
6.5.1. Widerstände bei Wechselstrom .....	207
6.5.2. Induktivität .....	211
6.5.3. Gegeninduktivität .....	226
6.5.4. Kapazität .....	233
6.5.5. Technik der Wechselstrommessung an Induktivitäten, Kapazitäten und Widerständen .....	254
<b>6.6. Erzeugung und Messung magnetischer Felder (Kohlhaas)</b> .....	<b>258</b>
6.6.1. Grundbegriffe, Vorbemerkungen .....	258
6.6.2. Erzeugung magnetischer Felder .....	258
6.6.3. Abschirmung gegen magnetische Felder .....	267
6.6.4. Messung magnetischer Felder .....	268

<b>6.7. Elektrische und magnetische Stoffkonstanten</b> .....	278
6.7.1. Elektrolyte (Winsel) .....	278
6.7.2. Halbleiter und Metalle (Landwehr) .....	299
6.7.3. Austrittsarbeit (Dahlke) .....	316
6.7.4. Dielektrika (Zeil, Haase) .....	322
6.7.5. Dia- und Paramagnetika (Baran, Göddecke) .....	341
6.7.6. Ferromagnetika (Baran, Göddecke) .....	349
<b>6.8. Elektronische Bauelemente (Dahlke, Seifert)</b> .....	385
6.8.1. Grundlagen, statische Kennlinien und Kenngrößen .....	386
6.8.2. Verstärker .....	396
6.8.3. Mischung, Frequenzumsetzung .....	412
6.8.4. Schalter und Impulstechnik .....	417
6.8.5. Bauelemente zur Spannungs- und Stromstabilisierung .....	430
<b>7. KORPUSKELN UND QUANTEN, STRUKTUR DER MATERIE</b>	
<b>7.1. Ionisierende Strahlen</b> .....	433
7.1.1. Begriffe und Formeln (Fränz) .....	433
7.1.2. Strahlenquellen. Technisches (Voshage, Hanßen, Taubert, Hübner, Weiß, v. Droste) .....	443
7.1.3. Nachweis der Strahlen und Intensitätsmessung (Weiß, Seyfried, Hintenberger, Vibrans, Waibel) .....	465
7.1.4. Radioaktivität (Weiß) .....	497
7.1.5. Dosimetrie (Fränz, Hübner, Wagner) .....	525
7.1.6. Einwirkung elektrischer und magnetischer Felder (Elektronen- und Ionenoptik) (Hanßen, Taubert) .....	549
7.1.7. Messung der Energie von geladenen Korpuskeln und Quanten (Fränz, v. Droste, Seyfried, Weiß, Hofmann (durchges. v. Vibrans)) .....	569
7.1.8. Messungen an Neutronen (v. Droste) .....	596
<b>7.2. Atom- und Molekularstrahlen (G. Becker)</b> .....	604
7.2.1. Erzeugung .....	604
7.2.2. Nachweis .....	607
<b>7.3. Massenspektrometrie (Taubert)</b> .....	609
7.3.1. Spektrometertypen .....	609
7.3.2. Anwendungen .....	615
<b>7.4. Spinresonanz (Hausser)</b> .....	618
7.4.1. Magnetische Kernspinresonanz („Kernresonanz“, NMR) .....	618
7.4.2. Magnetische Elektronenspinresonanz („Elektronenresonanz“, ESR) .....	625
7.4.3. Doppelresonanzverfahren .....	630
<b>7.5. Strukturuntersuchungen</b> .....	632
7.5.1. Strukturuntersuchungen mit Röntgenstrahlen (Hofmann, durchges. v. Vibrans) .....	632
7.5.2. Strukturanalyse durch Elektronenbeugung (Hanßen) .....	650
7.5.3. Elektronenmikroskopische Untersuchungen (Hanßen) .....	652
<b>7.6. Messungen an Plasmen (Bortfeldt)</b> .....	660
7.6.1. Allgemeines über Plasmen .....	660
7.6.2. Erzeugung von Plasmen .....	661
7.6.3. Messung der Plasma-Kenndaten .....	663
<b>Sachverzeichnis</b> .....	673

## 6. ELEKTRIZITÄT UND MAGNETISMUS

### 6.1. Gleichstrom

#### 6.1.1. Gleichstrom-Meßtechnik

Glazebrook, Dictionary of Applied Physics, Vol. 2, London 1923; Golding u. Widdis, Electrical Measurements and Measuring Instruments, 5. Aufl., London 1963; Harris, Electrical Measurements, 2. Aufl., New York-London 1938; Herrmann, Die elektrische Meßtechnik I, 2. Aufl., Berlin-Leipzig 1931; Jäger, Elektrische Meßtechnik, Leipzig 1928; Laws, Electrical Measurements, 2. Aufl., New York-London 1938; Linker, Elektrotechnische Meßkunde, 4. Aufl., Berlin 1932; Moeller, Leitfaden der Elektrotechnik Bd. 4: Stöckl u. Winterling, El. Meßtechnik, 3. Aufl., Stuttgart 1963; Neumann, Das Messen mit elektrischen Geräten, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1960; Palm, Hunsinger u. Münch, Elektrische Meßgeräte und Meßeinrichtungen, 4. Aufl., Berlin-Göttingen-Heidelberg 1963; Pflieger u. Jahn, Elektrische Meßgeräte und Meßverfahren, 2. Aufl., Berlin-Göttingen-Heidelberg 1965; Arch. Tech. Mess., Sachgruppen V35, V941, J91, J93, Z11, München; Schulze, Meßwiderstände, Karlsruhe 1953; Schwerdtfeger u. Grabhof, Elektrische Meßtechnik I, 6. Aufl., Füssen 1958; Smith, Electrical Measurements in Theory and Application, 4. Aufl., New York-Toronto-London 1948; Skirl, Elektrische Messungen, 2. Aufl., Berlin-Leipzig 1936; Stanek, Technik elektr. Meßger., Berlin 1957; Stout, Basic Electrical Measurements, Englewood Cliffs, N.J. 1960.

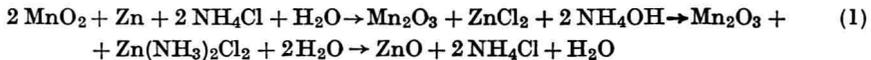
##### 6.1.1.1. Strom- und Spannungsquellen für Meßzwecke

Wagner, Stromversorgung elektronischer Schaltungen und Geräte, Hamburg-Berlin 1964.

##### 6.1.1.1.1. Elektrochemische Stromquellen

Primärelemente. Drucker u. Finkelstein, Galvanische Elemente und Akkumulatoren, Leipzig 1932; Drotschmann, Trockenbatterien, Leipzig 1945; Vinal, Primary Batteries, 3. Aufl., New York-London 1950; Huber, Trockenbatterien, München 1958.

Zink-Salmiak-Braunstein-Zelle (Leclanché-Element). Die eine Elektrode besteht aus einem Gemisch von  $\text{MnO}_2$  und Kohlepulver, die andere aus Zn; als Elektrolyt dient eine Lösung von  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (auch  $\text{MgCl}_2$ ), die in der Regel noch Zusätze anderer Salze enthält. Die stromliefernde Reaktion wird durch die Gleichung



dargestellt. Die eingepreßte Spannung beträgt im offenen Zustand 1,5 bis 1,7 V; sie sinkt im allgemeinen bei dauernder Entladung zunächst ziemlich rasch um einige 0,1 V, weiterhin langsam proportional der entnommenen Elektrizitätsmenge. Der innere Widerstand steigt bei allen Entladungsarten auf das 10- bis 15fache des anfänglichen Wertes.

Die Leistungsfähigkeit der Leclanché-Zelle, die unter normalen Bedingungen etwa 40% des Wertes beträgt, den sie mit dem vorhandenen Depolarisator theoretisch leisten könnte, wird durch Verwendung elektrolytisch hergestellten Braunsteins auf etwa 85 bis 90% gesteigert.

Drotschmann, Entladungskurven von Natur- und Kunstbraunstein, Z. Elektrochem. **35**, 195 (1929) und: Die Depolarisation im Leclanché-Element, Ohlau/Schl. 1940.

Trockenbatterien vom Leclanché-Typ sind für viele Meß-Zwecke brauchbar, da sie – insbesondere für elektronische Geräte und für Beleuchtungszwecke – in den verschiedensten Größen industriell hergestellt werden. Für größere Stromentnahme kommen Kastenbatterien, für geringere Ströme Monozellen, Taschenlampen- und Anodenbatterien, für kleinste Belastung Miniaturbatterien in Betracht. Die technischen Anforderungen sind in den Vorschriften für Galvanische Elemente und Batterien VDE 0807 und in den Normblättern DIN 40850 bis 40852 enthalten. Besondere Forderungen bestehen für Heizbatterien mit Rücksicht auf die Schädigung der Elektronenröhren durch Überspannung. Hierbei soll die Spannung des unbelasteten Elements für 1,5 V Nennspannung bei Stromentnahme bis 250 mA nach 5 s maximal 1,60 V, nach 30 min 1,57 V und nach einer Stunde 1,55 V betragen.

Außer dem Leclanché-Element, das etwa 90% der Trockenbatterieerzeugung umfaßt, ist eine Reihe von alkalischen Elementen entwickelt worden. Die alkalische Zink-Braunsteinzelle, die alkalische Zink-Quecksilberoxyd-Zelle und die alkalische Zink-Silberoxyd-Zelle werden technisch gefertigt und finden für Hörhilfen, Elektrouhren, tragbare Rundfunk- und Fernsehempfänger, Spielwaren, Fotogeräte und für wissenschaftliche und technische Zwecke Verwendung. Ihre Vorzüge sind: große Kapazität, günstige Entladekurven bei tiefen Temperaturen und bei Sondertypen auch konstante Entladespannungen. Die Reaktionen, die Leerlauf- und Arbeitsspannungen sowie die maximalen theoretischen Energiedichten enthält Tab. 1 nach Huber [ETZ-B 18, 860 (1966)].

Tab. 1. Trockenelemente; Leerlauf- und Arbeitsspannung, Energiedichten

Reaktion	Bezeichnung	Leerlaufspannung V	Arbeitsspannung V	Maximale theoretische Energiedichte	
				Wh/kg	Wh/dm <sup>3</sup>
$\text{Zn} + 2 \text{MnO}_2 \xrightarrow{(\text{NH}_4\text{Cl})} \text{ZnO} + \text{Mn}_2\text{O}_3$	Salmiak-Braunsteinzelle	1,5	1,25	280	1475
$\text{Zn} + 2 \text{MnO}_2 \xrightarrow{(\text{KOH})} \text{ZnO} + \text{Mn}_2\text{O}_3$	alkalische Braunsteinzelle	1,5	1,1–1,2	252	1298
$\text{Zn} + \text{HgO} \xrightarrow{(\text{KOH})} \text{ZnO} + \text{Hg}$	alkalische Zinkoxydzelle	1,35	1,1–1,3	229	2256
$\text{Zn} + \text{AgO} \xrightarrow{(\text{KOH})} \text{ZnO} + \text{Ag}$	alkalische Silberoxydzelle	1,85	1,5	424,4	3115

Über Lagerfähigkeit moderner Trockenbatterien s. z. B. Euler, Neue Wege der Stromerzeugung, Frankfurt/M. 1963. Angaben über Gesamtinnenwiderstand, dessen Temperaturkoeffizienten und Klemmenspannung s. Euler, Z. Elektrochem. 60, 1056 (1956). Bei 10 mA Stromentnahme liegt der Innenwiderstand einer Monozelle vom Leclanché-Typ bei rd. 0,7  $\Omega$ ; über Messung des Innenwiderstandes von Stromquellen s. 6.1.7.10.3.

Brennstoffelemente. Justi u. Winsel, Kalte Verbrennung – Fuel Cells, Wiesbaden 1962; Young, Fuel Cells I u. II, Brennstoffelemente, New York 1960 u. 1963; Bachem, Brennstoffelemente (Fuel Cells) Mainz 1965; Vielstich, Brennstoffelemente, Weinheim 1965.

Sekundärelemente. Dolezalek, Theorie des Bleiakкумуляtors, Halle 1901; Bermbach, Die Akkumulatoren, 4. Aufl., Berlin 1929; Hdb. Exp.-Phys. 12/2, S. 125, Leipzig 1932; Kretschmar, Betriebseigenschaften und Krankheiten des Bleiakкумуляtors, Berlin 1950; Droschmann, Chemie und Technik im Akkumulatorenbau, Bleiakкумуляtoren, Weinheim 1951; Milazzo, Elektrochemie, Wien 1952; Garten, Der Bleiakкумуляtor, Praxis und Theorie, 8. Aufl., München 1958; Vinal, Storage Batteries, 4. Aufl., New York-London 1955.

Bleisammler mit Schwefelsäure als Elektrolyt. Die Wirkung der Bleiakkumulatoren beruht auf der Umwandlung des auf den Platten befindlichen Bleisulfats ( $\text{PbSO}_4$ ) durch den ladenden Strom, einerseits (negativer Pol) in metallisches Blei,

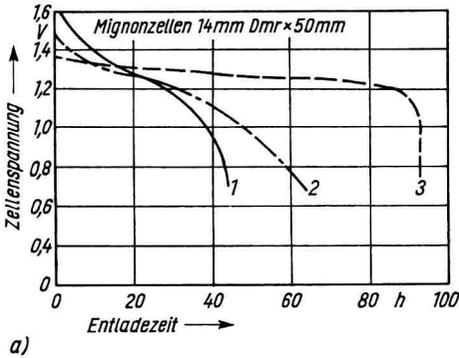


Fig. 1a) Entladekurven von Trocken-Elementen: Mignonzellen bei intermittierender Stromentnahme 25 mA täglich 6h [nach Huber, ETZ-B 18, 866 (1966)]  
 1 herkömmliche Zink-Salmiak-Braunsteinzelle (Leclanché)  
 2 alkalische Zink-Braunsteinzelle  
 3 alkalische Zink-Quecksilberoxydzelle

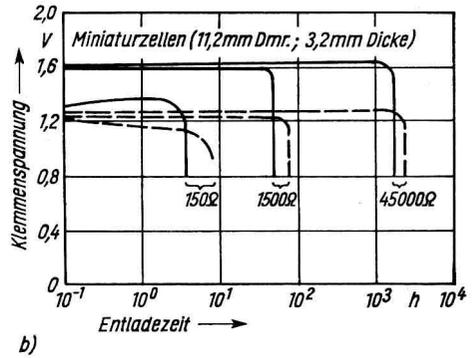
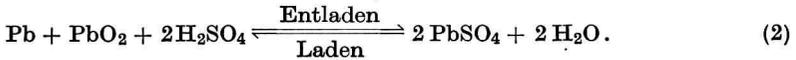


Fig. 1b) Entladekurven von alkalischen Miniaturzellen bei Dauerentladung über feste Widerstände [nach Jolas, ETZ-B 18, 873 (1966)]  
 alkalische Zink-Silberoxydzelle (—)  
 alkalische Zink-Quecksilberoxydzelle (-----)

andererseits (positiver Pol) in Bleisuperoxyd ( $\text{PbO}_2$ ), wobei Schwefelsäure abgegeben wird. Bei der Entladung wird beiderseitig  $\text{PbSO}_4$  zurückgebildet nach der Bruttoformel



Man darf nur reine (nicht in Platin eingedampfte) Säure anwenden, die von den Akkumulatorenfabriken bezogen werden kann. Die Dichte soll im geladenen Zustand je nach Vorschrift etwa 1,16 bis 1,25  $\text{gcm}^{-3}$ , im ungeladenen 0,03 bis 0,05  $\text{gcm}^{-3}$  weniger betragen. Zum Nachfüllen wird im allgemeinen 5%ige Säure geeignet sein. Die Säure soll die Platten stets reichlich 1 cm überdecken. Die Ladung ist bis zur Gasbildung fortzusetzen. Stehen die Elemente ungebraucht, so soll man zur Vermeidung der Sulfatierung alle 14 Tage wieder bis zur Gasentwicklung (2,6 V) aufladen. Sehr rasche Entladung sowie der Verbrauch der Ladung bis zu einer Abnahme der eingepprägten Spannung unter 1,7 V sind schädlich. Stark beanspruchte Elemente sind jedenfalls alsbald wieder aufzuladen. Die eingepprägte Spannung beträgt bei einer Säuredichte des Elektrolyten von 1,15  $\text{gcm}^{-3}$  und einer im Verhältnis zur normalen Entladungstromstärke kleinen Stromstärke 2,00 bis 2,02 V. Bei der gleichen Säuredichte ist der Temperaturkoeffizient der eingepprägten Spannung  $1 \cdot 10^{-4} \text{grd}^{-1}$ . Der innere Widerstand ist um so kleiner, je größer die Anzahl der Platten ist. — Elemente mit innerem Kurzschluß (welche durch die Ladung z. B. warm werden und diese rasch verlieren) sind zu entleeren. Abnorm große Spannung eines Elementes während des Ladens weist auf einen Fehler hin, der den inneren Widerstand vergrößert hat, meist durch Bildung einer inaktiven Bleisulfatschicht. Die Kapazität kann bei einer Flächengröße von  $f \text{dm}^2$  des positiven Pols bis  $4f$  Amperestunden betragen. Beim Parallelschalten ist Vorsicht wegen ungleicher Beanspruchung geboten; die Widerstände der Leitungen zu den Sammelschienen sind deshalb für gleiche Spannungsabfälle zu bemessen. Akkumulatorenwiderstände sind meist gegen den Widerstand der übrigen Leitung vernachlässigbar klein. Der Wirkungsgrad, d. h. das Verhältnis der bei der Ladung aufgenommenen zu der bei der Entladung abgegebenen Arbeit (Wattstundenverhältnis) ist 70 bis 80%. Davon zu unterscheiden ist der sogenannte Gütegrad (Amperestundenwirkungsgrad) als Verhältnis der aufgewandten zur abgegebenen Elektrizitätsmenge; er kann über 90% betragen. Man verwendet für Präzisionsmessungen vorteilhaft Bleiakkumulatoren mit

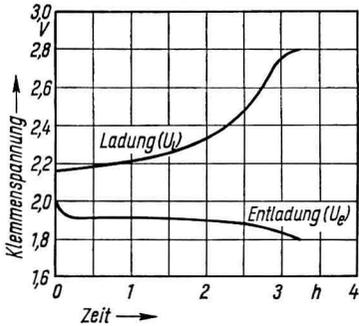
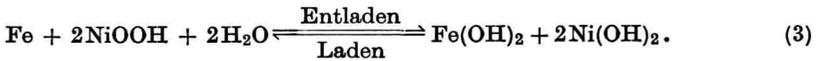


Fig. 2  
Klemmenspannung eines  
Bleisammlers bei rund 3stündiger  
Ladung und Entladung

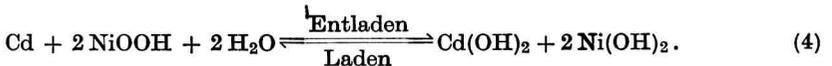
kleiner Selbstentladung (z. B. Akomet) und genügend großer Kapazität. Der zeitliche Gang der Klemmenspannung einer Akkumulatorenzelle von 20 Ah bei Belastung mit 100 mA beträgt etwa 0,001% pro Minute [Jäger u. Kußmann, Phys. Z. 28, 645 (1927)]. Frisch geladene Batterien werden nach der Ladung zunächst wieder so weit entladen, bis die steil verlaufende Spannungsabnahme im ersten Teil der Entladekurve (Fig. 2) abgeklungen ist. Auch durch Temperaturschwankungen der Batterie wird der Strom geändert, sie sind durch Wärmeschutz zu verhindern.

Eisen-Nickel-Sammler (Stahlsammler, alkalischer Sammler). Die positive Elektrode besteht aus Nickelhydroxyd, die negative aus Eisenschwamm, beide in Röhren- oder Taschenplatten aus Stahlblech eingepreßt; als Elektrolyt dient rund

20%ige Kalilauge. Die beim Laden und Entladen ablaufenden chemischen Einzelprozesse lassen sich durch die vereinfachte Beziehung zusammenfassen:



Die Klemmenspannung, im frisch geladenen Zustand 1,4 V, sinkt danach rasch auf 1,3 V und dann langsam weiter auf 1,0 V ab. Sein innerer Widerstand ist etwa 5mal so groß wie der eines Bleiakkumulators gleicher Kapazität. Wegen Selbstentladung darf man die Ni-Fe-Zelle in geladenem Zustand nicht lange Zeit stehenlassen, da sonst die negative Platte oxydiert. Durch Verwendung von Kadmiumhydroxyd in den negativen Elektroden läßt sich dieser Effekt beträchtlich vermindern. Beim Nickel-Kadmium-Sammler verläuft der Lade- und Entladevorgang nach der vereinfachten Gesamtreaktion



Durch ausreichende Dimensionierung der negativen Elektrolyt-Oberfläche (Lade- und Entlade-Reserve), in Verbindung mit antipolaren Zusätzen zur positiven Elektrode (Schutz gegen Polumkehr bei Tief-Entladung) und Bindung des Elektrolyten in mikroporösen Separatoren konnte der ständig gasdichte, lageunabhängige und wartungs-freie Nickel-Kadmium-Sammler entwickelt werden. Aus thermischen Gründen bestehen Einschränkungen in der Größe (max. etwa 30 Ah) und hinsichtlich Schnell-Ladung und -Entladung. In kleinster Form ist er als Knopf-batterie für tragbare Geräte im Gebrauch.

### 6.1.1.1.2. Gleichrichterschaltungen für Netzbetrieb

Die in Fig. 3 dargestellten Grundschaltungen mit Stromrichter-Bauelementen, die den Stromdurchgang in einer Richtung mehr oder weniger vollständig sperren, liefern Gleichspannungen und Gleichströme, deren Welligkeit von der Schaltungsweise und von der Art der Schaltelemente einschließlich des angeschlossenen Verbrauchers abhängt. Unter Welligkeit wird in der Gleichrichtertechnik das Strom- und Spannungsverhältnis von Effektivwert des Wechselstroms zum Gleichwert, z. B.  $U_{\sim}/\bar{u}$ , verstanden. Zur Unterdrückung des Wechselstromanteils dienen Siebschaltungen; im einfachsten Fall genügt der in den Schaltbildern eingezeichnete Kondensator parallel zum Verbraucher und in Reihe mit dem Innenwiderstand der Gleichrichterschaltung. Spannungsverviel-

fachung ermöglicht die Greinacher-Schaltung nach Fig. 3 d. Als Gleichrichter: Vakuum-Glühkathoden-Gleichrichter (Ventil-Gleichrichter) und Sperrschicht-Gleichrichter. Die Germanium- und Silizium-Gleichrichter haben zunehmend an Bedeutung gewonnen und die älteren Kupferoxydul- und Selen-Gleichrichter teilweise verdrängt. Sie zeichnen

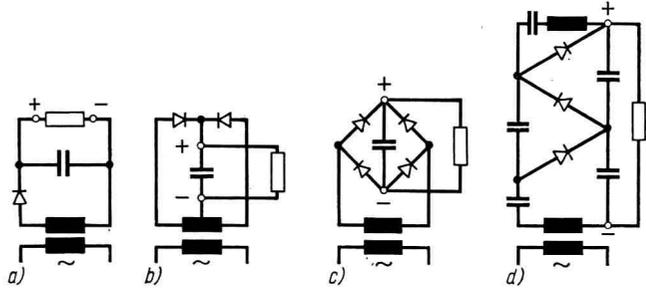


Fig. 3 Gleichrichter-Grundsaltungen  
 a) Einweg-,  
 b) Zweiweg- (Mittelpunkt-),  
 c) Brücken- (Grätz-),  
 d) Greinacherschaltung

sich aus durch sehr geringen Raumbedarf, sehr kleinen Sperrstrom relativ zum Nenn-durchlaßstrom, sehr kleinen Spannungsabfall in Durchlaßrichtung relativ zur Nenn-sperrspannung und hohe zeitliche Konstanz der elektrischen Eigenschaftswerte. Nachteilig ist die verhältnismäßig kleine Wärmekapazität und damit die Überlastungs-anfälligkeit sowie bei Germanium die geringe obere Grenze der Betriebstemperatur (rd. 65 °C) gegenüber vergleichsweise 140 °C bei Silizium. Fig. 4 zeigt die Strom-Spannungs-Kennlinien für einen Selen-, einen Germanium- und einen Silizium-Gleichrichter.

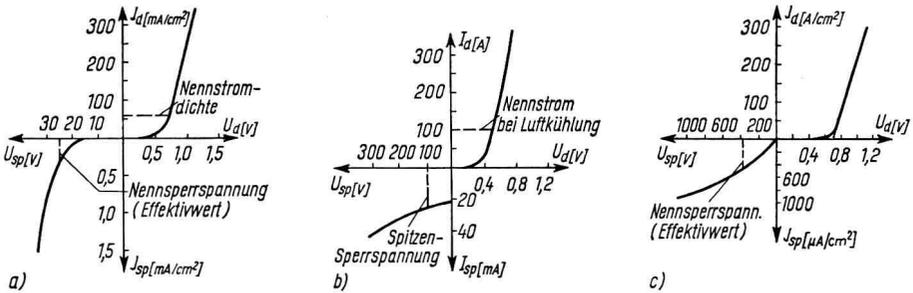


Fig. 4 Beispiele für Strom-Spannungs-Kennlinien  
 a) Selen-, b) Germanium-, c) Silizium-Gleichrichter

In der Bezeichnungswiese nach DIN 41762 werden durch Kurzzeichen angegeben: Schaltungsart, effektive Nennanschlußspannung, Nenngleichspannung und Nenn-gleichstrom, jeweils bei Widerstandslast. Es bedeutet beispielsweise B 750/600-3,4 einen Gleichrichter für Brückenschaltung mit effektiver Anschlußspannung 750 V, Nenn-gleichspannung 600 V und Nenngleichstrom 3,4 A, beides bei Widerstandslast.

6.1.1.1.3. Stabilisierte Strom- und Spannungsquellen

Konstantstromquellen erhält man unter Verwendung eines Galvanometerverstärkers (Fig. 5) oder eines Meßverstärkers mit konstanter Bezugsspannung (Normalelement, Zenerdiodenschaltung) am Eingang. Bei einem industriell gefertigten Gerät sind die Strombereiche 1 bis 100 mA, die Stabilität in 24 h beträgt ± 0,001% mit eingebautem

und  $\pm 0,0001\%$  mit äußerem Normalelement. Die Stromregelung gleicht sowohl Schwankungen der Netzspannung wie auch Widerstandsänderungen im Außenkreis (zwischen  $0$  und  $350\Omega$  bei  $1\text{ mA}$  bzw.  $35\Omega$  bei  $100\text{ mA}$ ) aus. Im Regelbereich wirkt das Gerät wie eine Stromquelle mit praktisch unendlichem Innenwiderstand. Als Konstant-Spannungsquellen für Meßschaltungen wurden elektronisch geregelte Netzgleichrichter entwickelt, die bezüglich der Spannungs Konstanz den Eigenschaften von Anoden- oder Akkumulatorenbatterien gleichkommen. Mit der praktisch trägheitslosen elektronischen Regelung läßt sich die Gleichspannung bei Schwankungen der Netzwechselfspannung von etwa  $\pm 10\%$  ihres Nennwertes so weit stabilisieren, daß ihre Änderungen weniger als  $\pm 0,01\%$  des Sollwertes betragen. Zur Beseitigung der durch die Gleichrichtung entstehenden Oberwellen in der Gleichspannung werden die üblichen Siebmittel angewandt. Die Glättung der Spannung wird außerdem von der Regelung unterstützt, so daß die verbleibende Restwelligkeit auf weniger als  $0,01\%$  des Gleichspannungswertes herabgesetzt werden kann. Darüber hinaus wirkt die Spannungsregelung auch bei Belastungsänderungen, so daß der Innenwiderstand der Spannungsquelle verschwindend gering wird. In dieser Hinsicht ist der stabilisierte Gleichrichter den Batterien noch überlegen.

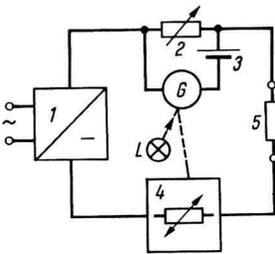


Fig. 5

Konstantstromquelle  
(Guilldline)

- 1 Netzgleichrichter,
- 2 feinstufiger Präzisionswiderstand,
- 3 gesättigtes Westonelement im Thermostat,
- 4, G, L lichtelektrischer Galvanometerverstärker mit Phototransistoren (vgl. z. B. Fig. 35),
- 5 Belastungswiderstand

Über Bauelemente zur Spannungs- und Stromstabilisierung s. 6.8.5; Hochkonstant-Netzgeräte für Meßzwecke: Helke u. Stenzel, Z. angew. Physik 6, 521 (1954); Stenzel, ATM Z 40-2, -3, -4 (1959); Stabilisierte Gleichstrom-Hochspannungsquellen: Strojnik, ATM Z 43-8 (1960); Steimel, Elektronische Speisegeräte München 1957; s.a. in: Fünfer u. Neuert, Zählrohre und Szintillationszähler, 2. Aufl., Karlsruhe 1959; Stromversorgungsgeräte mit Transistoren: Beug in: Halbleiterbauelemente in der Meßtechnik, VDE-Buchreihe Bd. 7, Berlin 1961.

Bei kleinstem Leistungsbedarf z. B. für elektrometrische Messungen zum Aufladen (Entladeverfahren) erhält man eine konstante hohe Spannung auch mit einem gut isolierten Kondensator großer Kapazität. Seine Spannung fällt nach dem Aufladen zuerst sowohl durch Ladungsverlust über die Oberfläche der Isolatoren wie auch durch Eindringen von Ladungen in die Isolatoren (Rückstandsbildung) ab; nimmt man aber nach einiger Zeit durch Berühren mit einem hohen Widerstand einen Teil der Ladung fort, so bleibt die Spannung eine Zeitlang konstant, weil der nun frei werdende Rückstand den Ladungsverlust ausgleicht. Ein kleiner Gang der Spannung läßt sich durch alternierendes Beobachten eliminieren. – Wenn man einen variablen Kondensator (z. B. Drehkondensator) bei größter Kapazität mit einer mittleren Spannung auflädt und ihn dann auf seine kleinste Kapazität bringt, kann man die zehnfache Spannung und mehr erreichen.

Spannungsquellen für elektrometrische Messungen s. Walch, Z. techn. Phys. 20, 89 (1939); Küstner u. Hase, Z. phys.chem. Unterricht 52, 194 (1939).

#### 6.1.1.1.4. Elektrostatische Generatoren

Zur direkten Erzeugung sehr hoher Gleichspannungen werden elektrostatistische Generatoren benutzt. Mit Bandgeneratoren nach van de Graaff können Gleichspannungen bis zu rund  $2\text{ MV}$  und Stromstärken bis etwa  $1\text{ mA}$  erzeugt werden. Auch die alte Influenzmaschine, die technisch weiterentwickelt wurde (Félicci, Jolivet), kommt für Anwendungen in der Hochspannungstechnik in Betracht, bei denen Spannungen von einigen  $100\text{ kV}$  und Stromstärken von mehreren  $\text{mA}$  benötigt werden. Hauptsächlich für Hochspannungsprüffelder, aber auch für andere Verwendungszwecke hat Böning einen Gleichspannungsgenerator für rund  $1\text{ MV}$  geschaffen, der aus einer Anzahl Kon-

densatoren besteht, die in Parallelschaltung mit verhältnismäßig geringer Gleichspannung aufgeladen und danach auf Serienschaltung umgeschaltet eine entsprechend der Kondensatorzahl vervielfachte Spannung liefern. Mit Hilfe einer mechanischen Schaltvorrichtung, die fortgesetzte Umschaltung der Kondensatoren bewirkt, wird Dauerbetrieb des Generators mit stetiger Stromabgabe erreicht.

Zusammenfassende Darstellungen über elektrostatische Generatoren, insbesondere Band- und Staubgeneratoren (mit zahlreichen Lit.-Hinweisen) s. Müller, *ATM Z 43-1* (1938), *ATM Z 43-2* (1938), *ATM Z 43-3* (1939); Gentner, Erzeugung schneller Ionenstrahlen für Kernreaktionen (*Ergebn. exakt. Naturw.* **19**, insbes. S. 108 bis 117 (1940)); Flegler, Hochspannungstechnik 2 in: *Phys. regeln. Ber.* **9** (1941); Neubert, *Elektrostatik in der Technik*, 2. Aufl., München 1954. Sonstige elektrostatische Generatoren: Felici, *Elektrostatische Hochspannungs-Generatoren und ihre industrielle Anwendung*, Karlsruhe 1957; ders., *Schweizer Techn. Z.* **45**, 577 (1948); Jolivet, *Revue Générale de l'Electricité* **62**, 25 (1953) (dort weiteres Schrifttum). Hochspannungsgenerator nach Böning: *E. u. M.* **59**, 69 (1940), Böning, Felten und Guillaume-Rundschau, **30**, 128 (1950).

#### 6.1.1.1.5. Maschinen-Generatoren

Die von Gleichstromgeneratoren erzeugte Spannung ist veränderlich mit dem Erregerstrom, der Antriebsdrehzahl, dem Belastungsstrom und dem inkonstanten Bürstenübergangswiderstand. Für Meßzwecke verwendet man Antriebe konstanter Drehzahl (z. B. Synchronmotoren) und speist die Erregerwicklung des Generators aus einer Batterie. Die als Folge von Belastungsänderungen auftretenden Spannungsschwankungen können durch feldverstärkende Verbundwicklungen verkleinert werden. Gleichspannungen, die mit einer Genauigkeit von weniger als  $\pm 0,1\%$  konstant bleiben, lassen sich bei Generatoren nur durch Verwendung von Spannungsschnellreglern (Röhrenregler, Thyatronregler, Öldruckregler oder ähnliches) erzielen.

Vieweg, *Hdb. Phys.* **17**, 238 (1926); Humburg, *Die Gleichstrommaschine*, Berlin 1956; VDE 0570/7.57, Regeln für Klemmenbezeichnungen, Berlin 1957.

Die Spannung der üblichen Gleichstromgeneratoren ist infolge der Nutzung des Ankers und der Kollektorteilung mit Oberwellen behaftet. Oberwellenfreie Spannung liefert die Unipolarmaschine. Da bei der unipolaren Induktion zwar die Parallelschaltung, jedoch nicht die Reihenschaltung mehrerer Ankerleiter möglich ist (bzw. nur durch Verwendung zweier zusätzlicher Schleifringe für jeden in Reihe geschalteten Ankerleiter ermöglicht werden kann), bleibt die Anwendung dieser Maschinen auf die Erzeugung hoher Gleichströme bei niedrigen Spannungen beschränkt.

Zorn, *ETZ* **61**, 358 (1940).

#### 6.1.1.2. Schaltungstechnische Hilfsmittel

##### 6.1.1.2.1. Schalter und Kontakte

Samal, *Schalter, Klemmen und Kontakte für Meßzwecke*, Karlsruhe 1957.

Bei Präzisionsmessungen verwendet man außer Schleif- und Messerkontakten besonders Stöpselkontakte mit eingeschliffenen Stöpseln und Quecksilberkontakte; letztere sind wegen ihres geringen Übergangswiderstandes vorzuziehen. Fig. 6 zeigt einen Pol-

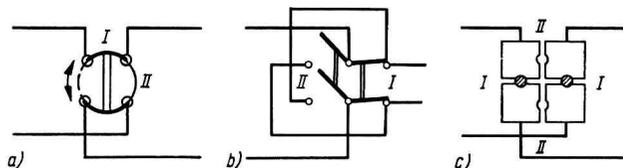


Fig. 6 Einfache Umschalter, Schalterstellungen I bzw. II, mit a) Quecksilber-, b) Messer- und c) Stöpsel-Kontakten

wender, a) mit Quecksilberkontakten, b) mit Messerkontakten, c) mit Stöpselkontakten. Als niederohmige Kontakte (unter  $0,5 \mu\Omega$ ) für Präzisionsmessungen sind Flächenkontakte zwischen amalgamierten Kupferflächen den üblichen Quecksilbernäpfen überlegen. Wenner, Journ. Res. Nat. Bur. Stand. **25**, 229 (1940).

Klemmschrauben geben mit blanken Runddrähten besseren Kontakt als mit Kabelschuhen (Fließen der Oberflächenschichten unter Druck), s. Holm, Technische Physik der elektrischen Kontakte, Berlin 1941. Weitere Angaben s. Samal a.a.O.

Lade- und Erdschalter für elektrometrische Messungen. Eine einfache in die elektrostatische Schutzvorrichtung des Elektrometers *Em* eingebaute Form zeigt Fig. 7 a. Die Stifte *L* und *Er* tragen am Ende kleine Kontaktfedern, deren Spitzen ebenso wie die

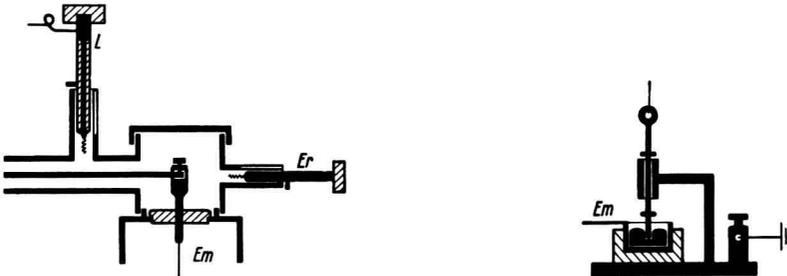


Fig. 7 Schalter für elektrometrische Messungen  
a) Lade- und Erdungs-Schalter mit elektrostatischem Schirm, b) einfacher Erdungs-Schalter

gegenüberliegenden Kontaktflächen, wenn nötig, aus Platin oder einem anderen Kontaktmetall (z. B. Gold- oder Silberlegierungen) bestehen. Seitlich sind sie mit kleinen Zapfen versehen, die in einem Schlitz des Führungsrohres gleiten und den Schaltstift nach genügendem Anheben durch eine kleine Drehung in der offenen Stellung festhalten. Der Ladeschalter, der von dem Schutzrohr isoliert sein muß, soll sich in dieser Stellung ganz im Inneren des Führungsrohres befinden. Eine andere Form eines Kontaktschalters zeigt Fig. 7 b. Er wird zusammen mit dem Elektrometer *Em* in einem Schutzkasten untergebracht; ein senkrecht geführter Messingstift, dessen Spitze in ein isoliertes, mit Quecksilber gefülltes Metallnäpfchen taucht, kann mit einer Schnur hochgezogen werden. Um Reibungselektrizität zu vermeiden, fülle man das Quecksilber nicht in ein Näpfchen aus Isolierstoff! Auch elektromagnetisch betätigte Schalter werden oft verwendet. –

#### 6.1.1.2.2. Technische Widerstände

Stell- und Belastungswiderstände dienen zur stufenweisen oder stetigen Strom- und Spannungseinstellung und sind mit Stufenschaltern oder als Schiebe- und Drehwiderstände ausgeführt. Tafel A 86 a gibt eine Übersicht über Zusammensetzung, spezifischen Widerstand, Temperaturkoeffizienten und höchste Gebrauchstemperatur von Widerstandswerkstoffen für technische Widerstände. Das Nomogramm Fig. 8 zur Berechnung von Drahtwiderständen gibt für Runddrähte den Zusammenhang zwischen dem Drahtdurchmesser in mm, dem spezifischen Widerstand in  $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  und dem Widerstand pro Längeneinheit in  $\Omega/\text{m}$ . Die technischen Daten für genormte Drahtwiderstände für Belastungen bis 50 W mit Garantiefehler-Klassen 1, 2 und 5 enthalten die DIN-Blätter E 41410 bis 41423, in denen auch die Bedeutung der Klassen erläutert ist. Die Widerstandswicklung besteht meist aus Konstantandraht, als Tragkörper dienen keramische Voll- oder Hohlkörper, deren Enden Lötflächen oder Anschlußschellen tragen. Diese Widerstände werden in der Nachrichten- und Starkstromtechnik angewandt. In Hochspannungsschaltungen verwendet man häufig Widerstandskordeln, bei denen eine isolierende Kordel als Träger für die Widerstandswicklung aus feinem Manganin- oder Chromnickeldraht dient. Sie werden mit Widerstandswerten von mehreren  $\text{M}\Omega$

je laufenden Meter hergestellt. Kohle-schichtwiderstände bestehen aus dünnen ( $0,2$  bis  $2 \cdot 10^{-4}$  mm) Glanzkohlenstoff-schichten, die im Vakuum durch Zersetzung von Kohlenwasserstoffen bei rund  $1000^\circ\text{C}$  auf keramischen Trägern niedergeschlagen werden. Sie sind weitgehend spannungsunabhängig, und ihre Werte bleiben auch bei längerer Belastung unverändert. Ihr Temperaturkoeffizient beträgt  $-3 \cdot 10^{-4}$   $\text{grd}^{-1}$ ; die spezifische Belastbarkeit ist  $0,2$  bis  $0,3$   $\text{W}/\text{cm}^2$ . Die Widerstände werden in Größen von  $10 \Omega$  bis  $10^4$   $\text{M}\Omega$  und für Belastungen von  $0,01$  bis  $200$   $\text{W}$  hergestellt. Für Meßzwecke bestimmte Typen haben eine Konstanz von rd.  $1\%$  pro Jahr.

Metallschichtwiderstände werden durch Aufdampfen von Edelmetall-Legierungen in dünnen Schichten mit Widerstandswerten bis  $10$   $\text{M}\Omega$  hergestellt. Der Temperaturkoeffizient bei Raumtemperatur liegt zwischen  $0,001$  und  $0,1\%$ / $\text{grd}$ .

Hartmann u. Dossmann, Z. techn. Phys. **9**, 434 (1928); Nottebrock, Ver. Geb. d. Nachrichtentechnik **2**, 143 (1932); Siemens-Druckschr. S. H. 4784; ATM Z 117-2 (1934); Schulze u. Bender, Elektrotechnik **1**, 97 (1947). Hoffmeister, Widerstandskunde für Radio-praktiker, 5. Aufl., München 1965.

**Thermische Belastbarkeit von Widerständen.** Bei allen Widerständen ist auf die thermische Belastbarkeit besonders zu achten. Für Schiebewiderstände ergibt sich nach Moeller (s. u.) für Übertemperaturen von  $250$   $\text{grd}$  am Widerstand und  $60$   $\text{grd}$  an Unterlage und Bedienungsgriff in waagerechter Gebrauchslage eine zulässige Flächenbelastung von  $0,5$   $\text{W}/\text{cm}^2$  Oberfläche des Drahtbelages unter Zugrundelegung einer Wärmeübergangszahl von  $20$   $\text{W}/(\text{m}^2 \text{grd})$ . Voraussetzung ist natürliche Luftkühlung bei ungehindertem Luftzutritt, Umgebungstemperatur  $20^\circ\text{C}$ . Für frei gespannte Drahtspiralen mit freiliegenden, aber dicht benachbarten Einzeldrähten werden als zulässige Dauerstrom-

stärke  $I = 3,5 \sqrt[3]{d^2}$  (Z.W.G.: Stromstärke  $I$  in A,  $d$  Drahtdurchmesser in mm) angegeben, gültig für Drahtmaterial aus Isabellin oder Konstantan bei Luftkühlung und  $250$   $\text{grd}$  Übertemperatur. Widerstandsgitter z. B. Schniewindband erreichen bei Flächenbelastungen der Gitterfläche von  $1$   $\text{W}/\text{cm}^2$  eine Eigentemperatur von  $300^\circ\text{C}$ . (Über die Belastbarkeit von isolierten Leitungen s. VDE 0100).

Moeller, Erwärmung von Schiebewiderständen, ETZ **56**, 1143 (1935) und ders. Strom-Spannungs- und Phasenregelung für Meßzwecke, Karlsruhe 1949.

**6.1.1.2.3. Grundsaltungen zur Strom- und Spannungseinstellung in Gleichstromkreisen**  
Spannungsteilerschaltung zur Erzielung beliebig kleiner Spannungen aus einer Spannungsquelle mit unveränderlicher Spannung (Fig. 9a). Die Ausgangs-Leerlaufspannung ist

$$U_a = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_e; \quad (5)$$

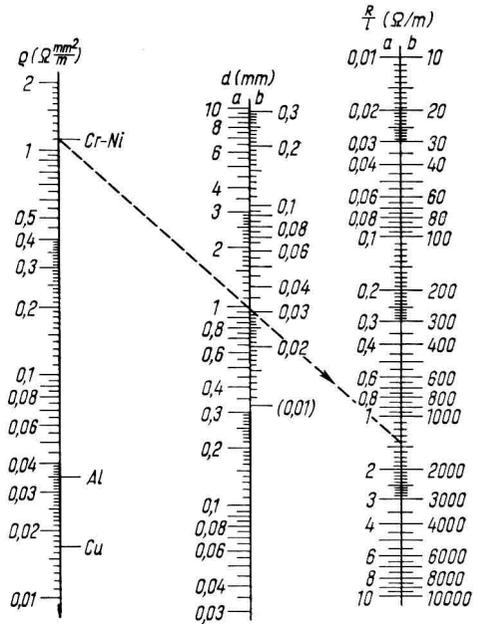


Fig. 8 Nomogramm zur Berechnung des Meterwiderstandes von Runddrähten aus Durchmesser  $d$  und spezifischem Widerstand  $\rho$

hierbei bedeuten  $U_e$  die Eingangsspannung,  $R_1$  und  $R_2$  die Teilwiderstände. Dieses Spannungsverhältnis gilt näherungsweise auch bei Belastung, solange der Belastungsstrom klein im Verhältnis zu dem durch den Teilerwiderstand fließenden Querstrom bleibt.

Feinstufige Spannungseinstellung (Fig. 9b). Durch Verwendung eines einstellbaren Spannungsteilers  $R_T$  und eines Vorwiderstandes  $R_V$  läßt sich geringere Stufigkeit

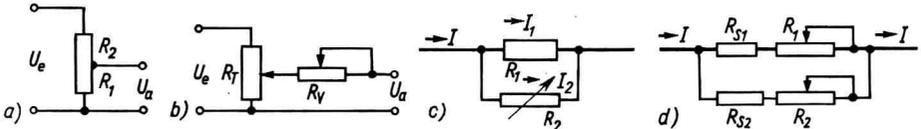


Fig. 9 Grundsaltungen zur Strom- und Spannungseinstellung in Gleichstromkreisen  
 a) Spannungsteiler, c) Stromverzweigung einfach,  
 b) Spannungsteiler mit Vorwiderstand, d) grob- und feinstufig

erzielen; durch den Vorwiderstand  $R_V$  werden die groben Spannungsstufen des Teilers  $R_T$  feinstufig überbrückt. Vorwiderstand und Teiler müssen der Belastung an  $U_a$  angepaßt sein.

Stromverzweigung (Fig. 9c). Der Zweig-Strom  $I_2$  im Widerstand  $R_2$  ist

$$I_2 = I_1 \frac{R_1}{R_2} = I \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (6)$$

Mit  $R_2 \gg R_1$  läßt sich der Zweigstrom  $I_1$  um kleinste Bruchteile ändern; eine Widerstandsänderung in  $R_2$  wirkt sich praktisch mit dem Faktor  $R_1/R_2$  verkleinert in  $I_1$  aus.

Feinstufige Stromeinstellung (Fig. 9d). Durch den Stellwiderstand  $R_2$  werden die Stufen des grobstufigen Widerstandes  $R_1$  feinstufig überbrückt.  $R_{S1}$  und  $R_{S2}$  sind Schutzwiderstände, die die Stellwiderstände vor Überlastung schützen.

Eine übersichtliche Darstellung betr. Bereich, Stufigkeit, Empfindlichkeit, Wirkungsgrad bei der Strom- u. Spannungseinstellung mit Vorschaltwiderstand, mit Spannungsteiler und mit kombinierten Schaltungen bei Moeller, Strom-, Spannungs- und Phasenregelung für Meßzwecke, Karlsruhe 1949 (mit zahlreichen Literaturangaben).

### 6.1.1.3. Ersatzschaltbilder, lineare Widerstandsschaltungen

Die klassische Methode zur Berechnung von Strömen und Spannungen in verzweigten Widerstandsschaltungen beruht auf der Anwendung der Kirchhoffschen Regeln:

An jedem Verzweigungspunkte mehrerer Leiter ist die Summe der zu- und abfließenden Ströme, letztere mit entgegengesetztem Vorzeichen genommen, gleich Null, also  $\sum_{z=1}^n I_z = 0$ .

In einem beliebigen, in sich geschlossenen Stromkreis ist die Summe der Produkte  $I_z R_z$  aus den einzelnen Widerständen  $R_z$  und den sie durchfließenden Strömen  $I_z$  gleich der Summe der in diesem Kreise vorhandenen eingepprägten Spannungen  $E_w$  (auch Elektromotorische Kraft, EMK). Demnach ist

$$\sum_{w=1}^m E_w - \sum_{z=1}^n I_z R_z = 0 \quad (7)$$

Hieraus ergeben sich unter anderem die Folgerungen:

Für in Reihe geschaltete Widerstände  $R = \sum_{z=1}^n R_z$ .

Für parallel geschaltete Widerstände  $\frac{1}{R} = \sum_{z=1}^n \frac{1}{R_z}$ .

**Netzwerks-Sätze.** Die Berechnung von Strömen und Spannungen in einzelnen Zweigen von zusammengesetzten linearen Widerstands-Schaltungen wird häufig stark abgekürzt durch die Anwendung einfacher Netzumwandlungsregeln und Hilfssätze aus der Zweipol- und Vierpoltheorie. Der Berechnung von Widerstands-Netzen werden gleichwertige Ersatzschaltungen zugrunde gelegt.

**Dreieck-Stern-Umwandlung.** Für die Umwandlung eines Widerstands-dreiecks aus den Widerständen  $R_1, R_2$  und  $R_3$  und den Leitwerten  $G_1, G_2$  und  $G_3$  in einen gleichwertigen Stern mit den Widerständen  $R_a, R_b$  und  $R_c$  und den Leitwerten  $G_a, G_b$  und  $G_c$  (Fig. 10) gelten die Gleichungen nach Tabelle 2.

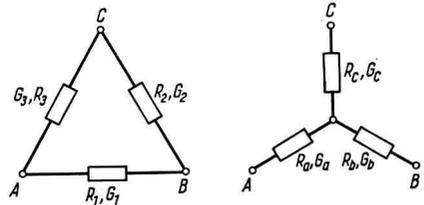


Fig. 10 Dreieck-Stern-Umwandlung

Tab. 2. Dreieck-Stern-Umwandlung

<p>Stern-Widerstände:</p> $R_a = R_1 R_3 / (R_1 + R_2 + R_3)$ $R_b = R_1 R_2 / (R_1 + R_2 + R_3)$ $R_c = R_2 R_3 / (R_1 + R_2 + R_3)$	<p>Dreieck-Widerstände:</p> $R_1 = R_a + R_b + R_a R_b / R_c$ $R_2 = R_b + R_c + R_b R_c / R_a$ $R_3 = R_c + R_a + R_c R_a / R_b$
<p>Stern-Leitwerte:</p> $G_a = G_1 + G_3 + G_1 G_3 / G_2$ $G_b = G_1 + G_2 + G_1 G_2 / G_3$ $G_c = G_2 + G_3 + G_2 G_3 / G_1$	<p>Dreieck-Leitwerte:</p> $G_1 = G_a G_b / (G_a + G_b + G_c)$ $G_2 = G_b G_c / (G_a + G_b + G_c)$ $G_3 = G_c G_a / (G_a + G_b + G_c)$

Bei Wechselstromschaltungen treten an die Stelle der Wirkwiderstände  $R$  und Wirkleitwerte  $G$  die entsprechenden komplexen Größen.

**Vierpol-Darstellungen.** Die Fig. 11a bis 11c zeigen die gebräuchlichen Ersatz-Schaltbilder eines Vierpols in T-(Stern-),  $\Pi$ -(Dreieck-) und X-(Brücken-) Darstellung.

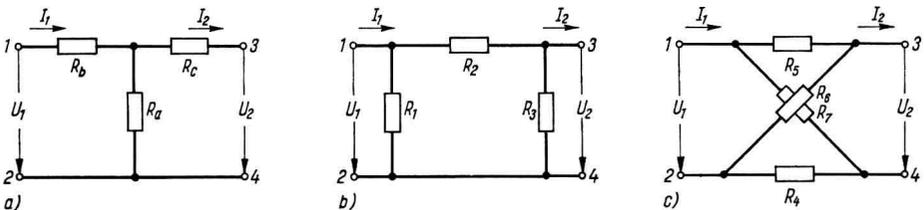


Fig. 11 Vierpol-Ersatzschaltungen  
a) T-(Stern-), b)  $\Pi$ -(Dreieck-), c) X-(Brücken-)vierpol

**Grundgleichung der Zweipolquelle.** Helmholtz-Satz (Thevenin's Theorem). Jede Schaltung aus linearen Widerständen und konstanten Zweipolquellen kann bezüglich ihrer Wirkung auf irgendeinen Widerstandszweig der Schaltung ersetzt werden durch eine Reihenschaltung aus Ersatz-Spannung und Ersatzwiderstand: die Ersatz-Spannung ergibt sich als Leerlaufspannung an den Klemmen nach Entfernen des betreffenden Widerstandszweiges, der Ersatzwiderstand als Widerstand zwischen diesen Klemmen, wenn alle inneren Zweipolquellen durch ihre Innenwiderstände ersetzt werden (d. h. als Quotient aus Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom). Die Bestimmung des Galvano-

meterstromes in Brücken- und Kompensator-Schaltungen kann u. a. mit Hilfe dieses Satzes vereinfacht werden.

Helmholtz, Poggend. Ann. **89**, 211 (1853).

Mit dem **Kompensations-Satz** ist es u. a. möglich, die Wirkung einer kleinen Abänderung in einem Zweig einer Meßschaltung, beispielsweise einer Meßbrücke, auf den Indikator direkt zu berechnen: In einer aus linearen Widerständen und konstanten Quellen bestehenden Schaltung werden die durch Abänderung eines den Strom  $I$  führenden Widerstandes  $R$  um den Betrag  $\Delta R$  bewirkten Stromänderungen in allen Zweigen der Schaltung aufgehoben durch eine im gleichen Zweig eingeschaltete, entgegengesetzt wirkende Quellenspannung  $I\Delta R$ . Für viele Abschätzungen genügt es dabei mit ausreichender Genauigkeit, mit dem ungeänderten Widerstand  $R$  anstelle von  $R + \Delta R$  in der Schaltung zu rechnen und nur die Zusatzspannung  $I\Delta R$  im betreffenden Widerstandszweig zu berücksichtigen.

Für lineare Schaltungen mit mehreren Stromquellen gilt der **Überlagerungssatz**, wonach sich die Ströme und Spannungen in jedem Schaltungszweig als Summe aus der unabhängigen Wirkung jeder einzelnen Stromquelle errechnen lassen.

**Umkehrungssatz.** Wenn im Zweig  $m$  eines Widerstandsnetzes, für welches die Kirchhoffschen Gesetze gelten (passive, lineare und umkehrbare Vierpolschaltung), eine konstante Spannungsquelle eingeschaltet wird und dabei in einem anderen Zweig  $n$  den Strom  $I$  hervorruft, dann ruft die gleiche Spannungsquelle, wenn sie im Zweig  $n$  eingeschaltet wird, einen ebenso großen Strom  $I$  im Zweig  $m$  hervor.

Zusammenfassende Darstellungen der Zwei- und Vierpoltheorie u. a. bei Küpfmüller, Einf. i. d. theoretische Elektrotechnik, 8. Aufl., Berlin 1965; Oberdorfer, Lehrb. der Elektrotechnik Bd. II, 5. Aufl., München-Berlin 1949; Wallot, Theorie der Schwachstromtechnik, 3. Aufl., Berlin 1943; Feldtkeller, Einf. i. d. Vierpoltheorie der elektr. Nachrichtentechnik, Leipzig 1944. Zur Berechnung von Meßschaltungen: Krönert, Meßbrücken u. Kompensatoren, Bd. 1, München 1935.

Berechnung von Ausschlagbrücken, Strom- u. Spannungsteilern mit Vierpolparametern z. B.: Meyer, ATM Z 65-6 (1951); Schwarzer, ATM Z 65-9 (1960), - 10 (1962), J 90 - 5, 354 (Juli 1965); Skalicky, ATM R 141, 334 (Nov. 1963).

Über graphische Lösungsverfahren für die nichtabgeglichene Wheatstonebrücke: Ranschburg, ETZ **55**, 1012 (1934); Skalicky, Elektrotechn. u. Masch.-bau **69**, 337 (1952).

#### 6.1.1.4. Maßnahmen und Hilfsmittel gegen Störgrößen

##### 6.1.1.4.1. Mechanische Stabilität

der Aufstellung ist bei allen hochempfindlichen Galvanometern und Elektrometern, besonders bei solchen mit freier Aufhängung, notwendig. Auch elektronische Geräte sind u. U. empfindlich gegen mechanische Erschütterungen. Für geringere Ansprüche an die Erschütterungsfreiheit stellt man das Instrument auf Tennisbälle oder auf einen aufgepumpten Luftschlauch bzw. Luftpolster. Bei größeren Anforderungen wird die Juliussche Aufhängung benutzt, bei der das Galvanometer auf einer schweren Grundplatte steht, die ihrerseits mittels dreier Stahldrähte oder Federn aufgehängt ist. Durch Laufgewichte kann man den Schwerpunkt in die Mitte der ganzen Anordnung verlagern. Eventuelle Schwingungen des Systems können durch lose Watte oder Gefäße mit Öl stark gedämpft werden.

Über weitere Einzelheiten und Abarten vgl. Julius, Wied. Ann. **56**, 151 (1895); Z. Instrkde. **16**, 267 (1896); Ann. Phys. **18**, 206 (1905); White, ebd. **22**, 195 (1907); Johnsrud, J. Opt. Soc. Am. **10**, 609 (1925); Carman, ebd. **6**, 694 (1922); eine verbesserte Aufstellung auf Tennisbällen bei Baker, J. Sci. Instr. **29**, 299 (1952); eine Abart der Juliusschen Aufhängung, bei der die Grundplatte auf drei Stabstützen aufgestellt wird, bei Müller, Ann. Phys. **1**, 614 (1929). Systeme mit Rollschwingungen bei Wilbur-Ham, J. Sci. Instr. **39**, 19 (1962); Thingwaldt, Wiss. Abh. PTB **16**, 26 (1964).