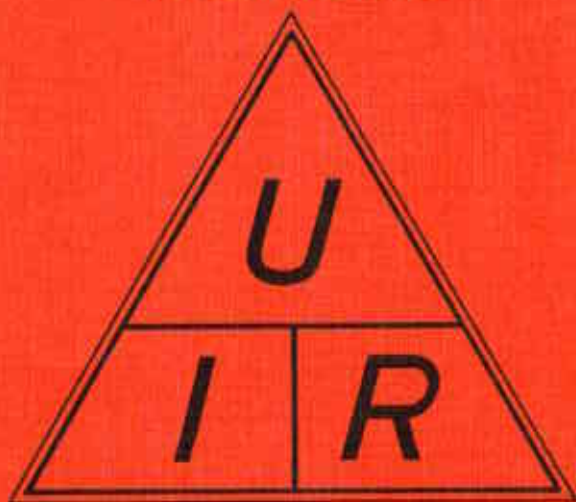

Handbuch

der

Fernmeldetechnik

Grundreihe



Band 3

**Grundlagen der Gleich-
und Wechselstromlehre**

Teil 1

Handbuch der Fernmeldetechnik

— Grundreihe —

13

wichtige Lehr- und Lernwerke (mit Repetitoren)
für Auszubildende

Band 1

— Allgemeine Berufskunde

Berufsbildungsgesetz — Berufsausbildungsvertrag — Ausbildungs- und Prüfungsordnung für Fernmeldehandwerker — Jugendarbeitsschutzgesetz — Dienstverhältnisse bei der Deutschen Bundespost — Staatsaufbau — Grundrechte und -pflichten des Staatsbürgers — Tarifverträge für Fernmeldelehrlinge und Arbeiter bei der DBP — Sozialeinrichtungen — Personalvertretungsgesetz — Aufbau und Aufgaben der DBP — Fernmelderecht — Verhalten gegenüber dem Kunden, Schadenshaftung — Arbeitsschutz und Unfallverhütung — Schriftformen von Meldungen, Gesuchen und Prüfungsarbeiten

● Repetitor zum Band 1

Band 2

— Grundkenntnisse der Mathematik und der Physik (mit Lösungsheft)

Rechnen mit bestimmten Zahlen — Buchstabenrechnung — Potenzrechnung — Radizieren — Die Lehre von den Gleichungen — Die grafische Darstellung von Funktionen — Proportion — Kreisfunktionen — Dreisatz- und Prozentrechnung — Zahlensysteme — Stabrechnen — Aufbau und Zustandsformen der Körper — Arbeit und Leistung — Einfache Maschinen — Wärmelehre — Akustik — Optik

● Repetitor zum Band 2

Band 3

— Grundlagen der Gleich- und Wechselstromlehre (2 Teile)

Grundlagen der Gleichstromlehre — Wirkungen des Stroms — Das elektrische Feld — Magnetismus — Wirkungen des Magnetismus — Grundlagen der Wechselstromlehre — Die Messung elektrischer Größen — Transformatoren — Fernmeldeübertrager

● Repetitor zum Band 3

Band 4

— Aufgabensammlung zu Band 3 (mit Lösungsheft)

— Weitere Lehrbücher siehe 3. und 4. Umschlagselte —

Handbuch der Fernmeldetechnik

Grundreihe

Herausgegeben mit Unterstützung
des Bundesministers
für das Post- und Fernmeldewesen

Band 3

Grundlagen der Gleich- und Wechselstromlehre

Teil 1

2., verbesserte Auflage

Deutsche Postgewerkschaft - Hauptvorstand - Verlag - 6 Frankfurt 71 - Rhonestraße 2

Vorwort

Das insgesamt 13 Bände umfassende „Handbuch der Fernmeldetechnik – Grundreihe“ soll den Auszubildenden während der gesamten Ausbildungszeit ein ständiger Begleiter sein und ihnen in möglichst enger Anlehnung an das in der „VO über die Berufsausbildung zum FHandw“ festgelegte Berufsbild eine umfassende und gute Prüfungsvorbereitung ermöglichen. Damit dieses Ziel erreicht wird, gehen wir von dem in dem Ausbildungsrahmenplan stichwortartig angegebenen Grundlernstoff aus, der dann schwerpunktmäßig in dem notwendigen Ausmaß ergänzt wird. Die Frage nach dem Wie, Warum und Wozu steht hierbei immer im Mittelpunkt der Überlegungen.

Der vorliegende Band 3 „Grundlagen der Gleich- und Wechselstromlehre“ vermittelt dem Auszubildenden den Lehrstoff über die gesamte Elektrotechnik, den er sich im Rahmen der Kenntnisvermittlung während der ersten beiden Ausbildungsjahre aneignen muß. Alle Sachgebiete sind durch zahlreiche Abbildungen und Rechenbeispiele anschaulich ergänzt. Durch praxisnahe Meßübungen erhält der Auszubildende die Möglichkeit, das theoretisch Erlernte meßtechnisch nachprüfen zu können. Der zugehörige Band 4 „Aufgabensammlung zu Band 3“ ermöglicht es dem Lernenden, seine Kenntnisse im technischen Rechnen nachhaltig zu erweitern und zu festigen.

Die Verfasser erheben nicht den Anspruch, daß die Bände alle Vorschriften und technischen Einzelheiten sowie auch das in der Praxis selten Vorkommende enthalten. Ihnen ging es vielmehr darum, ein Lehrbuch zu schaffen, das der gestellten Aufgabe ohne unnötigen Ballast im Interesse der Leser gerecht wird.

Wir hoffen, daß sich dieser aus der Praxis für die Praxis geschriebene Band sowohl während der Ausbildungszeit als auch darüber hinaus als Lern- und Nachschlagewerk bewähren wird.

Die Herausgeber

Hinweis

Der Band 3 des „Handbuchs der Fernmeldetechnik – Grundreihe“ besteht aus den Teilen 1 und 2. Beide Teile ergänzen sich und bilden ein Ganzes.

Im Teil 2 des Bandes wird folgender Lehrstoff behandelt:

6. Magnetismus und seine Größen
7. Die Wirkungen des Magnetismus
8. Grundlagen der Wechselstromlehre
9. Der zusammengesetzte Wechselstromkreis
10. Die Messung elektrischer Größen
11. Transformatoren / Fernmeldeübertrager
12. Elektrische Maschinen

Stand: Frühjahr 1973

Nachdruck, auch auszugsweise, nicht gestattet.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einführung in die Elektrizitätslehre	
1.1. Der Begriff „Elektrizität“	7
1.2. Bedeutung der Elektrizität	9
1.3. Elektronen als Grundlage der Elektrizität	9
1.3.1. Aufbau und elektrisches Verhalten der Stoffe	9
1.3.2. Leiter und Nichtleiter	15
1.3.3. Elektronenbewegung und elektrische Vorgänge	16
2. Grundlagen der Gleichstromlehre	
2.1. Stromkreis	19
2.2. Die elektrischen Größen und ihre Einheiten	20
2.2.1. Stromstärke	20
2.2.2. Spannung	21
2.2.3. Widerstand	22
2.2.4. Das Ohmsche Gesetz	24
2.3. Der elektrische Widerstand	27
2.3.1. Widerstand und Temperatur	28
2.3.2. Spezifischer Widerstand und Leitfähigkeit	31
2.3.3. Berechnen des Leiterwiderstands	33
2.3.4. Widerstände als Bauelemente	37
2.3.5. Isolationswiderstand	39
2.3.6. Schaltung von Widerständen	40
2.4. Die elektrische Spannung	52
2.4.1. Klemmenspannung und Spannungsabfall	52
2.4.2. Spannungsteilerschaltung	56
2.4.3. Schaltung von Spannungserzeugern	58
2.5. Elektrische Arbeit und Leistung	71
3. Wirkungen des Stroms	
3.1. Wärmewirkung des elektrischen Stroms	77
3.1.1. Anwendung der Stromwärme	77
3.1.2. Stromwärmeverluste	80
3.2. Die chemischen Wirkungen des Stroms	81
3.2.1. Elektrolyse	81
3.2.2. Spannungserzeugung durch chemische Wirkungen	88
3.2.3. Primärelemente	89
3.2.4. Sekundärelemente	95
4. Das elektrische Feld	
4.1. Die elektrische Ladung	104
4.2. Das elektrische Potential	104
4.3. Das elektrische Feld	106
4.4. Die elektrische Feldstärke	108
4.5. Die elektrische Influenz	111
4.6. Die elektrische Schirmwirkung	113

	Seite
4.7. Kondensator	115
4.7.1. Aufbau und Wirkungsweise	115
4.7.2. Kapazität und Dielektrikum	118
4.7.3. Kondensatorverluste	122
4.7.4. Ausführungsformen und Daten der Kondensatoren	123
4.7.5. Kondensatorschaltungen	123
4.7.6. Kondensatoren im Gleich- und Wechselstromkreis	126
4.7.7. Die Zeitkonstante	128
5. Spannungserzeuger	
5.1. Spannungserzeugung im Magnetfeld	130
5.2. Spannungserzeugung durch chemische Einflüsse	131
5.3. Spannungserzeugung durch Wärme	131
5.4. Spannungserzeugung durch Druck	132
5.5. Spannungserzeugung durch Licht	133
5.6. Spannungserzeugung durch Reibung	134

1. Einführung in die Elektrizitätslehre

1.1. Der Begriff „Elektrizität“

Das Wort **Elektrizität** ist abgeleitet worden von dem griechischen Wort **Elektron**. Elektron wiederum ist die Bezeichnung für den **Bernstein**. Dieser Bernstein zeigt eine besondere Eigenart: Reibt man ihn mit einem Wolltuch, dann zieht er in der Nähe befindliche kleine Körper an. An diese Eigenart des Bernsteins erinnerte sich um 1600 der Engländer Gilbert, als er auch bei anderen Stoffen die gleiche Erscheinung beobachtete. Er gab der von geriebenen Körpern ausgehenden Kraft den Namen „Bernsteinkraft“. Daraus wurde in Anlehnung an das griechische Wort für Bernstein der Name Elektrizität.

Die Lehre von der Elektrizität gehört wie die Lehre vom Magnetismus, die Wärmelehre, die Optik (Lehre vom Licht), die Akustik (Lehre vom Schall) und die Mechanik (Lehre von Bewegungen und Kräften) zur **Physik**. Während die Physik Vorgänge behandelt, bei denen sich die Zusammensetzung der Stoffe nicht verändert, befaßt sich die **Chemie** mit der Zusammensetzung und den Umwandlungen der Stoffe.

Die durch Reiben bestimmter Stoffe entstehende Elektrizität wird als **Reibungselektrizität** bezeichnet. Ein Versuch mit geriebenen Hartgummi- und Glasstäben zeigt, daß die Stäbe durch das Reiben eine elektrische Veränderung erfahren haben, denn es werden z. B. leichte Papierschnitzel angezogen. Wir erkennen aber auch bei diesem Versuch, daß es zwei Arten von Elektrizität gibt. Ein frei beweglich aufgehängter geriebener Hartgummistab wird von einem zweiten geriebenen Hartgummistab abgestoßen, während er von einem geriebenen Glasstab angezogen wird (vgl. hierzu Abb. 1.1). Auch ein frei beweglich aufgehängter Glasstab wird von einem zweiten geriebenen Glasstab abgestoßen und von einem geriebenen Hartgummistab angezogen. Die Elektrizität der Hartgummi-

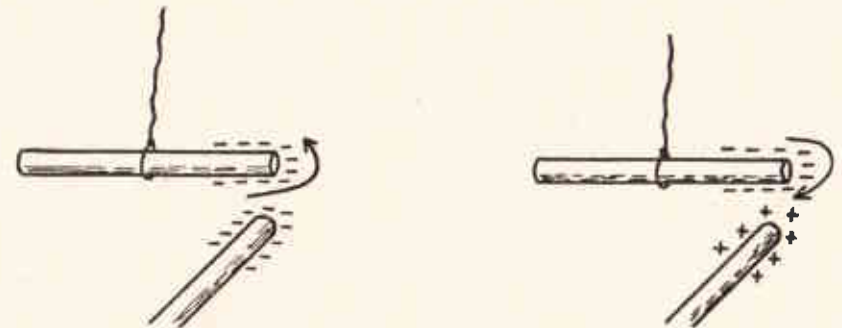


Abb. 1.1 – Reibungselektrizität

stäbe und der Glasstäbe ist somit verschiedenartig. Willkürlich bezeichnet man die auf dem Glasstab erzeugte Elektrizität als **positiv (+)** und die auf dem Hartgummistab erzeugte Elektrizität als **negativ (-)**.

Bezeichnet man die auf einem Körper nach außen wirksame Elektrizität als elektrische Ladung, so ergibt sich:

1. Die durch das Reiben auf den Hartgummistäben hervorgerufenen elektrischen Ladungen stoßen sich gegenseitig ab.
2. Die durch das Reiben auf den Glasstäben hervorgerufenen elektrischen Ladungen stoßen sich gegenseitig ab.
3. Die elektrischen Ladungen des Hartgummistabs und des Glasstabs ziehen sich gegenseitig an.

Fassen wir die Ergebnisse des Versuchs mit den geriebenen Hartgummi- und Glasstäben zusammen, so erhalten wir das Grundgesetz:

Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, ungleichnamige Ladungen ziehen sich an.

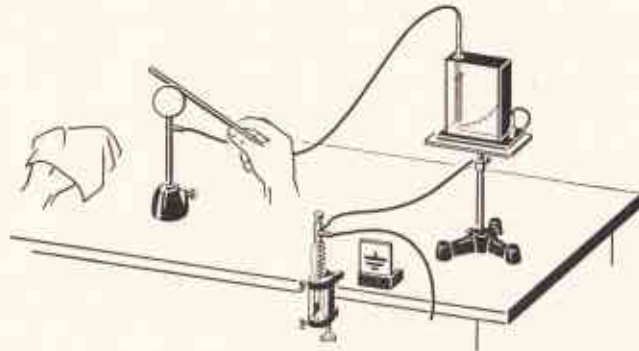


Abb. 1.2 – Elektrometer

Elektrische Ladungen kann man mit einem Elektroskop (Ladungsanzeiger) oder einem Elektrometer (Ladungsmesser) nachweisen. In der Abb. 1.2 ist ein Elektrometer dargestellt.

Bei diesem Gerät ist ein Metallstab gut isoliert in ein Metallgehäuse eingeführt. An dem Metallstab befindet sich eine leichte, bewegliche Metallnadel. Wird nun der Metallstab elektrisch aufgeladen (z. B. durch Berühren mit einem geriebenen Hartgummistab), so verteilt sich diese Ladung wegen der gegenseitigen Abstoßungskraft ihrer Ladungsteilchen über den ganzen Metallstab und die bewegliche Nadel. Dadurch wird die Nadel vom Stab abgestoßen. Der Ausschlag bleibt so lange bestehen, bis die Ladung von dem Metallstab wieder abgenommen wird (z. B. durch Berühren des Metallstabs mit der Hand).

1.2. Bedeutung der Elektrizität

Neben der schon seit langem bekannten Reibungselektrizität kennt man heute eine Reihe anderer Möglichkeiten, Elektrizität zu erzeugen, so vor allem mit Hilfe des Magnetismus in den Dynamos und durch chemische Vorgänge in den galvanischen Elementen. Darüber hinaus kann man durch Wärme in den Thermoelementen, durch Licht in den Fotozellen und durch Druck in Quarzkristallen Elektrizität erzeugen (vgl. hierzu Abschn. 5). Die Elektrizität selbst ist an sich unsichtbar. Man kann sie jedoch an ihren Wirkungen erkennen (z. B. magnetische Wirkung, Wärmewirkung, Lichtwirkung, chemische Wirkung). Vgl. hierzu Abschn. 3 und im Teil 2 Abschn. 6.

Entsprechend den verschiedenen Wirkungen der Elektrizität gibt es heute eine Vielzahl von Anwendungsgebieten für diese Naturerscheinung. So wird sie unter anderem verwendet zur Beleuchtung, zur Heizung, zum Antreiben von Maschinen und zum Übertragen von Nachrichten selbst über größte Entfernungen hinweg.

1.3. Elektronen als Grundlage der Elektrizität

1.3.1. Aufbau und elektrisches Verhalten der Stoffe

Das Verstehen elektrischer Vorgänge erfordert die Kenntnis einiger Grundbegriffe vom Aufbau der Stoffe. Man kennt heute mehrere 100 000 verschiedene Stoffe (**chemische Verbindungen**), die auf der Erde vorkommen. In diesen Stoffen wurde eine bestimmte Anzahl von **Grundstoffen (chemische Elemente)** gefunden, die chemisch nicht weiter in andersartige Stoffe zerlegt werden können. Alle Gesteine, Bodenschätze, Erde, Wasser, Flüssigkeiten, Gase usw. bestehen also aus diesen Grundstoffen. Daneben ist es gelungen, weitere Grundstoffe künstlich herzustellen. Heute gibt es insgesamt 90 natürliche chemische Elemente und 16 künstliche (vgl. hierzu die Tabelle auf der Seite 11). Die künstlichen Elemente haben die höheren Ordnungszahlen und sind außerdem radioaktiv, d. h. sie strahlen.

Alle Stoffe bestehen aus unter sich gleichen Bausteinen, deren Größe allerdings weit unter der Sichtbarkeitsgrenze liegt. Man nennt solche kleinsten Teilchen **Moleküle**. Durch mechanische Einwirkungen können Stoffe nur bis zur Größe von Molekülen zerkleinert werden. Da alle Stoffe mit chemischen Mitteln in ihre Grundstoffe zerlegbar sind, muß das auch bei den Molekülen möglich sein. Die auf chemischem Wege erzeugten Teile eines Moleküls nennt man **Atome**. Wir merken uns:

**Ein Molekül ist das kleinste Teilchen einer chemischen Verbindung;
ein Atom ist das kleinste Teilchen eines chemischen Elements.**

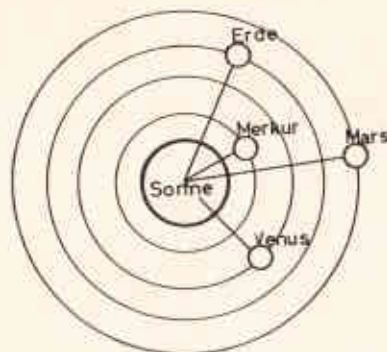


Abb. 1.3 – Sonnensystem

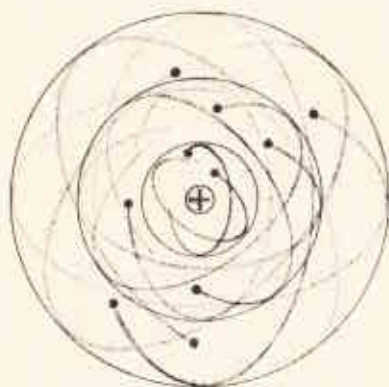


Abb. 1.4 – Atommodell

Das Wort Atom ist abgeleitet von dem griechischen Wort „atomos“; es heißt „unteilbar“. Noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde angenommen, daß die Atome die kleinsten unteilbaren Teilchen sind, aus denen alle Stoffe bestehen. Heute betrachtet man jedes Atom als eine kleine Welt für sich.

Ähnlich wie beim Sonnensystem Planeten auf bestimmten Bahnen um die Sonne kreisen (vgl. hierzu Abb. 1.3), bewegen sich beim Atom um einen **Atomkern** mit großer Geschwindigkeit kleinste Teilchen, die **Elektronen**. Die Elektronenbahnen stellt man sich als kreis- oder ellipsenförmige **Schalen** vor, die in Abständen hintereinander um den Kern liegen (vgl. hierzu Abb. 1.4). Die Schalen werden mit großen Buchstaben bezeichnet, beginnend bei K und endend mit Q.

Die Anzahl der Elektronen, die auf einer Schale maximal Platz haben, errechnet sich nach der Formel $\bar{n} = 2n^2$. Daraus ergeben sich für die erste Schale (K) 2 Elektronen, für die zweite (L) 8, die dritte (M) 18 usw.

Es ist bei den Atomen die Neigung beobachtet worden, daß sich die äußere Schale gern zu 8 Elektronen vervollständigen möchte, dem sogenannten **Elektronenoktett**.

Die Masse des Atoms ist praktisch im winzigen Kern vereinigt. Die viel kleineren Elektronen umfliegen den Kern in riesigen Abständen. Auch beim Sonnensystem sind ja die einzelnen Körper durch riesige Entfernungen getrennt. Entsprechend vergrößert würde einem Kerndurchmesser von 1 mm ein Gesamtdurchmesser des Atoms von 10 m entsprechen (Verhältnis 1:10000). In Wirklichkeit ist das Atom kleiner als $4 \cdot 10^{-8}$ cm. Da 99,9 % der Masse im Kern stecken, kann man sagen, daß das Atom fast nur aus leerem Raum besteht.

Chemische Elemente

Name	Symbol	Ordnungszahl	Atomgewicht	Name	Symbol	Ordnungszahl	Atomgewicht
Aluminium	Al	13	26,9815	Neon	Ne	10	20,183
Antimon	Sb	51	121,75	Nickel	Ni	28	58,71
Argon	Ar	18	39,948	Niob	Nb	41	92,906
Arsen	As	33	74,9216	Osmium	Os	76	190,2
Barium	Ba	56	137,34	Palladium	Pd	46	106,4
Beryllium	Be	4	9,0122	Phosphor	P	15	30,9738
Blei	Pb	82	207,19	Platin	Pt	78	195,09
Bor	B	5	10,811	Praseodym	Pr	59	140,907
Brom	Br	35	79,909	Quecksilber	Hg	80	200,59
Cadmium	Cd	48	112,40	Radium	Ra	88	226,05
Cäsium	Cs	55	132,905	Rhenium	Re	75	186,2
Calcium	Ca	20	40,08	Rhodium	Rh	45	102,905
Cer	Ce	58	140,12	Rubidium	Rb	37	85,47
Chlor	Cl	17	35,453	Ruthenium	Ru	44	101,07
Chrom	Cr	24	51,996	Samarium	Sm	62	150,35
Dysprosium	Dy	66	162,50	Sauerstoff	O	8	15,9994
Eisen	Fe	26	55,847	Scandium	Sc	21	44,956
Erbium	Er	68	167,26	Schwefel	S	16	32,064
Europium	Eu	63	151,96	Selen	Se	34	78,96
Fluor	F	9	18,9984	Silber	Ag	47	107,870
Gadolinium	Gd	64	157,25	Silicium	Si	14	28,086
Gallium	Ga	31	69,72	Stickstoff	N	7	14,0067
Germanium	Ge	32	72,59	Strontium	Sr	38	87,62
Gold	Au	79	196,967	Tantal	Ta	73	180,948
Hafnium	Hf	72	178,49	Technetium	Tc	43	98,91
Helium	He	2	4,0026	Tellur	Te	52	127,60
Holmium	Ho	67	164,930	Terbium	Tb	65	158,924
Indium	In	49	114,82	Thallium	Tl	81	204,37
Iridium	Ir	77	192,2	Thorium	Th	90	232,038
Jod	J	53	126,9044	Thulium	Tm	69	168,934
Kalium	K	19	39,102	Titan	Ti	22	47,90
Kobalt	Co	27	58,9332	Uran	U	92	238,03
Kohlenstoff	C	6	12,01115	Vanadin	V	23	50,942
Krypton	Kr	36	83,80	Wasserstoff	H	1	1,00797
Kupfer	Cu	29	63,54	Wismut	Bi	83	208,980
Lanthan	La	57	138,91	Wolfram	W	74	183,85
Lithium	Li	3	6,939	Xenon	Xe	54	131,30
Lutetium	Lu	71	174,97	Ytterbium	Yb	70	173,04
Magnesium	Mg	12	24,312	Yttrium	Y	39	88,905
Mangan	Mn	25	54,9381	Zink	Zn	30	65,37
Molybdän	Mo	42	95,94	Zinn	Sn	50	118,69
Natrium	Na	11	22,9898	Zirkonium	Zr	40	91,22
Neodym	Nd	60	144,24				

So, wie beim Sonnensystem die Planeten nicht von der Fliehkraft in das Weltall geschleudert, sondern von der Massenanziehungskraft der Sonne in ihrer Bahn gehalten werden, so werden auch die Elektronen durch bestimmte Kräfte in ihrer schalenförmig um den Kern liegenden Bahn gehalten. Zwischen dem Atomkern und den Elektronen besteht eine elektrische Anziehungskraft, denn der **Atomkern ist positiv** geladen, während die **Elektronen negativ** geladen sind (ungleichnamige Ladungen ziehen sich an). Diese Anziehungskraft hält der Fliehkraft das Gleichgewicht. Wenn der Atomkern die Elektronen anzieht, muß er für jedes um den Kern kreisende Elektron eine positive Ladungseinheit enthalten. Die Zahl dieser **positiven Kernladungen, der Protonen**, wird durch die Ordnungszahl des Elements angegeben, z. B.

- a) beim Wasserstoffatom (Ordnungszahl 1) kreist um ein positiv geladenes Proton ein negatives Elektron (vgl. hierzu Abb. 1.5);

- b) beim **Heliumatom** (Ordnungszahl 2) kreisen um zwei Protonen zwei Elektronen (vgl. hierzu Abb. 1.6);
- c) beim **Kohlenstoffatom** (Ordnungszahl 6) haben wir im Kern 6 Protonen und auf zwei diesen Kern umgebenden Schalen 6 Elektronen;
- d) beim **Kupferatom** (Ordnungszahl 29) finden wir im Kern 29 Protonen und auf mehreren diesen Kern umgebenden Bahnen 29 Elektronen.



Abb. 1.5 – Wasserstoffatom



Abb. 1.6 – Heliumatom



Abb. 1.7 – Atomkern

Sind mehrere Protonen im Atomkern in unmittelbarer Berührungsnähe, dann wird das Auseinanderstreben der gleichnamig geladenen Protonen durch **Neutronen** verhindert (vgl. hierzu Abb. 1.7). Die Neutronen werden daher auch als „Kernkitt“ bezeichnet; sie sind genau so schwer wie die Protonen, haben keine Ladung und sind somit elektrisch neutral.

Die Elektrizität ist also bereits in jedem Stoff vorhanden, als negative Ladungseinheit im Elektron und als positive Ladungseinheit im Proton.

Solange bei den Atomen die Zahl der negativ geladenen Elektronen der Zahl der positiv geladenen Protonen entspricht, heben sich die elektrischen Ladungen gegenseitig auf; das Atom erscheint nach außen elektrisch neutral. Zur Gewinnung elektrischer Energie (Elektrizität) kommt es nun darauf an, die elektrischen Ladungen voneinander zu trennen. Diese Ladungstrennung kann auf verschiedene Weise erfolgen (vgl. hierzu Abschn. 1.2). Dabei findet nach bestimmten Regeln ein Elektronenaustausch von Atom zu Atom statt. Ist nun bei einem Atom die Zahl der Protonen größer als die Zahl der Elektronen, dann erscheint das Atom elektrisch positiv geladen (Elektronenmangel). Umgekehrt hat das Atom eine negative Ladung, wenn die Anzahl der Elektronen größer ist als die Zahl der Protonen (Elektronenüberschuß).

Entfernt man von einem Körper viele freie Elektronen (z. B. werden beim Reiben des Glasstabs Elektronen entfernt, die in das Tuch übergehen), dann wird der ganze Körper infolge des Elektronenmangels elektrisch positiv, während der Körper, der die Elektronen aufgenommen hat, durch den Elektronenüberschuß elektrisch nega-

tiv wurde. So wie hier tritt stets bei der Erzeugung eines elektrischen Zustands nie eine Elektrizitätsart allein auf.

Der deutsche Chemiker Lothar Meyer und der Russe Dimitrij Mendelejew entdeckten gewisse Gesetzmäßigkeiten im Verhalten der Atome. Sie ordneten die Elemente zunächst nach dem Atomgewicht und gaben ihnen dementsprechend Ordnungszahlen. Das Atomgewicht gibt an, wievielfach ein Stoff schwerer ist als Wasserstoff. Darüber hinaus klassifizierten sie die Stoffe nach ihrer Neigung, sich mit Sauerstoff zu verbinden. So entstand das Periodische System der Elemente. Es ist geordnet nach Perioden und Gruppen.

Die Gruppen (I–VII) geben an, wieviel Sauerstoffatome durch die Atome der Gruppe maximal gebunden werden können, also z. B. kann Aluminium, Gruppe III, bis zu 3 Sauerstoffatome binden. Diese Fähigkeit heißt **Wertigkeit** oder **Valenz**. Die Fähigkeit zur chemischen Bindung ist mit dem Atomaufbau verknüpft.

		Gruppe (Valenzelektronen)																		
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	
Periode (Elektronenschalen)	1	H																		He
	2	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne											
	3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar											
	4	K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr											
	5	Rb	Sr	Zn	Sn	Sb	Te	I	Xe											
	6	Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn											
	7	Fr	Ra	Actiniden																
		Metalle												Nichtmetalle						

Abb. 1.8 – Ordnung der Hauptgruppenelemente

Die Perioden sind den Schalen gleichzusetzen. So ergibt sich ein Grundgerüst von 7 mal 8 gleich 56 Elementen. Darin lassen sich aber nicht alle bekannten Elemente unterbringen. Die Atome, die dem aufgezeigten Schema folgen, gehören zu den Hauptgruppenelementen. Der überwiegende Rest folgt noch weiteren Gesetzmäßigkeiten und wird unter Nebengruppenelementen zusammengefaßt. In der Ordnung der Hauptgruppenelemente trennt die Diagonale die **Metalle** von den **Nichtmetallen** (vgl. hierzu Abb. 1.8).

Metalle sind durch die elektrische Leitfähigkeit, das gute Wärmeleitvermögen, die Unlöslichkeit in anorganischen und organischen Lösungsmitteln, Löslichkeit in geschmolzenen Metallen und die Einatomigkeit im Dampfzustand gekennzeichnet. An der Diagonalen liegen die **Halbmetalle**, die teils metallischen Charakter haben, z. B. elektrische Leitfähigkeit, und sich andererseits wie Nichtmetalle verhalten, z. B. sind ihre Verbindungen säurebildend.

Das Hauptmerkmal der Nebengruppenelemente besteht im Aufbau einer neuen Schale, bevor die vorhergehende „fertig“ ist. In der äußeren Schale sind meistens nur 2 Elektronen vorhanden, woraus sich die starke Neigung zur chemischen Bindung und der metallische Charakter erklärt. Außerdem werden die beiden Elektronen leicht abgegeben und leiten als freie Elektronen den elektrischen Strom (vgl. hierzu Abschn. 1.3.3). Die Atome der Nebengruppenelemente sind daher ausschließlich Metalle.

Eine Sonderstellung nehmen die Elemente der Gruppe VIII, die Edelgase, ein. Sie haben abgeschlossene Schalen und sind daher chemisch besonders stabil, d. h., sie gehen mit anderen Stoffen keine chemischen Verbindungen ein. Die seltenen Erden (Atome der Ordnungszahlen 57 – 71) bilden ebenfalls besondere Gruppen.

Die meisten Stoffe bestehen nicht aus Atomen der gleichen Art, sondern stellen Verbindungen oder Mischungen verschiedener Elemente dar. Ver-

bindungen geschehen, wie auch der Bau der Atome, nicht willkürlich, sondern nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten.

Viele Stoffe haben einen regelmäßigen, **kristallinen** Aufbau. Das wird besonders augenfällig an den Bruchkanten von Metallen und Natursteinen. Den meisten sind die regelmäßigen geometrischen Formen von den Kristallen des Quarzes bekannt. Diese im großen sichtbaren Formen der gewachsenen Kristalle setzen sich bis in den mikromolekularen Bereich fort, d.h., auch die kleinste Einheit sieht so aus wie der ganze Kristall. Man unterscheidet bei Kristallen 7 Grundformen (vgl. hierzu Abb. 1.9).

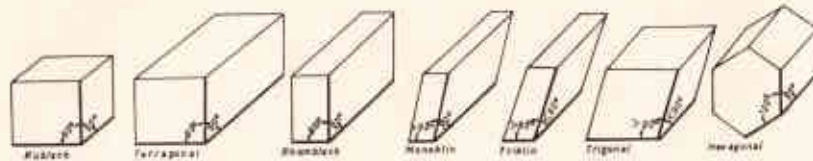


Abb. 1.9 – Grundformen der Kristalle

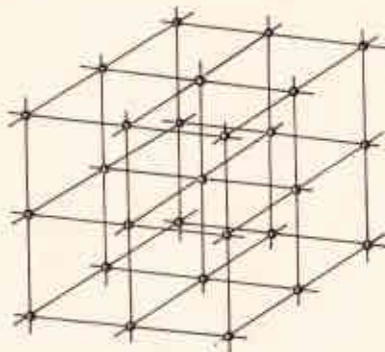


Abb. 1.10 – Kristallgitter

Die Atome sitzen in den Ecken regelmäßiger Vielecke. Ihre freien Valenzen stellen als Verbindungsarme die Kanten der Kristalle dar (vgl. hierzu Abb. 1.10).

Die Bindungskräfte der äußeren Schale lassen Atome nie einzeln auftreten, sondern immer im Verband als Molekül. Der Stoff bricht dann entlang der Korngrenzen des Moleküls. Man unterscheidet Atombindung, Ionenbindung und Metallbindung.

Eine Ausnahme unter den Molekülbindungen finden wir beim Kohlenstoff. Er tritt in drei verschiedenen Bindungsformen auf; als Kohlenstoffring in Gasen, z. B. beim Benzolring, als Netz im Graphit und als festes Kristallgitter im Diamanten.

In der Elektrotechnik wird seit Einführung der Halbleitertechnik der Kristallstruktur besondere Beachtung geschenkt. Halbleitende Stoffe wie die Halbmetalle Germanium und Silizium neigen aufgrund ihrer Kristallstruktur zur **festen Elektronenpaarbindung**. Die 4 Elektronen auf der Außenschale bilden mit denen der Nachbaratome ein Elektronenoktett, das sich bei tiefen Temperaturen nicht öffnet und der Stoff damit zum Nichtleiter wird. Die Elektronen können nicht aus ihrer Bindung an die Atome heraus. Die Form der Bindung heißt **Atombindung** oder **kovalente Bindung**. Die Elektronen kreisen dann paarweise auf den Bahnen verschiedener Atome.

Das Elektronenoktett kann auch noch auf andere Weise als bei der Atombindung zustande kommen. Treffen Stoffe mit mehr und weniger als 4 Valenzelektronen

zusammen, nimmt das höherwertige Atom dem niederwertigen seine Elektronen ab, so daß jedes Atom für sich zur nächsthöheren oder -niederen Schale oder zum Elektronenoktett vervollständigt wird. Fehlen aber einem Atom Elektronen, so überwiegt die positive Ladung des Kerns, es wird ein positives Ion. Nimmt ein Atom Elektronen auf, so wird es zum negativen Ion. Die elektrostatischen Ladungen ziehen sich gegenseitig an, es kommt zur **Ionenbindung**, die z. B. für Salze typisch ist.

Treffen Atome mit weniger als 4 Valenzelektronen zusammen, so verlassen die Valenzelektronen ihre Bindung an den Kern und schwirren als Elektronengas im Molekülgerüst umher. Dies ist bei den Metallen die Ursache für die freien Elektronen oder Leitungselektronen. Die Bindungsform heißt **Metallbindung** (vgl. hierzu Abschn. 1.3.3).

Die Bindungen der Atome im Molekül werden durch **Wärmezufuhr** gelockert oder ganz aufgehoben. Die Atome fester Stoffe geraten bei Erwärmung im Kristallgitter in Schwingungen. Bei weiterer Erhitzung wird das Gefüge zerstört, der Stoff wird flüssig und bei weiterer Wärmezufuhr gasförmig. Die Zustandsformen fest, flüssig und gasförmig heißen **Aggregatzustände**.

1.3.2. Leiter und Nichtleiter

Wir wollen untersuchen, welche Werkstoffe die Elektrizität weiterleiten. Zu diesem Zweck spannen wir zwischen die Kontaktklemmen der in Abb. 1.11 dargestellten Versuchsanordnung nacheinander verschiedene Stoffe. Bei jedem Stoff schalten wir die Lampe für eine kurze Zeit ein. Dabei sehen wir, daß die Lampe bei einigen Stoffen brennt, während sie bei anderen Stoffen dunkel bleibt.

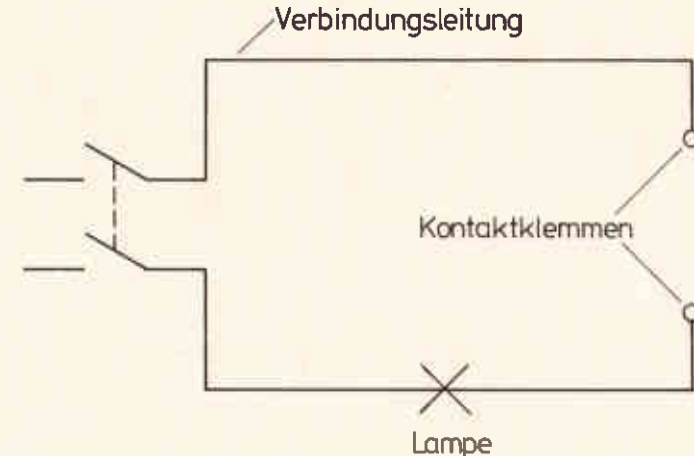


Abb. 1.11 – Leiter und Nichtleiter

Der Versuch zeigt, daß z. B. Kupfer, Eisen, Aluminium, Silber, Kohle und sogar Wasser die Elektrizität zur Glühlampe gelangen lassen, während andere Stoffe, wie z. B. Porzellan, Glas, Glimmer, Gummi, Papier,

Kunststoffe und Luft, die Elektrizität nicht weiterleiten. Man teilt daher die Stoffe im allgemeinen in **Leiter** und **Nichtleiter** ein. Stoffe mit besonderen Eigenschaften sind die **Halbleiter**. Sie liegen hinsichtlich ihrer elektrischen Leitfähigkeit zwischen guten und schlechten Leitern.

Da Elektrizität durch feuchte Haut besonders leicht ins Innere des menschlichen Körpers eindringt, sind Menschen durch Elektrizität gefährdet. Im Band 6 des „Handbuchs der Fernmeldetechnik – Grundreihe“ sind die zur Verhütung von elektrischen Unfällen erforderlichen Schutzmaßnahmen beschrieben.

1.3.3. Elektronenbewegung und elektrische Vorgänge

1.3.3.1. Der elektrische Strom

Der im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Versuch hat gezeigt, daß bestimmte Stoffe, sogenannte Leiter, die Elektrizität weiterleiten. In diesen Leitern befinden sich gleichmäßig verteilt **freie Elektronen**, die sich ungeordnet zwischen den Atomen hin- und herbewegen (vgl. hierzu Abb. 1.12).



○ Atom • Elektron

Abb. 1.12 – Ungeordnete Bewegung
der freien Elektronen
(kein Strom)



→ Bewegungsrichtung

Abb. 1.13 – Gerichtete Bewegung
der freien Elektronen
(Strom)

Sobald jedoch die Bewegung der freien Elektronen gerichtet wird, entsteht ein **elektrischer Strom** (vgl. hierzu Abb. 1.13).

Ein elektrischer Strom besteht also ebenso aus bewegten Elektronen, wie z. B. ein Luftstrom aus bewegten Luftteilchen besteht (ein Teilchen treibt das andere vor sich her).

Dabei bewegen sich die Elektronen nur sehr langsam vorwärts (in einer Sekunde nur wenige Millimeter). Trotzdem kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektrischen Stroms bis 300 000 km/s betragen (vgl. eine Reihe hintereinanderliegender Billardkugeln beim Anstoß).

Damit in einem Leiter die Bewegung der freien Elektronen gerichtet wird, also ein Strom fließt, müssen die freien Elektronen angestoßen werden. Dieser Anstoß erfolgt z. B. durch Berühren des Leiters mit einem elektrisch nicht neutralen Körper, einem geladenen Körper. Die freien Elektronen des Leiters bemühen sich dann sogleich, die Ladung gleichmäßig

zu verteilen. Es fließt ein Ausgleichsstrom von der elektrisch negativen Ladung (Elektronenüberschuß) zur elektrisch positiven Ladung (Elektronenmangel). Dabei strömen die Elektronen so lange, bis ein Ausgleich hergestellt und die Elektronendichte überall gleich ist.

Die Elektronen bewegen sich von $\ominus$ nach $\oplus$.

Unabhängig von der Bewegungsrichtung der Elektronen hat man für die Technik festgelegt, daß der Strom von $\oplus$ nach $\ominus$ fließt.

Die Festlegung dieser technischen Stromrichtung erfolgte, als man noch keine Kenntnis von den Elektronen und ihrer Bewegungsrichtung hatte.

Die technische Stromrichtung geht von $\oplus$ nach $\ominus$.

1.3.3.2. Die elektrische Spannung

Soll ständig ein Strom fließen, dann muß bei der negativen Ladung stets für Elektronennachschub gesorgt werden. Ein Strom fließt nur, wenn auf der einen Seite die Elektronen durch die Anhäufung (Elektronenüberschuß) unter einem gewissen Druck stehen, der durch die gegenseitige Abstoßung verursacht wird. Auf der anderen Seite muß stets eine Leere (Elektronenmangel) und damit ein Sog vorhanden sein. Es ist also ein Druckunterschied erforderlich. Dieser Druckunterschied ist die treibende Kraft, die die Elektronen fortbewegt. Er heißt **elektrische Spannung**.

Je größer der Druckunterschied, also je größer die Spannung, desto größer der Elektronentransport und somit der elektrische Strom. Ist kein Druckunterschied, also keine Spannung mehr vorhanden, so findet kein Elektronentransport statt, es fließt kein elektrischer Strom.

Je größer die elektrische Spannung, desto größer der elektrische Strom.

Einrichtungen, die dafür sorgen, daß stets ein Druckunterschied vorhanden ist, heißen **Spannungserzeuger** oder **Spannungsquellen**. Da der elektrische Strom eine Folge der elektrischen Spannung ist, spricht man sehr oft auch von **Stromquellen**. Spannungsquellen haben in der Regel zwei Anschlußpunkte (Pole, Klemmen). Am $-$ Pol ist der Elektronenüberschuß und am $+$ Pol der Elektronenmangel. Die verschiedenen Arten der Spannungserzeugung sind im Abschn. 5 beschrieben.

Ein Spannungserzeuger ist z. B. ein Dynamo. In ihm befindet sich eine Wicklung aus Kupferdraht. Solange die Maschine stillsteht, sind die Elektronen in der Wicklung gleichmäßig verteilt. Wird die Maschine gedreht, so werden die freien Elektronen in eine Richtung gedrängt (vgl. hierzu Abb. 1.14). Bei der Klemme K1 entsteht dadurch ein Elektronenmangel ($+$ Pol) und bei der Klemme K2 ein Elektronenüberschuß ($-$ Pol). Zwischen den Klemmen besteht eine Spannung. Werden die Klemmen durch einen Leiter miteinander verbunden, dann fließt ein elektrischer Strom.

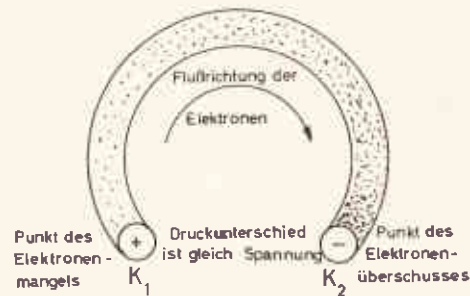


Abb. 1.14 – Elektronenmangel und -überschuß

Bleiben bei der Spannungsquelle der positive und der negative Pol immer an der gleichen Stelle, dann strömen die Elektronen immer in die gleiche Richtung. Diesen Strom nennt man daher **Gleichstrom**.

Wechseln die Punkte des Elektronenüberschusses und -mangels dauernd, dann wechselt im gleichen Rhythmus die Richtung des Elektronenstroms. Diesen Strom nennt man daher **Wechselstrom**.

1.3.3.3. Der elektrische Widerstand

Die Größe des Stroms hängt einmal von der Größe der Spannung und zum anderen vom Stoff ab, in dem der Strom fließen soll.

Die Fähigkeit eines Leiters, einen elektrischen Strom weiterzuleiten, hängt vor allem von der Zahl seiner freien Elektronen ab. Je mehr freie Elektronen im Stoff vorhanden sind, um so mehr können an der Elektronenbewegung teilnehmen, um so mehr Strom kann fließen. Von Bedeutung ist aber auch die Beweglichkeit der freien Elektronen. Je dichter im Stoff die Moleküle zusammenstehen, um so häufiger stoßen die freien Elektronen mit ihnen zusammen. Dadurch wird die Fortbewegung der Elektronen und damit das Fließen des Stroms behindert. Ein Teil der Bewegungsenergie der Elektronen wird in Wärmeenergie umgewandelt. Diese „Stromwärme“ tritt in jedem Leiter auf. Die so entstehenden Stromwärmeverluste entsprechen den Reibungsverlusten in der Mechanik.

Man sagt, die Stoffe haben einen mehr oder weniger großen elektrischen Widerstand. Dieser Widerstand hängt von der Atomdichte des Stoffs und der Zahl seiner freien Elektronen ab.

Je größer der elektrische Widerstand, desto kleiner der elektrische Strom.

2. Grundlagen der Gleichstromlehre

2.1. Stromkreis

In der Abb. 2.1 ist ein elektrischer Stromkreis bildlich und daneben mit Hilfe genormter Schaltzeichen dargestellt. In diesem Stromkreis befindet sich als Spannungserzeuger eine Batterie. Die von der Batterie erzeugte Spannung treibt die Elektronen durch die Leitung und durch die Lampe. Dabei wird die Spannung vor allem von der Lampe wieder verbraucht. Die Lampe ist also ein Spannungsverbraucher wie alle Geräte, die durch den elektrischen Strom betrieben werden (z. B. Motoren, Heiz- und Kochgeräte, Rundfunk- und Fernsehempfänger).

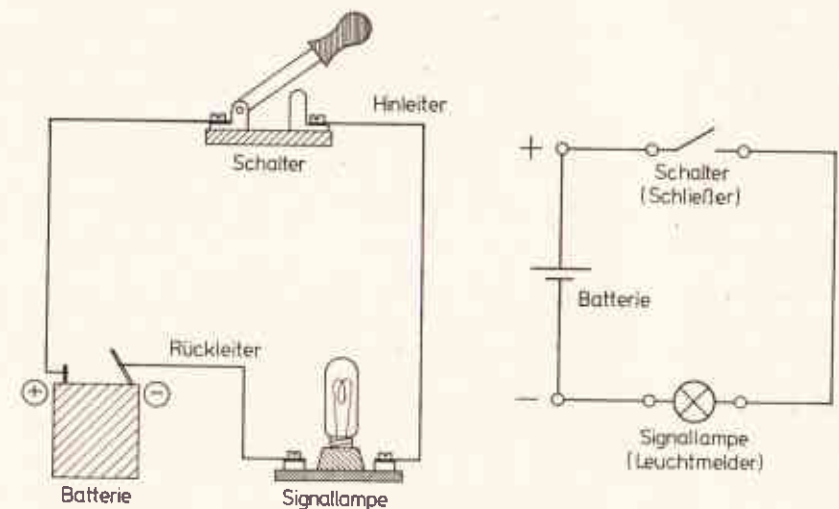


Abb. 2.1 – Stromkreis

In den elektrischen Stromkreisen befinden sich Spannungserzeuger, Leitungen und Spannungsverbraucher.

Im dargestellten Stromkreis kann der elektrische Strom erst fließen (kreisen vom Spannungserzeuger über Leitung und Spannungsverbraucher zum Spannungserzeuger zurück), wenn der Schalter geschlossen wird; man sagt, wenn der Stromkreis geschlossen ist.

Nur in einem geschlossenen Stromkreis verursacht eine Spannung einen ständig fließenden Strom.

2.2. Die elektrischen Größen und ihre Einheiten

Wir wissen, daß ein Strom nur fließen kann, wenn eine Spannung vorhanden ist. Andererseits wird der Strom durch einen Widerstand mehr oder weniger begrenzt, wobei sowohl die Leitung (Leitungswiderstand) als auch der Spannungsverbraucher (Verbraucherwiderstand) eine Rolle spielen. Die Stärke des Stroms, die Stromstärke, hängt also von der Spannung und vom Widerstand ab.

In jedem Stromkreis finden wir die elektrischen Größen **Stromstärke, Spannung, Widerstand**. Um die Verhältnisse in den Stromkreisen berechnen zu können, hat man für diese Größen Einheiten (Maßeinheiten) geschaffen.

In Maßsystemen (Einheitensystemen) werden die Einheiten physikalischer Größen, auf die sich alle anderen Einheiten (abgeleitete Einheiten) zurückführen lassen, zusammengefaßt. In der Technik wird vor allem das **MKSA-System** (Meter/Kilogramm/Sekunde/Ampere) angewandt. Da dieses Einheitensystem international vereinbart worden ist, wird es auch „SI-Einheitensystem“ genannt.

2.2.1. Stromstärke

Die elektrische Ladung (Elektrizitätsmenge) eines Elektrons ist sehr klein. Man hat daher die Ladung von $6,24 \cdot 10^{18}$ freien Elektronen als **Einheit der Elektrizitätsmenge** festgelegt.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Elektrizitätsmenge	Q	C (Coulomb) ¹⁾

Die sich bewegende elektrische Ladung, der elektrische Strom, hat je nach der Zahl der an der Stromleitung beteiligten Elektronen eine bestimmte Stärke. Diese Stromstärke erkennt man an der Größe der Wirkung des elektrischen Stroms. So wird z. B. durch den elektrischen Strom ein Magnetfeld erzeugt; die Wirkung dieses Magnetfeldes (die magnetische Anziehungskraft) wächst mit der Stromstärke (vgl. hierzu Abschn. 6, Teil 2).

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Stromstärke	I	A (Ampere) ²⁾

Die **Einheit der Stromstärke** wird aus der magnetischen Anziehungskraft zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern bestimmt. Die Erklärung für die Stromstärke von 1 Ampere ist international wie folgt festgelegt worden:

Zwei unendlich lange, parallele, gerade Leiter von vernachlässigbar kleinem Querschnitt sind im Vakuum im Abstand von 1 m voneinander angeordnet; sie werden von einem Gleichstrom durchflossen. Dieser hat die Stromstärke 1 Ampere, wenn die elektrodynamisch verursachte Kraft zwischen beiden Leitern $2 \cdot 10^{-7}$ Newton für jeden Abschnitt der Anordnung beträgt, der aus einander gegenüberstehenden Leiterteilen von 1 m Länge besteht.

¹⁾ Coulomb = französischer Physiker (1736–1806)

²⁾ Ampère = französischer Physiker (1775–1836)

$2 \cdot 10^{-7} \text{ N} = 0,0000002 \text{ N}$; entsprechend etwa $0,00002 \text{ p} = 20$ Mikropond.

1 Newton (N)¹⁾ ist die Einheit der Kraft im MKSA-System (vgl. hierzu Band 2 des „Handbuchs der Fernmeldetechnik – Grundreihe“). $1 \text{ N} = 0,102 \text{ kp}$.

Ursprünglich dienten die bei der chemischen Wirkung des elektrischen Stroms beobachteten Vorgänge zum Festlegen der Einheit der Stromstärke (vgl. hierzu Abschn. 3.2).

Die Stromstärke I ist die Elektrizitätsmenge Q , die in der Zeiteinheit (1 Sekunde) durch den Leiter fließt. Damit ergibt sich, wenn man die Elektrizitätsmenge Q durch die Zeit t teilt:

$$I = \frac{Q}{t} \quad \text{A}$$

Nach Umstellen der Formel ist $Q = I \cdot t$ (C). Setzt man für I und t die Einheiten Ampere und Sekunde ein, so ergibt sich für die Elektrizitätsmenge eine weitere Einheit, die **Amperesekunde** ($\text{A} \cdot \text{s} = \text{As}$).

$1 \text{ C} = 1 \text{ As}$; $3600 \text{ C} = 3600 \text{ As} = 1 \text{ Ah}$.

Beispiel:

Welche durchschnittliche Stromstärke wird einer Batterie entnommen, wenn diese eine Elektrizitätsmenge von 38 Ah hat und nach 10 Stunden entladen ist?

Gegeben: $Q = 38 \text{ Ah}$; $t = 10 \text{ h}$

Gesucht: I

$$\text{Lösung: } I = \frac{Q}{t} = \frac{38 \text{ Ah}}{10 \text{ h}} = \underline{\underline{3,8 \text{ A}}}$$

Die durchschnittliche Stromstärke beträgt 3,8 A.

Die Einheit 1 Ampere ist für die Starkstromtechnik u. U. zu klein und für die Fernmeldetechnik oft zu groß. In diesen Fällen werden Vielfache oder Teile der Einheit 1 A benutzt, z. B. 1 Kiloampere (kA) = 1000 Ampere (A), 1 Milliampere (mA) = $\frac{1}{1000}$ Ampere (A).

Eine Zusammenstellung der Bezeichnungen, der Kurzzeichen und der Umrechnungsfaktoren für Vielfache oder Teile von Einheiten enthält der Band 2 des „Handbuchs der Fernmeldetechnik – Grundreihe“.

2.2.2. Spannung

Als **Einheit der Spannung** gilt der Quotient aus Energie und Elektrizitätsmenge: „Ein Volt besteht zwischen zwei Punkten eines elektrischen Feldes, wenn die Arbeit 1 Joule an einer Ladung von 1 Coulomb verrichtet werden muß.“

Die elektrische Spannung von 1 Volt ist dann vorhanden, wenn der Quotient aus der verrichteten Arbeit und der dabei bewegten Elektrizitätsmenge Eins beträgt.

¹⁾ Newton (sprich: njuton) = englischer Physiker (1643–1727)

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Spannung	U	V (Volt) ¹⁾

1 Joule (sprich: dschul) ist die Einheit der Energie (vgl. hierzu Abschn. 2.5).

$$1 \text{ V} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}} = \frac{1 \text{ Ws}}{1 \text{ As}} = \frac{1 \text{ VAs}}{1 \text{ As}}$$

Folgende Größenordnungen der Spannung sind gebräuchlich:

1 Megavolt	(MV)	= 1 000 000 Volt (V),
1 Kilovolt	(kV)	= 1 000 Volt (V),
1 Millivolt	(mV)	= $\frac{1}{1000}$ Volt (V) und
1 Mikrovolt	(μV) ²⁾	= $\frac{1}{1\,000\,000}$ Volt (V).

Beispiel:

Von einem elektrischen Gerät (Motor, Heizgerät oder dgl.) wird eine elektrische oder mechanische Arbeit von $W = 100$ Joule verrichtet. Für die Verrichtung dieser Arbeit muß eine Elektrizitätsmenge von $Q = 20$ As durch das Gerät (Antriebswicklung des Motors, Heizwiderstand des Heizgeräts) bewegt werden. Wie groß muß hierfür die erforderliche Durchschnittsspannung sein?

Gegeben: $W = 100 \text{ J}$; $Q = 20 \text{ As}$

Gesucht: U

$$\text{Lösung: } U = \frac{W}{Q} = \frac{100 \text{ J}}{20 \text{ C}} = \frac{100 \text{ Ws}}{20 \text{ As}} = \frac{100 \text{ V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}}{20 \text{ A} \cdot \text{s}} = \underline{\underline{5 \text{ V}}}$$

Die elektrische Durchschnittsspannung muß für die Verrichtung der Arbeit $U = 5 \text{ V}$ betragen.

Beachten Sie:	1 Joule	= 1 Wattsekunde	= 1 Newtonmeter
	1 J	= 1 Ws	= 1 Nm
	1 Coulomb	= 1 Amperesekunde	
	1 C	= 1 As	

2.2.3. Widerstand

Der Widerstand, den der Strom auf seinem Wege zu überwinden hat, kann verschieden groß sein. Um das Verhalten der Leiter (geringer Widerstand) und Isolierstoffe (großer Widerstand) miteinander vergleichen zu können, wurde für den elektrischen Widerstand eine Einheit festgelegt. Als Einheit des Widerstands gilt der Quotient aus Spannung und Strom:

Der elektrische Widerstand von 1 Ohm ist dann vorhanden, wenn der Quotient aus Spannung und Strom Eins beträgt.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Widerstand	R	Ω (Ohm) ³⁾

¹⁾ Volt = italienischer Physiker (1745-1827)

²⁾ μ = griechischer Buchstabe Mü

³⁾ Ohm = deutscher Physiker (1789-1854); Ω = griechischer Buchstabe Omega

Ursprünglich hatte man die Einheit des Widerstands dargestellt durch den Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 mm² Querschnitt und 1063 mm Länge bei 0 °C.

Folgende Größenordnungen des elektrischen Widerstands sind gebräuchlich:

1 Kiloohm (k Ω)	= 1 000 Ohm (Ω) und
1 Megohm (M Ω)	= 1 000 000 Ohm (Ω).

Beispiel:

An einen Widerstand von unbekannter Größe wird eine elektrische Spannung von $U = 5 \text{ V}$ geschaltet. Der hierbei gemessene Stromwert beträgt $I = 100 \text{ mA}$. Wie groß ist der Widerstandswert?

Gegeben: $U = 5 \text{ V}$, $I = 100 \text{ mA}$

Gesucht: R

$$\text{Lösung: } R = \frac{U}{I} = \frac{5 \text{ V}}{0,1 \text{ A}} = \underline{\underline{50 \Omega}}$$

Der Widerstandswert beträgt $R = 50 \Omega$.

Eine andere Möglichkeit zur Kennzeichnung des elektrischen Verhaltens der Leiter und Nichtleiter besteht darin, die Fähigkeit, den Strom weiterzuleiten, anzugeben. Diese Eigenschaft eines Stoffs wird als **Leitwert** bezeichnet.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Leitwert	G	S (Siemens) ¹⁾

Ein großer Widerstand leitet den Strom schlecht (d. h. kleiner Leitwert); ein kleiner Widerstand leitet den Strom gut (d. h. großer Leitwert). Der Leitwert ist somit der umgekehrte Wert des Widerstands:

$$G = \frac{1}{R} \text{ bzw. } R = \frac{1}{G}$$

1. Beispiel:

Der Widerstand eines Leiters beträgt 10 Ohm. Wie groß ist sein Leitwert?

Gegeben: $R = 10 \Omega$

Gesucht: G

$$\text{Lösung: } G = \frac{1}{R} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ S} = \underline{\underline{100 \text{ mS}}}$$

Der Leitwert beträgt 100 mS.

¹⁾ Siemens = deutscher Ingenieur (1816-1892)

2. Beispiel:

Ein Leiter hat einen Leitwert von $0,3 \text{ mS}$. Wie groß ist sein Widerstand?

Gegeben: $G = 0,3 \text{ mS} = 0,0003 \text{ S}$

Gesucht: R

$$\text{Lösung: } R = \frac{1}{G} = \frac{1}{0,0003} = \underline{\underline{3333 \Omega}}$$

Der Widerstand beträgt 3333Ω .

2.2.4. Das Ohmsche Gesetz

Untersucht man die Verhältnisse in einem Stromkreis, so erkennt man, daß zwischen den drei Größen Stromstärke, Spannung und Widerstand eine Abhängigkeit besteht.

Mit Hilfe eines in der Abb. 2.2 dargestellten Versuchs soll der Zusammenhang zwischen diesen drei Größen festgestellt werden. Zu diesem Zweck wird die Krokodilklemme am Draht entlang geführt und an verschiedenen Stellen der Quotient aus Spannung und Stromstärke ermittelt. Die Quotienten sind die Widerstandswerte des Drahts.

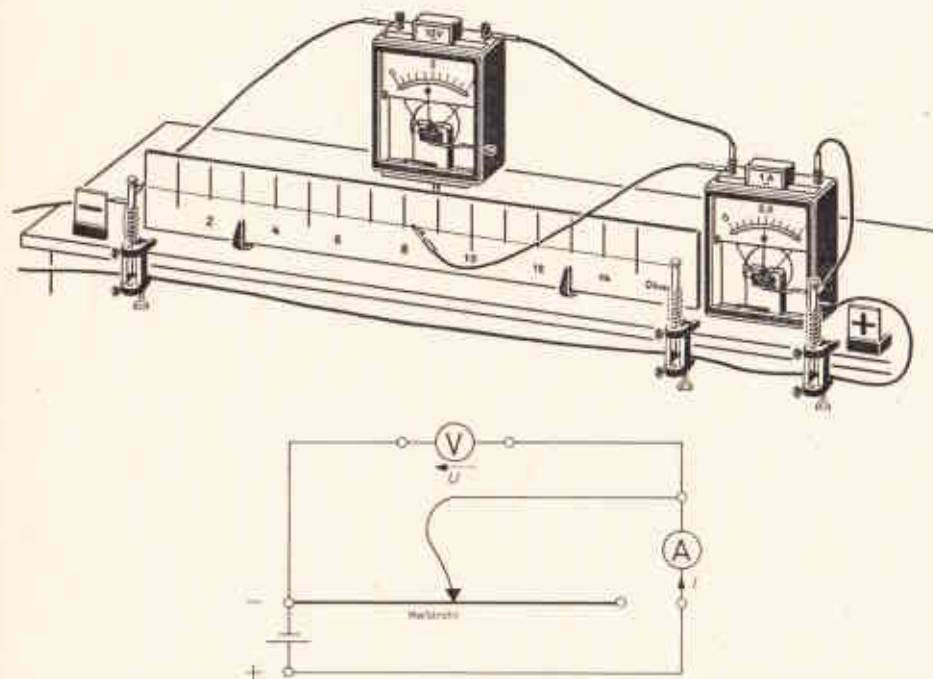


Abb. 2.2 – Ohmsches Gesetz (Versuchsanordnung)

Beispiel:

Aus den in der Abb. 2.2 ablesbaren Werten für Spannung und Stromstärke ergibt sich ein Quotient von $4,1 : 0,5 = 8,2$.

Vergleichen wir nun bei gleichbleibender und bei sich ändernder Spannung für verschiedene Stellungen der Krokodilklemme die Werte für Stromstärke, Spannung und Widerstand miteinander, so erkennen wir folgende Zusammenhänge:

- a) Bei konstanter Spannung wird der Strom um so kleiner, je größer der Widerstand ist. Das Produkt aus Stromstärke und Widerstand ist konstant und entspricht der Größe der Spannung.

Bei gleichbleibender Spannung ändern sich Stromstärke und Widerstand im umgekehrten Verhältnis.

- b) Bei konstantem Widerstand ist der Quotient aus Spannung und Stromstärke konstant.

Bei gleichbleibendem Widerstand ändern sich Spannung und Stromstärke im gleichen Verhältnis.

- c) Ändert man die Größe der Spannung sowie die Größe des Widerstands, dann ergibt der Quotient aus Spannung und Widerstand die Stromstärke.

Die Stromstärke bleibt konstant, wenn sich Spannung und Widerstand im gleichen Verhältnis ändern.

Werden diese Ergebnisse des Versuchs in eine rechnerisch verwendbare Form gesetzt, so erhält man die Formel für das von Georg Simon Ohm festgestellte wichtige **Ohmsche Gesetz**:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Widerstand}} \quad I = \frac{U}{R} \quad \text{A}$$

Durch Umstellen dieser Formel erhält man Gleichungen für die Berechnung der Spannung oder des Widerstands. Die 3 Gleichungen des Ohmschen Gesetzes lauten:

$$\boxed{I = \frac{U}{R}} \quad \text{A} \quad \boxed{U = I \cdot R} \quad \text{V} \quad \boxed{R = \frac{U}{I}} \quad \Omega$$

Wir erkennen, daß stets eine der 3 Größen berechnet werden kann, wenn die anderen beiden Größen bekannt sind. Dabei sind die Werte stets in

den Einheiten Volt, Ohm und Ampere einzusetzen. Man kann das Ohmsche Gesetz auch sehr einfach mit Hilfe des „Ohmschen Dreiecks“ umformen:



Deckt man die gesuchte Größe zu, so ergibt sich das Lösungsschema für die Berechnung dieser Größe.

Das Ohmsche Gesetz gilt für den ganzen Stromkreis und auch für einzelne Teile eines Stromkreises. Dabei ist darauf zu achten, daß die einzelnen Werte für Stromstärke, Spannung und Widerstand jeweils zu dem gleichen Abschnitt eines Stromkreises gehören.

Wir wollen nun mit einigen Beispielen das Rechnen mit dem Ohmschen Gesetz üben:

Berechnen der Stromstärke

1. Beispiel:

Ein Widerstand von $6\ \Omega$ liegt an einer Spannung von 12 V . Wie groß ist die Stromstärke im Widerstand?

Gegeben: $U = 12\text{ V}$; $R = 6\ \Omega$

Gesucht: I

$$\text{Lösung: } I = \frac{U}{R} = \frac{12}{6} = \underline{\underline{2\text{ A}}}$$

Die Stromstärke im Widerstand beträgt 2 A .

2. Beispiel:

An einer Spannungsquelle von 24 V liegt ein Widerstand von $3,2\text{ k}\Omega$. Wieviel mA fließen in diesem Stromkreis?

Gegeben: $U = 24\text{ V}$; $R = 3200\ \Omega$

Gesucht: $I\text{ (mA)}$

$$\text{Lösung: } I = \frac{U}{R} = \frac{24}{3200} = 0,0075\text{ A} = \underline{\underline{7,5\text{ mA}}}$$

Es fließen $7,5\text{ mA}$.

Berechnen der Spannung

1. Beispiel:

Durch einen Widerstand von $6\ \Omega$ fließt ein Strom von 2 A . Wie groß ist die Spannung?

Gegeben: $R = 6\ \Omega$; $I = 2\text{ A}$

Gesucht: U

$$\text{Lösung: } U = I \cdot R = 2 \cdot 6 = \underline{\underline{12\text{ V}}}$$

Die Spannung beträgt 12 V .

2. Beispiel:

In einem Stromkreis, dessen Widerstand $200\ \Omega$ beträgt, fließt ein Strom von 30 mA . Wie groß ist die Spannung?

Gegeben: $R = 200\ \Omega$; $I = 0,03\text{ A}$

Gesucht: U

$$\text{Lösung: } U = I \cdot R = 0,03 \cdot 200 = \underline{\underline{6\text{ V}}}$$

Die Spannung beträgt 6 V .

Berechnen des Widerstands

1. Beispiel:

In einem Stromkreis fließt bei einer Spannung von 220 V ein Strom von 4 A . Wie groß ist der Widerstand?

Gegeben: $U = 220\text{ V}$; $I = 4\text{ A}$

Gesucht: R

$$\text{Lösung: } R = \frac{U}{I} = \frac{220}{4} = \underline{\underline{55\ \Omega}}$$

Die Größe des Widerstands beträgt $55\ \Omega$.

2. Beispiel:

In einem geschlossenen Stromkreis begrenzt ein Widerstand bei einer Spannung von 24 V den Strom auf 8 mA . Wie groß ist der Widerstand in $\text{k}\Omega$?

Gegeben: $U = 24\text{ V}$; $I = 0,008\text{ A}$

Gesucht: $R\text{ (k}\Omega\text{)}$

$$\text{Lösung: } R = \frac{U}{I} = \frac{24}{0,008} = 3000\ \Omega = \underline{\underline{3\text{ k}\Omega}}$$

Die Größe des Widerstands beträgt $3\text{ k}\Omega$.

2.3. Der elektrische Widerstand

Der Begriff „Widerstand“ hat in der Elektrotechnik eine doppelte Bedeutung. Einmal bezeichnen wir damit die Größe in einem Stromkreis, die nach dem Ohmschen Gesetz die Stromstärke begrenzt. Jedes elektrische Bauelement (Leitung, Lampe, Heizofen, Klingel, Fernsprechapparat usw.) hat einen elektrischen Widerstand (Leitungswiderstand, Verbrau-

cherwiderstand usw.). Andererseits nennen wir bestimmte Bauelemente, die in Stromkreisen verwendet werden, Widerstände (Schichtwiderstände, Drahtwiderstände usw.); vgl. hierzu Abschn. 2.3.4.

2.3.1. Widerstand und Temperatur

Der elektrische Widerstand eines Stoffs ist keine konstante, sondern eine temperaturabhängige Größe. Die eine Widerstandsänderung bewirkende Temperaturänderung kann durch äußere Wärmequellen und auch durch die vom elektrischen Strom selbst erzeugte Wärme verursacht werden.

Mit Hilfe eines in der Abb. 2.3 dargestellten Versuchs soll das Verhalten des Widerstands verschiedener Werkstoffe bei Änderung der Temperatur untersucht werden. Dabei werden nacheinander ein Eisendraht, ein Kupferdraht, ein Konstantandraht und ein Kohlestab in den Stromkreis geschaltet und erhitzt.

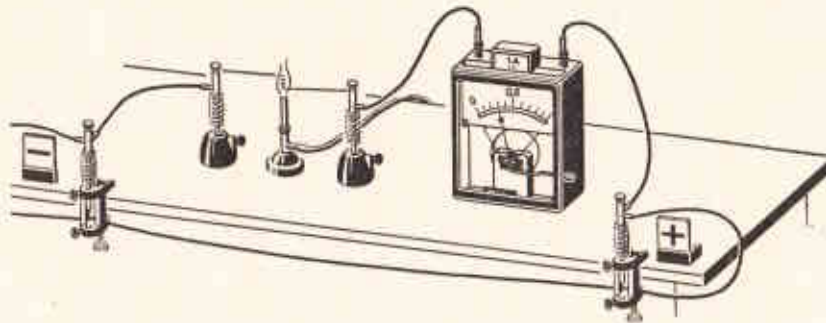


Abb. 2.3 – Widerstand und Temperatur

Im einzelnen zeigt der Versuch:

- Bei Eisen und Kupfer nimmt der Widerstand mit der Temperaturerhöhung zu. Diese und die meisten anderen Metalle leiten also den Strom im kalten Zustand besser als im warmen. Man nennt sie daher **Kaltleiter**.
- Bei Konstantan wird der Widerstandswert kaum verändert, der Widerstand bleibt **konstant** (daher der Name Konstantan). Diese Eigenschaft findet man auch bei anderen Widerstandslegierungen (z. B. Manganin).
- Bei Kohle nimmt der Widerstand beim Erwärmen ab. Kohle gehört zu den **Heißeleitern**, die den Strom im heißen Zustand besser leiten als im kalten. Heißeleiter sind meist Nichtmetalle (z. B. Urantioxid, Kurzbezeichnung: „Urdox“).

Durch Zusammenschalten geeigneter Kalt- und Heißeleiter kann man temperaturunabhängige Widerstände herstellen (z. B. Eisen-Urdox-Widerstand).

Der Widerstandswert nach der Temperaturänderung setzt sich zusammen aus dem Widerstandswert bei 20 °C und der Widerstandsänderung. Somit ergibt sich die Formel:

$$R_t = R_{20} + \Delta R \quad \Omega$$

wobei

$$\Delta R = R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad \Omega$$

Durch Einsetzen erhält man

$$R_t = R_{20} + R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

und durch rechnerische Umwandlung

$$R_t = R_{20} (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad \Omega$$

In diesen Formeln bedeuten:

- Δ = Änderung, Unterschied, Differenz (Δ : griech. Buchstabe „Delta“),
- ΔR = Widerstandsänderung in Ω ,
- R_{20} = Widerstand in Ω bei der Normaltemperatur t_1 (20 °C),
- R_t = Widerstand in Ω nach der Temperaturänderung bei der Temperatur t_2 ,
- Δt = Temperaturdifferenz in °C ($\Delta t = t_2 - t_1$), wobei für t_1 die Normaltemperatur (20 °C) und für t_2 die höhere bzw. tiefere Temperatur einzusetzen ist,
- α = Temperaturbeiwert (Temperaturzahl, Temperaturkoeffizient). Diese Zahl gibt die Widerstandsänderung eines Widerstands von 1 Ω bei einer Temperaturänderung um 1 ° (genau von 20 ° bis 21 °) an. (α : griech. Buchstabe „Alpha“).

Für einige Werkstoffe sind nachstehend die Temperaturbeiwerte angegeben:

Werkstoff	$\alpha \left(\frac{1}{^\circ\text{C}} \right)$	Werkstoff	$\alpha \left(\frac{1}{^\circ\text{C}} \right)$
Silber	0,0036	Nickelin	0,00023
Kupfer	0,0040	Manganin	0,00001
Aluminium	0,0040	Konstantan	- 0,00003
Eisen	0,0048	Kohle	- 0,00050

1. Beispiel:

Wie groß ist der Widerstand einer Kupferwicklung bei einer Temperatur von 80 °C, wenn bei einer Temperatur von 20 °C ein Widerstand von 26 Ω gemessen wird? Der Temperaturbeiwert beträgt 0,004 1/°C.

Gegeben: $R_{20} = 26 \Omega$; $t_1 = 20 \text{ °C}$; $t_2 = 80 \text{ °C}$; $\alpha = 0,004$

Gesucht: R_t

$$\begin{aligned}\text{Lösung: } R_t &= R_{20} + \Delta R \\ \Delta R &= R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t \\ \Delta R &= 26 \cdot 0,004 \cdot 60 \\ \Delta R &= \underline{6,24 \Omega}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}R_t &= 26 + 6,24 \\ R_t &= \underline{\underline{32,24 \Omega}}\end{aligned}$$

Der Widerstand bei 80 °C beträgt 32,24 Ω.

2. Beispiel:

Der Widerstand einer Kohlefadenlampe beträgt im ausgeschalteten Zustand bei 20 °C 1400 Ω. Im eingeschalteten Zustand nimmt die Glühlampe an einer Spannung von 220 V einen Strom von 1 A auf. Der Temperaturbeiwert für Kohle beträgt -0,0005. a) Wie groß ist der Widerstand der Kohlefadenlampe im eingeschalteten Zustand? b) Wie groß ist die Temperatur des heißen Kohlefadens?

Gegeben: $R_{20} = 1400 \Omega$; $U_t = 220 \text{ V}$; $I_t = 1 \text{ A}$; $t_1 = 20 \text{ °C}$; $\alpha = -0,0005$

Gesucht: a) R_t b) t_2

$$\begin{aligned}\text{Lösung: a) } R_t &= \frac{U_t}{I_t} = \frac{220}{1} = \underline{\underline{220 \Omega}} \\ \text{b) } \Delta t &= t_2 - t_1 \\ t_2 &= t_1 + \Delta t \\ \Delta R &= R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t \\ \Delta t &= \frac{\Delta R}{R_{20} \cdot \alpha} \\ \Delta R &= R_t - R_{20} \\ \Delta R &= 220 - 1400 \\ \Delta R &= \underline{\underline{-1180 \Omega}} \\ \Delta t &= \frac{-1180}{1400 \cdot -0,0005} \\ \Delta t &= \underline{\underline{1686 \text{ °C}}} \\ t_2 &= 20 + 1686 \\ t_2 &= \underline{\underline{1706 \text{ °C}}}\end{aligned}$$

a) Der Widerstand der eingeschalteten Kohlefadenlampe beträgt 220 Ω.

b) Die Temperatur des heißen Kohlefadens beträgt 1706 °C.

Wir haben gesehen, daß der Widerstand vieler Metalle mit sinkender Temperatur abnimmt. Bei einer Abkühlung dieser Leiter bis in die Nähe

des absoluten Nullpunkts (also bei -273 °C) verschwindet der Widerstand vollkommen, d. h., ein einmal eingeleiteter elektrischer Strom kann sehr lange weiterbestehen, auch wenn keine elektrische Spannung mehr vorhanden ist. Diese Eigenschaft eines Leiters bezeichnet man mit **Supraleitfähigkeit**.

2.3.2. Spezifischer Widerstand und Leitfähigkeit

Der in Abb. 2.4 dargestellte Versuch soll zeigen, welchen Einfluß der Werkstoff auf den Widerstand eines Leiters hat. Dabei werden nacheinander Drähte aus verschiedenen Werkstoffen, jedoch gleicher Länge ($l = 1 \text{ m}$) und gleicher Stärke ($d = 0,2 \text{ mm}$) in den Stromkreis geschaltet. Es ergeben sich folgende Werte:

a) Kupferdraht:

$$I = 3,5 \text{ A}, U = 2 \text{ V}; \text{ nach dem Ohmschen Gesetz ist } R = 0,57 \Omega$$

b) Aluminiumdraht:

$$I = 2,2 \text{ A}, U = 2 \text{ V}; \text{ nach dem Ohmschen Gesetz ist } R = 0,91 \Omega$$

c) Eisendraht:

$$I = 0,5 \text{ A}, U = 2 \text{ V}; \text{ nach dem Ohmschen Gesetz ist } R = 4,0 \Omega$$

Wir sehen, daß die Werte für die Stromstärke bei gleichbleibender Spannung für die drei untersuchten Drähte verschieden sind. Die nach dem

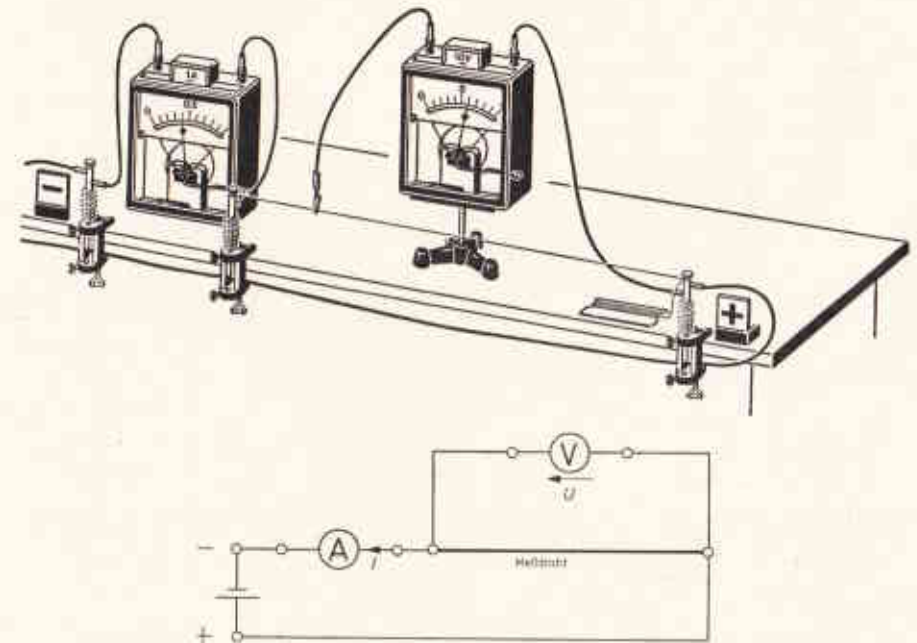


Abb. 2.4 – Leiterwiderstand

Ohmschen Gesetz errechneten Widerstände der einzelnen Drähte weichen erheblich voneinander ab. Die Ursache hierfür ist nur in der Art des Werkstoffs zu suchen.

Der Widerstand eines Leiters ist von seinem Werkstoff abhängig.

Jeder Werkstoff hat einen – seiner Eigenart entsprechenden – **spezifischen Widerstand**.

Als **spezifischen Widerstand** bezeichnet man den Widerstand eines Leiters von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt bei einer Temperatur von 20 °C.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
spezifischer Widerstand	ϱ ¹⁾	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$

Für einige Leiter sind nachstehend die spezifischen Widerstände angegeben:

Werkstoff	ϱ	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	Werkstoff	ϱ	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
Silber		0,016	Eisen		0,13
Kupfer		0,018	Manganin		0,42
Gold		0,023	Nickelin		0,43
Bronze		0,028	Konstantan		0,50
Aluminium		0,028	Kohle		10–100

Je kleiner der spezifische Widerstand eines Stoffs, desto besser leitet er den elektrischen Strom, desto größer ist seine **Leitfähigkeit**.

Mit **Leitfähigkeit** bezeichnet man den umgekehrten Wert des spezifischen Widerstands.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Leitfähigkeit	κ ²⁾	$\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$

Es ist also $\kappa = \frac{1}{\varrho}$ und $\varrho = \frac{1}{\kappa}$

Der Zahlenwert der Leitfähigkeit entspricht der Länge eines Leiters von 1 Ω Widerstand und 1 mm² Querschnitt bei 20 °C.

Wenn 1 m eines Leiters von 1 mm² Querschnitt den Widerstand „ $\varrho \Omega$ “ hat, dann erhält man die Länge des Leiters mit gleichem Querschnitt, der einen Widerstand von „1 Ω “ hat, indem man untersucht, wie oft „ $\varrho \Omega$ “ in „1 Ω “ enthalten ist, d. h. Leiterlänge $l = \frac{1}{\varrho} = \kappa$.

¹⁾ ϱ = griechischer Buchstabe Rho.

²⁾ κ = griechischer Buchstabe Kappa.

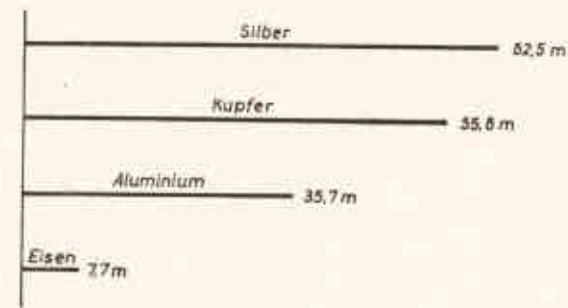


Abb. 2.5 – Leitfähigkeit

In der Abb. 2.5 ist die Leitfähigkeit und damit die Länge verschiedener Leiter mit 1 mm² Querschnitt und 1 Ω Widerstand maßstäblich dargestellt (1 mm $\triangleq$ 1 m).

Beispiel:

Silber hat einen spezifischen Widerstand von 0,016. Wie groß ist seine Leitfähigkeit?

Gegeben: $\varrho = 0,016$

Gesucht: κ

Lösung: $\kappa = \frac{1}{\varrho} = \frac{1}{0,016} = \underline{\underline{62,5}}$

Silber hat eine Leitfähigkeit von 62,5.

2.3.3. Berechnen des Leiterwiderstands

Der in Abb. 2.6 dargestellte Versuch soll zeigen, daß der Widerstand eines Leiters außer vom Werkstoff noch von anderen Faktoren abhängt.

Zu diesem Zweck werden nacheinander Konstantandrähte von verschiedener Länge jedoch mit gleichem Querschnitt in einen Stromkreis geschaltet. Bei einer Spannung von 6 V ergeben sich für die Stromstärke folgende Werte:

Drahtlänge $l = 1,0$ m: Stromstärke $I = 0,82$ A

Drahtlänge $l = 1,5$ m: Stromstärke $I = 0,55$ A

Drahtlänge $l = 2,0$ m: Stromstärke $I = 0,41$ A

Wir stellen fest, daß mit zunehmender Länge des Leiters die Stromstärke kleiner wird. Das bedeutet (nach dem Ohmschen Gesetz), daß der Widerstand größer geworden sein muß.

Vergleichen wir den aus den Strom- und Spannungswerten ermittelten Widerstand mit der Leiterlänge, so erkennen wir, daß Widerstand und Leiterlänge sich im gleichen Verhältnis ändern.

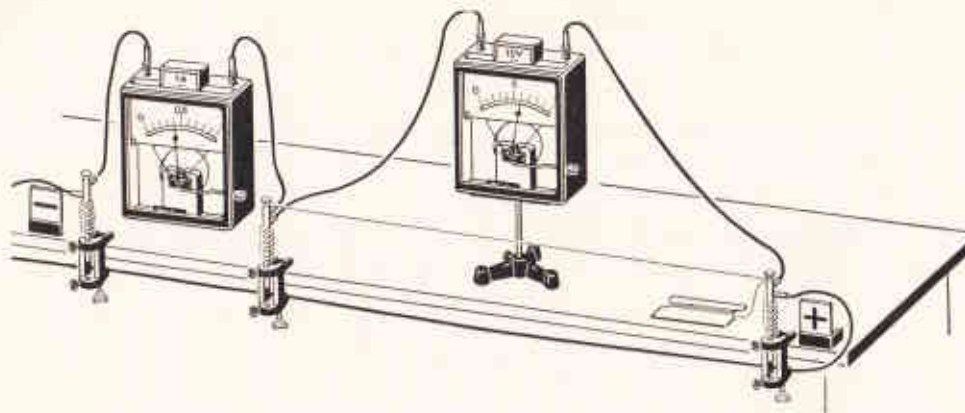


Abb. 2.6 -- Leiterwiderstand

Der Widerstand eines Leiters wächst linear mit der Leiterlänge.

In einem weiteren Versuch werden nacheinander Konstantandrähte von gleicher Länge, jedoch mit verschiedenen Durchmessern, in den Stromkreis geschaltet. Dabei ergibt sich, daß bei größerem Querschnitt¹⁾ auch die Stromstärke größer ist. Da die Spannung konstant ist, muß nach dem Ohmschen Gesetz der Widerstand kleiner geworden sein.

Errechnen wir aus den Strom- und Spannungswerten wieder den Widerstand und multiplizieren ihn mit dem jeweiligen Querschnitt, so sehen wir, daß das Produkt $R \cdot A$ konstant ist. Widerstand und Leiterquerschnitt verhalten sich also umgekehrt zueinander.

Der Widerstand eines Leiters wächst mit abnehmendem Querschnitt.

Die Versuche haben gezeigt, daß der Widerstand R eines Leiters nicht nur vom spezifischen Widerstand ρ des Werkstoffs abhängt. Er wächst mit zunehmender Länge l und sinkt mit zunehmendem Querschnitt A des Leiters.

¹⁾ Der Querschnitt eines runden Drahts wird mit der Formel für die Berechnung einer Kreisfläche ermittelt:

$$A = \frac{d^2 \pi}{4}$$

In dieser Formel ist A der Querschnitt und d der Durchmesser des Drahts. π ist eine Konstante, deren Wert 3,14 beträgt.

Für die Berechnung eines Leiterwiderstands ergibt sich somit die Formel

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad \Omega$$

Wenn anstelle des spezifischen Widerstands die Leitfähigkeit gegeben ist, setzt man in obige Gleichung für ρ den Wert $\frac{1}{\kappa}$ ein. Damit erhält man die Formel:

$$R = \frac{l}{\kappa \cdot A} \quad \Omega$$

In diesen Formeln bedeuten:

R = Leiterwiderstand bei 20 °C in Ω ,

l = Leiterlänge in m,

A = Leiterquerschnitt in mm^2 ,

ρ = spezifischer Widerstand in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ und

κ = Leitfähigkeit in $\frac{\text{S} \cdot \text{m}}{\text{mm}^2}$.

1. Beispiel:

Ein Drahtwiderstand besteht aus 80 m Nickelindraht von 2 mm^2 Querschnitt. Wie groß ist sein Widerstand?

Gegeben: $l = 80 \text{ m}$; $A = 2 \text{ mm}^2$; $\rho = 0,43$

Gesucht: R

$$\text{Lösung: } R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{0,43 \cdot 80}{2} = \underline{\underline{17,2 \Omega}}$$

Der Widerstandswert beträgt 17,2 Ω .

2. Beispiel:

Wie groß ist der Widerstand eines Kupferdrahts von 350 m Länge und einem Durchmesser von 3 mm?

Gegeben: $l = 350 \text{ m}$; $d = 3 \text{ mm}$; $\rho = 0,018$

Gesucht: R

$$\text{Lösung: } R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{3^2 \cdot 3,14}{4} = \underline{\underline{7,065 \text{ mm}^2}}$$

$$R = \frac{0,018 \cdot 350}{7,065} = \underline{\underline{0,89 \Omega}}$$

Der Kupferdraht hat einen Widerstand von 0,89 Ω .

3. Beispiel:

Zur Herstellung eines Widerstands von 100Ω soll ein Draht mit einem Querschnitt von $0,25 \text{ mm}^2$ und dem spezifischen Widerstand $0,5$ verwendet werden. Wie lang muß der Draht sein?

Gegeben: $R = 100 \Omega$; $A = 0,25 \text{ mm}^2$; $\varrho = 0,5$

Gesucht: l

$$\text{Lösung: } R = \frac{\varrho \cdot l}{A}$$

$$l = \frac{R \cdot A}{\varrho} = \frac{100 \cdot 0,25}{0,5} = \underline{\underline{50 \text{ m}}}$$

Der Draht muß eine Länge von 50 m haben.

4. Beispiel:

Wie groß ist der spezifische Widerstand eines Aluminiumdrahts von 30 m Länge und 4 mm Durchmesser, dessen Widerstand $0,0697 \Omega$ beträgt?

Gegeben: $l = 30 \text{ m}$; $d = 4 \text{ mm}$; $R = 0,0697 \Omega$

Gesucht: ϱ

$$\text{Lösung: } R = \frac{\varrho \cdot l}{A}$$

$$\varrho = \frac{R \cdot A}{l}$$

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{4^2 \cdot 3,14}{4} = \underline{\underline{12,56 \text{ mm}^2}}$$

$$\varrho = \frac{0,0697 \cdot 12,56}{30} = \underline{\underline{0,029}}$$

Der spezifische Widerstand beträgt $0,029 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$.

5. Beispiel:

Wieviel km Eisendraht mit einem Querschnitt von $4,4 \text{ mm}^2$ haben einen Widerstand von 59Ω ? Die Leitfähigkeit für Eisen beträgt $7,7$.

Gegeben: $A = 4,4 \text{ mm}^2$; $R = 59 \Omega$; $\kappa = 7,7$

Gesucht: l (km)

$$\text{Lösung: } R = \frac{l}{\kappa \cdot A}$$

$$l = R \cdot \kappa \cdot A = 59 \cdot 7,7 \cdot 4,4 = 2000 \text{ m} = \underline{\underline{2 \text{ km}}}$$

Der Eisendraht hat eine Länge von 2 km .

6. Beispiel:

Ein Aluminiumdraht mit einer Leitfähigkeit von $34,5$ hat einen Widerstand von $3,5 \Omega$. Seine Länge beträgt 379 m . Wie groß ist der Durchmesser des Drahts?

Gegeben: $l = 379 \text{ m}$; $R = 3,5 \Omega$; $\kappa = 34,5$

Gesucht: d

$$\text{Lösung: } A = \frac{d^2 \pi}{4}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$$

$$R = \frac{l}{\kappa \cdot A}$$

$$A = \frac{l}{\kappa \cdot R} = \frac{379}{34,5 \cdot 3,5} = \underline{\underline{3,14 \text{ mm}^2}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,14}{3,14}} = \underline{\underline{2 \text{ mm}}}$$

Der Draht hat einen Durchmesser von 2 mm .

2.3.4. Widerstände als Bauelemente

Widerstände als Bauelemente werden u. a. verwendet, um in Stromkreisen Spannungen herabzusetzen oder zu teilen und um Stromstärken zu begrenzen. Je nach Verwendungszweck werden sie in verschiedenen Ausführungsformen und Größen und für verschiedene Belastungen hergestellt (vgl. hierzu Band 10 des „Handbuchs der Fernmeldetechnik – Grundreihe“).

Man unterscheidet lineare und nichtlineare Widerstände.

Lineare Widerstände, die wiederum in solche mit festen und solche mit veränderbaren Werten unterteilt werden (Festwiderstände und Drehwiderstände bzw. Potentiometer), sollen in weiten Grenzen konstant bleiben. Sie werden vor allem als Drahtwiderstände und als Schichtwiderstände hergestellt.

Bei den **nichtlinearen Widerständen** unterscheidet man temperaturabhängige, spannungsabhängige und beleuchtungsabhängige Widerstände.

Temperaturabhängige Widerstände (**Thermistoren**) sind meist Heißleiter mit hohem negativen Temperaturbeiwert. Die Widerstandsänderung wird durch Schwankungen der Außentemperatur oder durch Strombelastung (Stromwärme) hervorgerufen.

Bei den spannungsabhängigen Widerständen (**Varistoren**) wird der Widerstand mit ansteigender Spannung kleiner.

Bei den beleuchtungsabhängigen Widerständen (**Fotowiderständen**) wird der sogenannte innere fotoelektrische Effekt ausgenutzt (vgl. hierzu Abschn. 5.5).

Will man für verschiedene Widerstände die Abhängigkeit des Stroms von der Spannung zeichnerisch (grafisch) darstellen, so markiert man in einem Diagramm die Schnittpunkte für die zusammengehörenden Strom- und Spannungswerte. Werden nun für die einzelnen Widerstände diese Schnittpunkte miteinander verbunden, so erhält man die **Kennlinien** der Widerstände. An der Neigung und am Verlauf einer **Widerstandskennlinie** ist die Größe bzw. die Art des Widerstands zu erkennen (vgl. hierzu Abb. 2.7). Die Widerstandskennlinie verläuft um so steiler, je kleiner der Widerstand ist; sie verläuft um so flacher, je größer der Widerstand ist (Kennlinie 1: kleinerer Widerstand; Kennlinie 2: größerer Widerstand). Wird eine zunächst steil verlaufende Kennlinie immer flacher, so besagt dieser Verlauf, daß der Widerstand mit zunehmender Spannung größer wird (Kennlinie 3). Bei einem **linearen Widerstand** verläuft die Kennlinie

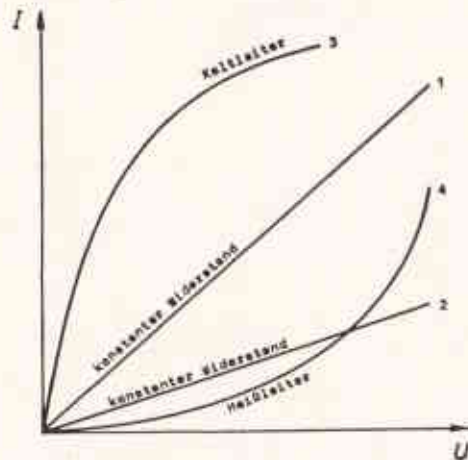


Abb. 2.7 – Widerstandskennlinien

geradlinig („linear“), d. h., Strom und Spannung ändern sich im gleichen Verhältnis, der Widerstand ist konstant (Kennlinien 1 und 2). Bei einem **nichtlinearen Widerstand** verläuft die Kennlinie nicht als Gerade („nicht-linear“), d. h., Strom und Spannung ändern sich nicht im gleichen Verhältnis, der Widerstand ist nicht konstant (Kennlinien 3 und 4).

In der Abb. 2.8 ist die Abhängigkeit des Widerstands eines Kupferleiters (1) sowie eines Halbleitermaterials (2) von der Temperatur dargestellt. Beleuchtungs- und spannungsabhängige Halbleiter haben einen ähnlichen Widerstandsverlauf wie temperaturabhängige Halbleiter.

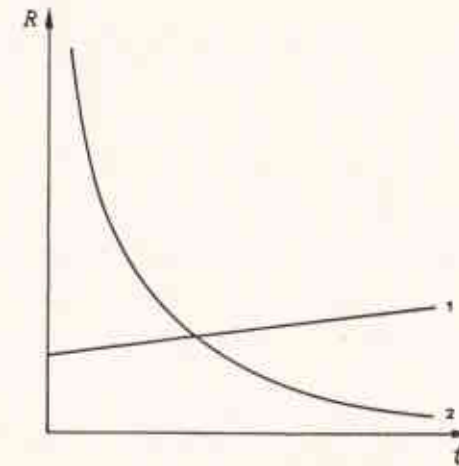


Abb. 2.8 – Widerstandskennlinien

2.3.5. Isolationswiderstand

In der Fernmeldetechnik ist auch der **Isolationswiderstand** von großer Bedeutung. Man versteht darunter den Widerstand, den die Isolation eines Leiters gegen Erde oder gegen einen benachbarten Leiter hat. Dieser Isolationswiderstand soll möglichst hoch sein, also nur einen geringen Stromfluß zulassen.

Überall dort, wo ein Spannungsausgleich und damit ein Stromfluß unerwünscht ist (also auch dort, wo Menschen vor schädlichen Spannungen geschützt werden sollen), werden **Isolierstoffe** verwendet. Zu diesen Stoffen gehören u. a. trockene Luft, Papier, Lack, Gummi, Seide, Holz, Glimmer, Glas, Porzellan, Marmor und verschiedene Kunststoffe.

Ideale Isolierstoffe, die einen unendlich großen Widerstand haben, gibt es nicht. Um eine Betriebssicherheit zu gewährleisten, sind für den Isolationswiderstand Mindestwerte vorgeschrieben, z. B.

- für Blankdrahtleitungen bei ungünstiger Witterung 0,3 MΩ je km Doppelleitung,
- für Installationskabel 100 MΩ je km Doppelleitung,
- für Orts- und Bezirkskabel 5000 MΩ je km Doppelleitung und
- für Fernkabel 10000 bis 50000 MΩ je km Doppelleitung.

Der Isolationswiderstand einer Leitung nimmt mit wachsender Leitungslänge ab. Deshalb muß man den Wert für 1 km (Tabellenwert) durch die gesamte Leitungslänge teilen, um den Isolationswiderstand der gesamten Leitung zu errechnen.

Beispiel:

Der Isolationswiderstand einer 50 km langen Blankdrahtleitung beträgt $2 \text{ M}\Omega$ je km. Wie groß ist der Isolationswiderstand der gesamten Leitung?

Gegeben: $R_1 = 2 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$; $l_G = 50 \text{ km}$

Gesucht: R_G

$$\text{Lösung: } R_G = \frac{R_1}{l_G} = \frac{2 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}}{50 \text{ km}} = \underline{\underline{40 \text{ k}\Omega}}$$

Der Isolationswiderstand der gesamten Leitung beträgt $40 \text{ k}\Omega$.

2.3.6. Schaltung von Widerständen

Für die Berechnung elektrischer Stromkreise empfiehlt es sich, in einem Schaltbild die Richtungen der Spannungen und Ströme durch Pfeile anzugeben. Da es für diese Zählrichtungen verschiedene Möglichkeiten gibt, sollen hier folgende Regeln gelten:

1. Die Richtung für einen Strom wird durch eine in den Leitungsstrich eingezeichnete Pfeilspitze entsprechend der technischen Stromrichtung vom positiven zum negativen Spannungswert angegeben.
2. Die Richtung für eine Spannung wird durch einen Pfeil neben der Spannungsquelle bzw. neben dem Spannungsverbraucher angegeben. Dabei sind die Spannungspfeile stets vom positiven zum negativen Spannungswert gerichtet.

Neben die Pfeile sowie neben die Spannungsverbraucher (Widerstände) werden die zugehörigen Formelzeichen I , U und R geschrieben. Die Formelzeichen erhalten in der Regel noch einen Index. Dieser Index kann für I und U dem Index des zugehörigen Widerstands entsprechen (vgl. hierzu Abb. 2.9). Gelegentlich wird eine Spannung oder ein Strom auch

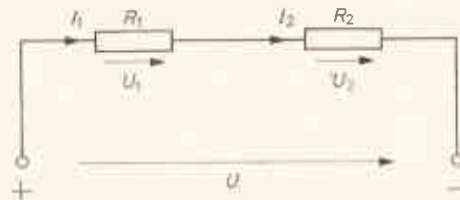


Abb. 2.9 – Bezeichnung von Teilspannungen und -strömen

durch einen an das Formelzeichen gesetzten Doppelindex gekennzeichnet. So gibt z. B. U_{AB} die Spannung zwischen den Punkten A und B an; I_{AB} ist der von Punkt A nach Punkt B fließende Strom.

2.3.6.1. Reihenschaltung

Von einer **Reihenschaltung** oder **Hintereinanderschaltung** spricht man, wenn mehrere Widerstände in Reihe, d. h. einer hinter den anderen geschaltet sind.

Mit der in Abb. 2.10 als Schaltbild dargestellten Versuchsanordnung soll festgestellt werden, wie sich Spannungen, Ströme und Widerstände in einem Stromkreis verhalten, wenn mehrere Widerstände in Reihe geschaltet sind.

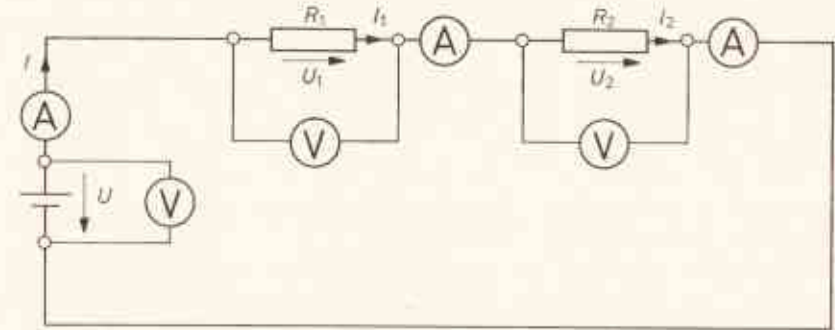


Abb. 2.10 – Reihenschaltung von Widerständen

Für den Versuch werden zwei Widerstände von $R_1 = 10 \Omega$ und $R_2 = 20 \Omega$ verwendet.

Bei einer Versuchsspannung von 9 V fließt ein Strom von $0,3 \text{ A}$. Nach dem Ohmschen Gesetz ergibt sich damit ein Gesamtwiderstand von

$$R = \frac{U}{I} = \frac{9}{0,3} = 30 \Omega$$

Diese Werte sowie die für jeden Teilwiderstand ermittelten Werte sind in nachstehender Tabelle zusammengestellt:

Gemessener Abschnitt	Spannung	Stromstärke	Widerstand
Gesamter Außenstromkreis	$U = 9 \text{ V}$	$I = 0,3 \text{ A}$	$R = 30 \Omega$
Widerstand 1	$U_1 = 3 \text{ V}$	$I_1 = 0,3 \text{ A}$	$R_1 = 10 \Omega$
Widerstand 2	$U_2 = 6 \text{ V}$	$I_2 = 0,3 \text{ A}$	$R_2 = 20 \Omega$

Aus dem vorstehend beschriebenen Versuch erkennen wir:

In einer Reihenschaltung werden alle Widerstände vom gleichen Strom durchflossen.

$$I = I_1 = I_2 = \dots$$

In einer Reihenschaltung ist der Gesamtwiderstand gleich der Summe der Teilwiderstände.

$$R = R_1 + R_2 + \dots \Omega$$

In einer Reihenschaltung ist die treibende Spannung gleich der Summe der Spannungsabfälle.

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad V$$

Erweiternd kann man sagen:

In jedem geschlossenen Stromkreis ist die Summe aller treibenden Spannungen gleich der Summe aller Spannungsabfälle.

Dies ist der „2. Kirchhoffsche Satz“⁽¹⁾.

Werden die Spannungsabfälle und Widerstände miteinander verglichen, so ist weiter zu ersehen, daß an einem großen Widerstand ein großer und an einem kleinen Widerstand ein kleiner Spannungsabfall erfolgt. Bei genauer Betrachtung erkennen wir folgende Regel:

In einer Reihenschaltung verhalten sich die Spannungen zueinander wie die entsprechenden Widerstände.

$$\frac{U_1}{U} = \frac{R_1}{R} \quad \text{oder} \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Mehrere hintereinandergeschaltete Widerstände (R_1, R_2 usw.) können als ein Widerstand gedacht werden. Diesen Widerstand nennt man Ersatzwiderstand.

1. Beispiel:

Drei Widerstände von 45, 83 und 127 Ω sind in Reihe zu schalten. Wie groß ist der Gesamtwiderstand?

Gegeben: $R_1 = 45 \Omega$; $R_2 = 83 \Omega$; $R_3 = 127 \Omega$

Gesucht: R

Lösung: $R = R_1 + R_2 + R_3 = 45 + 83 + 127 = \underline{\underline{255 \Omega}}$

Der Gesamtwiderstand beträgt 255 Ω .

2. Beispiel:

Drei Widerstände von 20 Ω , 6 Ω und 14 Ω werden in Reihenschaltung an eine Spannung von 60 V gelegt. Welche Teilspannung liegt an jedem der drei Widerstände?

Gegeben: $R_1 = 20 \Omega$
 $R_2 = 6 \Omega$
 $R_3 = 14 \Omega$
 $U = 60 \text{ V}$

Gesucht: U_1 ; U_2 ; U_3

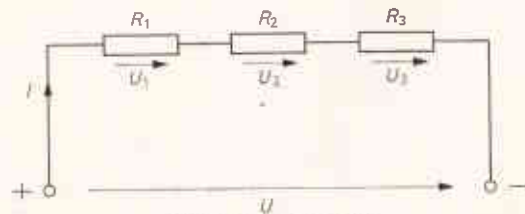


Abb. 2.11 – Schaltbild

¹⁾ Robert Kirchhoff = deutscher Physiker (1824–1887).

Lösung: $R = R_1 + R_2 + R_3 = 20 + 6 + 14 = \underline{\underline{40 \Omega}}$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{60}{40} = \underline{\underline{1,5 \text{ A}}}$$

$$U_1 = I_1 \cdot R_1 = 1,5 \cdot 20 = \underline{\underline{30 \text{ V}}}$$

$$U_2 = I_2 \cdot R_2 = 1,5 \cdot 6 = \underline{\underline{9 \text{ V}}}$$

$$U_3 = I_3 \cdot R_3 = 1,5 \cdot 14 = \underline{\underline{21 \text{ V}}}$$

$$\text{Probe: } U = U_1 + U_2 + U_3 = 30 + 9 + 21 = \underline{\underline{60 \text{ V}}}$$

Die Teilspannungen an den drei Widerständen betragen $U_1 = 30 \text{ V}$, $U_2 = 9 \text{ V}$ und $U_3 = 21 \text{ V}$.

3. Beispiel:

Ein Spannungsmesser mit einem Innenwiderstand von 10 k Ω hat einen Meßbereich von 20 V. Mit dem Spannungsmesser sollen Spannungen bis 250 V gemessen werden. Damit das Meßwerk nicht überlastet wird, muß ein Vorwiderstand dafür sorgen, daß auch nach der Meßbereichserweiterung bei vollem Zeigerausschlag am Innenwiderstand nur die zulässige Spannung von 20 V liegt (ob der „Vorwiderstand“ vor oder hinter den Innenwiderstand geschaltet wird, hat auf seine Wirkung keinen Einfluß). Wie groß muß der Vorwiderstand sein?

Gegeben: $R_i = 10 \text{ k}\Omega$
 $U_i = 20 \text{ V}$
 $U = 250 \text{ V}$

Gesucht: R_v

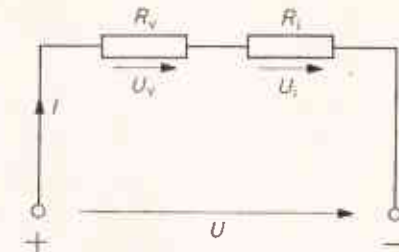


Abb. 2.12 – Schaltbild

Lösung: $U = U_v + U_i$
 $U_v = U - U_i = 250 - 20 = \underline{\underline{230 \text{ V}}}$

$$\frac{R_v}{R_i} = \frac{U_v}{U_i}$$

$$R_v = \frac{R_i \cdot U_v}{U_i} = \frac{10000 \cdot 230}{20} = 115000 \Omega = \underline{\underline{115 \text{ k}\Omega}}$$

Der Vorwiderstand muß 115 k Ω groß sein.

4. Beispiel:

Eine Signallampe ist mit einer 50 m langen Doppelleitung ($2 \times 0,6 \text{ mm}$ Kupfer) mit der Spannungsquelle verbunden. Welchen Spannungsverlust verursacht die Leitung, wenn die Betriebsstromstärke 0,3 A beträgt? Wie groß ist die Nutzspannung an der Signallampe bei einer Betriebsspannung von 24 V?

Gegeben: $l = 100 \text{ m}$
 $d = 0,6 \text{ mm}$
 $\rho = 0,018$
 $I = 0,3 \text{ A}$
 $U = 24 \text{ V}$

Gesucht: U_{Ltg} ; U_1

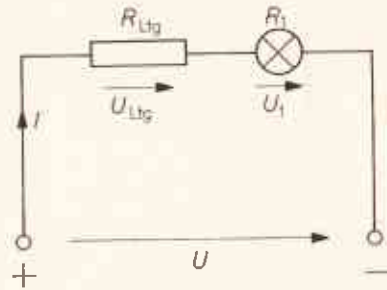


Abb. 2.13 – Schaltbild

Lösung: $U_{\text{Ltg}} = I \cdot R_{\text{Ltg}}$

$$R_{\text{Ltg}} = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{0,6^2 \cdot 3,14}{4} = 0,2826 \text{ mm}^2$$

$$R_{\text{Ltg}} = \frac{0,018 \cdot 100}{0,2826} = 6,37 \Omega$$

$$U_{\text{Ltg}} = 0,3 \cdot 6,37 = 1,91 \text{ V}$$

Die Leitung verursacht einen Spannungsverlust von 1,91 V.

$$U = U_{\text{Ltg}} + U_1$$

$$U_1 = U - U_{\text{Ltg}} = 24 - 1,91 = 22,09 \text{ V}$$

Die Spannung an der Signallampe beträgt 22,09 V.

Ströme und Spannungen in einer Reihenschaltung von Widerständen lassen sich auch **zeichnerisch** ermitteln. Dies ist zwar umständlicher als die rechnerische Ermittlung der gesuchten Werte; andererseits läßt sich dieses Verfahren auch dort anwenden, wo eine rechnerische Lösung nicht mehr möglich ist, z. B. bei der Reihenschaltung einer Diode mit einem ohmschen Widerstand. Das Verfahren der zeichnerischen Lösung einer Reihenschaltung von zwei Widerständen soll an dem folgenden Beispiel gezeigt werden.

Zwei Widerstände von $R_1 = 200 \Omega$ und $R_2 = 300 \Omega$ sind an einer Gleichspannung von $U = 10 \text{ V}$ hintereinandergeschaltet (vgl. hierzu Abb. 2.14).

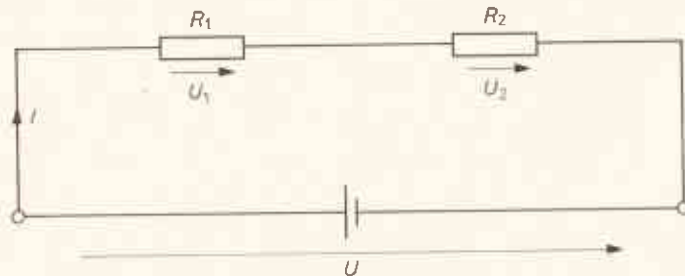


Abb. 2.14 – Schaltbild

Der Widerstand R_1 liegt unmittelbar am Potentialpunkt +10 V.

Der Widerstand R_2 liegt unmittelbar am Potentialpunkt 0 V.

Für die zeichnerische Lösung beginnt nun die Kennlinie

für den Widerstand R_1 im Punkt +10 V.

für den Widerstand R_2 im Nullpunkt.

Um die Kennlinie für die Widerstände zeichnen zu können, werden jetzt noch die Ströme für den Fall, daß jeder Widerstand an einer Spannung von 10 V liegt, ermittelt:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{10 \text{ V}}{200 \Omega} = 0,05 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{10 \text{ V}}{300 \Omega} = 0,033 \text{ A}$$

In der Abb. 2.15 sind die Kennlinien der beiden Widerstände dargestellt:

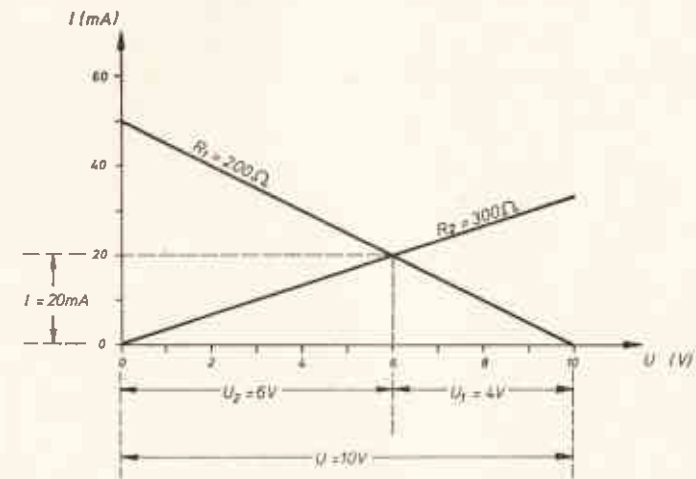


Abb. 2.15 – Spannungs-Strom-Diagramm

Da bei einer Reihenschaltung in beiden Widerständen die Stromstärke gleich groß ist, muß der Schnittpunkt der Widerstandskennlinien die Lösung ergeben:

$$I = \underline{0,02 \text{ A}}; \quad U_1 = \underline{4 \text{ V}}; \quad U_2 = \underline{6 \text{ V}}.$$

Die rechnerische Kontrolle der zeichnerisch ermittelten Werte ergibt:

$$R = R_1 + R_2 = 200 + 300 = \underline{500 \Omega}$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10}{500} = \underline{0,02 \text{ A}}$$

$$U_1 = I \cdot R_1 = 0,02 \cdot 200 = \underline{4 \text{ V}}$$

$$U_2 = I \cdot R_2 = 0,02 \cdot 300 = \underline{6 \text{ V}}$$

2.3.6.2. Parallelschaltung

Von einer **Parallelschaltung** oder **Nebeneinanderschaltung** spricht man, wenn alle Anfänge der zusammengeschalteten Widerstände miteinander verbunden sind und desgleichen alle Enden dieser Widerstände. An den Verbindungsstellen der Widerstände verzweigt sich der Strom (Stromverzweigungspunkte).

Mit der in Abb. 2.16 als Schaltbild dargestellten Versuchsanordnung soll festgestellt werden, wie sich Spannungen, Ströme, Widerstände und Leitwerte verhalten, wenn mehrere Widerstände parallelgeschaltet sind.

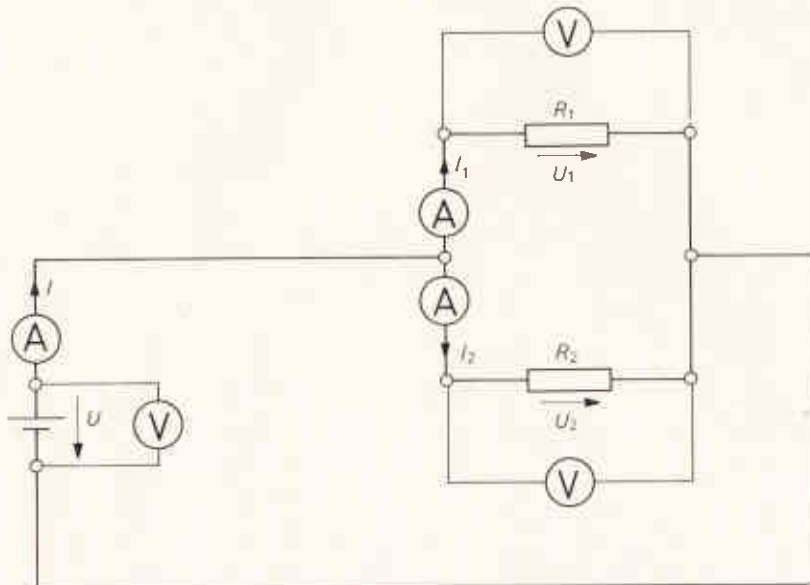


Abb. 2.16 – Parallelschaltung von Widerständen

Für den Versuch werden zwei Widerstände von $R_1 = 10 \Omega$ und $R_2 = 20 \Omega$ verwendet.

Bei einer Versuchsspannung von 4 V fließt ein Strom von 0,6 A. Nach dem Ohmschen Gesetz ergibt sich damit ein Gesamtwiderstand von

$$R = \frac{U}{I} = \frac{4}{0,6} = 6,67 \Omega$$

Das Ergebnis läßt erkennen, daß bei einer Parallelschaltung der Gesamtwiderstand kleiner als der kleinste Teilwiderstand ist.

Die gemessenen und die rechnerisch ermittelten Werte sind wieder in nachstehender Tabelle zusammengestellt:

Gemessener Abschnitt	Spannung	Stromstärke	Widerstand	Leitwert
Gesamter Außenstromkreis	$U = 4 \text{ V}$	$I = 0,6 \text{ A}$	$R = 6\frac{2}{3} \Omega$	$G = 0,15 \text{ S}$
Widerstand 1	$U_1 = 4 \text{ V}$	$I_1 = 0,4 \text{ A}$	$R_1 = 10 \Omega$	$G_1 = 0,1 \text{ S}$
Widerstand 2	$U_2 = 4 \text{ V}$	$I_2 = 0,2 \text{ A}$	$R_2 = 20 \Omega$	$G_2 = 0,05 \text{ S}$

Aus dem Versuch erkennen wir:

In einer Parallelschaltung liegen alle Widerstände an der gleichen Spannung.

$$U = U_1 = U_2 = \dots\dots\dots$$

In einer Parallelschaltung ist der Gesamtleitwert gleich der Summe der Teilleitwerte.

$$G = G_1 + G_2 + \dots\dots\dots \text{ oder } \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots\dots\dots \text{ S}$$

In einer Parallelschaltung (Stromverzweigung) ist der Gesamtstrom gleich der Summe der Teilströme.

$$I = I_1 + I_2 + \dots\dots\dots \text{ A}$$

Erweiternd kann man sagen:

In jedem Stromverzweigungspunkt ist die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme.

Dies ist der „1. Kirchhoffsche Satz“.

Vergleicht man die Ströme und Widerstände miteinander, so erkennt man ferner, daß durch einen großen Widerstand ein kleiner Strom und durch einen kleinen Widerstand ein großer Strom fließt. Bei genauer Betrachtung erkennen wir folgende Regel:

In einer Parallelschaltung verhalten sich die Ströme zueinander wie die entsprechenden Leitwerte bzw. umgekehrt wie die entsprechenden Widerstände.

$$\frac{I}{I_1} = \frac{G}{G_1} = \frac{R_1}{R} \text{ oder } \frac{I_1}{I_2} = \frac{G_1}{G_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Mehrere parallelgeschaltete Widerstände (R_1, R_2, R_3 usw.) können als ein Widerstand gedacht werden. Diesen Widerstand nennt man Ersatzwiderstand.

Durch Umstellen der Grundformel erhält man folgende Formel für die Berechnung zweier parallelgeschalteter Widerstände:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad \Omega$$

oder in Worten ausgedrückt:

Der Gesamtwiderstand ist gleich dem Produkt der Einzelwiderstände geteilt durch deren Summe.

Auch für die Parallelschaltung gleich großer Widerstände läßt sich die Grundformel vereinfachen. Bei p gleichen Einzelwiderständen R_1 ergibt sich:

$$R = \frac{R_1}{p} \quad \Omega$$

1. Beispiel:

Zwei Widerstände von 60 und 75 Ω sind parallelgeschaltet. Wie groß ist der Gesamtwiderstand?

Gegeben: $R_1 = 60 \Omega$; $R_2 = 75 \Omega$

Gesucht: R

$$\text{Lösung: } R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{60 \cdot 75}{60 + 75} = \underline{\underline{33,33 \Omega}}$$

Der Gesamtwiderstand beträgt 33,33 Ω .

2. Beispiel:

Fünf Widerstände zu je 20 Ω sind parallelgeschaltet. Wie groß ist der Gesamtwiderstand?

Gegeben: $R_1 = 20 \Omega$; $p = 5$

Gesucht: R

$$\text{Lösung: } R = \frac{R_1}{p} = \frac{20}{5} = \underline{\underline{4 \Omega}}$$

Der Gesamtwiderstand beträgt 4 Ω .

3. Beispiel:

Drei Widerstände zu 10, 20 und 50 Ohm liegen parallel an einer Spannung von 60 V. Wie groß sind die Teilströme, der aufgenommene Gesamtstrom und der Gesamtwiderstand?

Gegeben: $R_1 = 10 \Omega$
 $R_2 = 20 \Omega$
 $R_3 = 50 \Omega$
 $U = 60 \text{ V}$

Gesucht: I ; I_1 ; I_2 ; I_3 und R

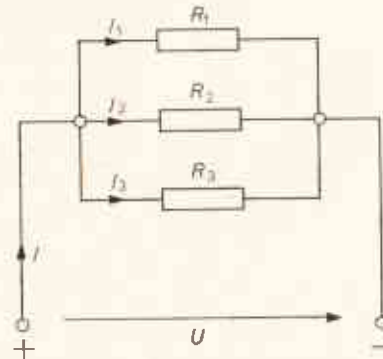


Abb. 2.17 – Schaltbild

Lösung: Bevor wir den Gesamtstrom errechnen können, ist erst einmal der Gesamtwiderstand zu ermitteln:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{10} + \frac{1}{20} + \frac{1}{50} = \frac{10 + 5 + 2}{100} = \frac{17}{100}$$

$$R = \frac{100}{17} = \underline{\underline{5,88 \Omega}}$$

Der Gesamtwiderstand beträgt 5,88 Ω .

Jetzt errechnen wir I nach dem Ohmschen Gesetz:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{60}{5,88} = \underline{\underline{10,2 \text{ A}}}$$

Der Gesamtstrom beträgt 10,2 A.

In einer reinen Parallelschaltung ist $U = U_1 = U_2 = U_3$, also ist die Spannung über allen Widerständen gleich groß; somit gilt für die Teilströme:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{60}{10} = \underline{\underline{6,0 \text{ A}}}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{60}{20} = \underline{\underline{3,0 \text{ A}}}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{60}{50} = \underline{\underline{1,2 \text{ A}}}$$

Da $I = I_1 + I_2 + I_3$ ist, ergibt sich zur Kontrolle

$$I = 6,0 + 3,0 + 1,2 = 10,2 \text{ A.}$$

Die Teilströme betragen $I_1 = 6,0 \text{ A}$, $I_2 = 3,0 \text{ A}$ und $I_3 = 1,2 \text{ A}$.

4. Beispiel:

Ein Amperemeter mit einem Innenwiderstand von 0,02 Ω hat einen Meßbereich von 10 A. Der Meßbereich soll auf 50 A erhöht werden. Damit das Meßwerk nicht überlastet wird, muß ein Nebenzwiderstand dafür sorgen, daß auch nach der Meßbereichserweiterung bei vollem Zeigerausschlag nur die zulässige Stromstärke von 10 A durch das Meßwerk fließt. Die darüber hinaus vorhandene Stromstärke muß am Meßwerk seitlich vorbeigeleitet werden. Wie groß muß der Nebenzwiderstand sein?

Gegeben: $R_i = 0,02 \Omega$
 $I_1 = 10 \text{ A}$
 $I = 50 \text{ A}$

Gesucht: R_n

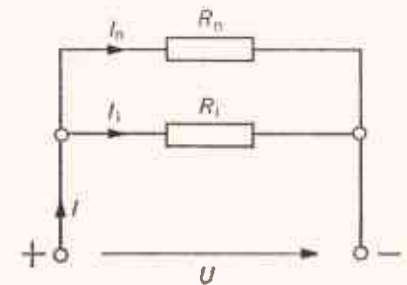


Abb. 2.18 – Schaltbild

Lösung: $I = I_1 + I_n$

$$I_n = I - I_1 = 50 - 10 = 40 \text{ A}$$

$$\frac{R_n}{R_1} = \frac{I_1}{I_n}$$

$$R_n = \frac{I_1 \cdot R_1}{I_n} = \frac{10 \cdot 0,02}{40} = \underline{\underline{0,005 \Omega}}$$

Der Nebenwiderstand muß $0,005 \Omega$ groß sein.

2.3.6.3. Gruppenschaltung

Von einer Gruppenschaltung spricht man, wenn in einem Stromkreis sowohl Reihen- als auch Parallelschaltungen vorkommen. Um die Berechnung solcher Gruppenschaltungen zu vereinfachen, ist es üblich,

1. mehrere Widerstände zu einem Ersatzwiderstand zusammenzufassen und
2. gegebenenfalls diesen Ersatzwiderstand in einem Ersatzschaltbild darzustellen (vgl. hierzu Abb. 2.19).

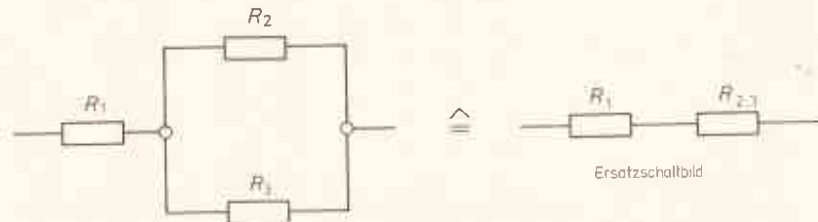


Abb. 2.19 – Schaltbilder

In der Abb. 2.19 ist z. B. der Widerstand R_1 mit den parallelgeschalteten Widerständen R_2 und R_3 in Reihe geschaltet.

Wenn wir den gesamten Widerstand der Schaltung errechnen wollen, müssen wir zunächst den Widerstand ermitteln, den R_2 und R_3 zusammen ergeben. Verwenden wir die vereinfachte Formel für zwei parallelgeschaltete Widerstände, so können wir den Ersatzwiderstand wie folgt berechnen:

$$R_{2,3} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \quad \Omega$$

Den Ersatzwiderstand kennzeichnen wir mit den Indizes der zusammengefaßten Widerstände.

Da der Ersatzwiderstand $R_{2,3}$ mit dem Widerstand R_1 in Reihe geschaltet ist, ergibt sich der Gesamtwiderstand nach folgender Gleichung:

$$R = R_1 + R_{2,3}$$

1. Beispiel:

Die Widerstände $R_1 = 150 \Omega$, $R_2 = 70 \Omega$ und $R_3 = 200 \Omega$ sind, wie in der Abb. 2.20 dargestellt, geschaltet.

Gegeben: $R_1 = 150 \Omega$; $R_2 = 70 \Omega$;
 $R_3 = 200 \Omega$

Gesucht: R



Abb. 2.20 – Schaltbild

Lösung: Wir errechnen zuerst den Ersatzwiderstand $R_{2,3}$:

$$R_{2,3} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{70 \cdot 200}{70 + 200} = \frac{14000}{270} = 51,85 \Omega$$

Der Ersatzwiderstand ist mit dem Widerstand R_1 in Reihe geschaltet; so ist also der Gesamtwiderstand der Anordnung

$$R = R_1 + R_{2,3} = 150 + 51,85 = \underline{\underline{201,85 \Omega}}$$

2. Beispiel:

Der Gesamtwiderstand nebenstehender Schaltung ist zu berechnen.

Gegeben: $R_1 = 5 \Omega$; $R_2 = 16 \Omega$;
 $R_3 = 8 \Omega$; $R_4 = 12 \Omega$

Gesucht: R

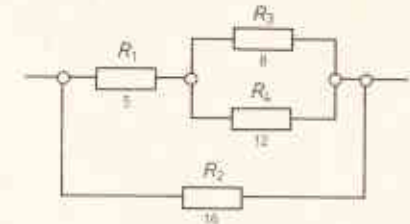
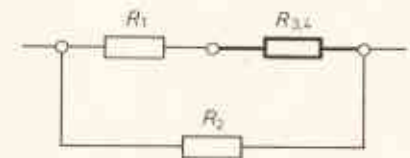


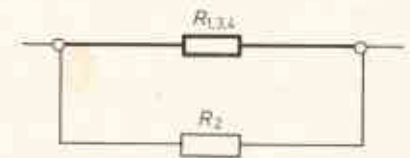
Abb. 2.21 – Schaltbild

Lösung: Für die Berechnung werden die Widerstände wie folgt zusammengefaßt:

$R_{3,4}$ (für R_3 und R_4)



$R_{1,3,4}$ (für R_1 und $R_{3,4}$)



R (für R_2 und $R_{1,3,4}$)



Abb. 2.22 – Ersatzschaltbilder

$$R_{3,4} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} = \frac{8 \cdot 12}{8 + 12} = \underline{4,8 \Omega}$$

$$R_{1,3,4} = R_1 + R_{3,4} = 5 + 4,8 = \underline{9,8 \Omega}$$

$$R = \frac{R_2 \cdot R_{1,3,4}}{R_2 + R_{1,3,4}} = \frac{16 \cdot 9,8}{16 + 9,8} = \underline{\underline{6,08 \Omega}}$$

Der Gesamtwiderstand beträgt 6,08 Ω .

3. Beispiel:

Zu einem Relais mit zwei hintereinandergeschalteten Wicklungen von $R_2 = 600 \Omega$ und $R_3 = 800 \Omega$ liegt ein Widerstand von $R_4 = 1200 \Omega$ parallel. Vor dieser Anordnung liegt ein Widerstand von $R_1 = 180 \Omega$, und hinter die Anordnung ist ein Widerstand von $R_5 = 60 \Omega$ geschaltet (Abb. 2.23). Wie groß ist der Gesamtwiderstand?

Gegeben: $R_1 = 180 \Omega$
 $R_2 = 600 \Omega$
 $R_3 = 800 \Omega$
 $R_4 = 1200 \Omega$
 $R_5 = 60 \Omega$

Gesucht: R

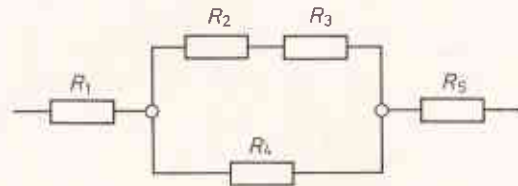


Abb. 2.23 – Schaltbild

Lösung: Wir errechnen zunächst wieder den Ersatzwiderstand $R_{2,3,4}$ für die Parallelschaltung. Dabei ist jedoch zu beachten, daß R_2 und R_3 hintereinandergeschaltet sind. Diese beiden Widerstände müssen also erst zusammengezählt werden, bevor wir mit der Berechnung von $R_{2,3,4}$ beginnen können.

$$R_2 + R_3 = 600 + 800 = \underline{1400 \Omega}$$

$$R_{2,3,4} = \frac{1400 \cdot 1200}{1400 + 1200} = \frac{1680000}{2600} = \underline{646,15 \Omega}$$

Jetzt haben wir es nur noch mit einer glatten Hintereinanderschaltung von R_1 , $R_{2,3,4}$ und R_5 zu tun. Der gesamte Widerstand der Anordnung nach Abb. 2.23 ist also

$$R = R_1 + R_{2,3,4} + R_5 = 180 + 646,15 + 60 = \underline{\underline{886,15 \Omega}}$$

2.4. Die elektrische Spannung

2.4.1. Klemmenspannung und Spannungsabfall

Die Ursache für den elektrischen Strom ist die elektrische Spannung. Infolge der im Stromkreis vorhandenen Widerstände verbraucht sich diese (die freien Elektronen treibende) Spannung auf dem Weg von einem Pol

der Spannungsquelle bis zum anderen Pol. Dabei fällt die an den Klemmen der Spannungsquelle gemessene Spannung, die **Klemmenspannung**, um den Betrag der jeweils verbrauchten Spannung ab. Man nennt daher die verbrauchte Spannung auch **Spannungsabfall**.

Soll der von einem Widerstand verursachte Spannungsabfall gemessen werden, so wird ein Spannungsmesser an zwei Stellen angeschlossen, zwischen denen der Spannungsunterschied (= Spannungsabfall) festgestellt

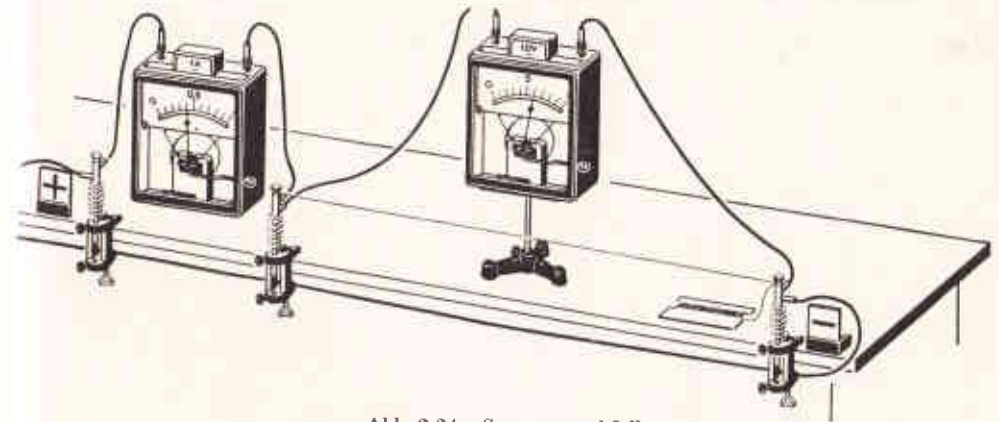


Abb. 2.24 – Spannungsabfall

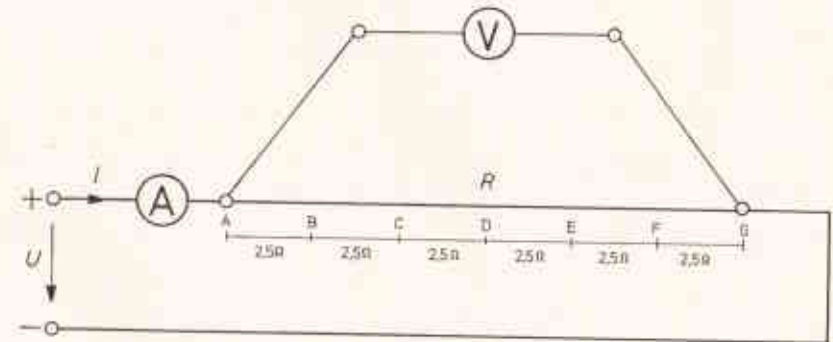


Abb. 2.25 – Schaltbild

werden soll. Durch den Spannungsmesser fließt dabei nur ein ganz geringer Strom, weil dieses Instrument einen sehr hohen inneren Widerstand hat.

Der in Abb. 2.24 dargestellte Versuch soll uns zeigen, wie die von der Spannungsquelle gelieferte Spannung von den Widerständen im Stromkreis verbraucht wird.

Die Versuchsspannung beträgt 6 V. Der verwendete Widerstandsdraht hat einen Widerstand von $15\ \Omega$. Auf der Tischplatte teilen wir die Strecke des Widerstandsdrahtes in 6 gleiche Teile zu je $2,5\ \Omega$ ein.

Nach Einschalten der Spannungsquelle haben wir einen geschlossenen Stromkreis, in dem ein Strom von

$$I = \frac{U}{R} = \frac{6}{15} = 0,4\ \text{A}$$

fließt (vgl. hierzu Abb. 2.25). Jetzt stecken wir in die linke Anschlußklemme des Voltmeters eine Schnur, an deren anderem Ende eine Krokodilklemme befestigt ist;

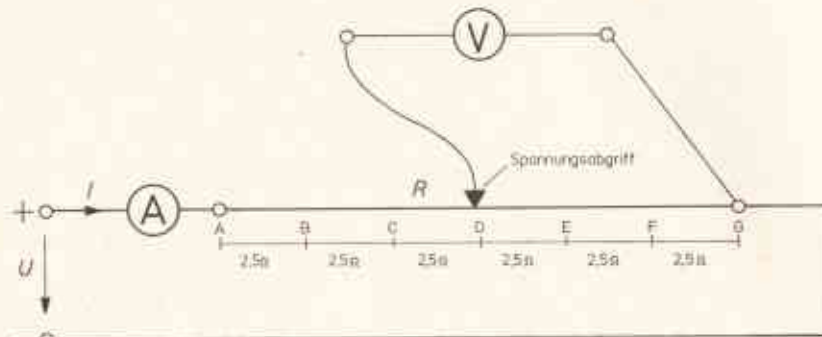


Abb. 2.26 – Schaltbild

die andere Klemme des Voltmeters bleibt fest mit dem Minuspol verbunden. Mit Hilfe der Krokodilklemme schalten wir den Spannungsmesser nacheinander an die auf der Tischplatte markierten Punkte A bis G des Widerstandsdrahtes an (vgl. hierzu Abb. 2.26). Dabei sehen wir, daß die Spannung bei gleichbleibender Stromstärke von 6 Volt bis 0 Volt abfällt. Die Differenz zwischen 6 Volt und der gemessenen Spannung wird von den links von der Krokodilklemme liegenden Teilwiderständen verbraucht.

In der folgenden Tabelle sind die während des Versuchs ermittelten Werte zusammengestellt:

Gemessener Abschnitt	Widerstand des gemessenen Abschnitts	Spannung über dem gemessenen Abschnitt	Verbrauchte Spannung
A – G	$15,0\ \Omega$	6 V	0 V
B – G	$12,5\ \Omega$	5 V	1 V
C – G	$10,0\ \Omega$	4 V	2 V
D – G	$7,5\ \Omega$	3 V	3 V
E – G	$5,0\ \Omega$	2 V	4 V
F – G	$2,5\ \Omega$	1 V	5 V
G – G	$0\ \Omega$	0 V	6 V

Wir ermitteln nun in einem Diagramm die Schnittpunkte für die jeweils zusammengehörenden Spannungs- und Widerstandswerte. Wenn wir dann die auf diese Weise gefundenen Punkte A bis G miteinander verbinden, erhalten wir die Konnlinie für die zur Überwindung des Drahtwiderstands erforderliche Spannung (vgl. hierzu Abb. 2.27).

Aus der Tabelle sehen wir, daß der Spannungsabfall in dem Drahtwiderstand gleichmäßig ansteigt. Dabei entspricht der Spannungsabfall dem Teil der treibenden Spannung, der zur Überwindung des Widerstands notwendig ist; in unserem Versuch ist z. B. zur Überwindung des Widerstands $10\ \Omega$ eine Spannung von 4 V erforderlich. Untersuchen wir die Spannungsabfälle zwischen den einzelnen Widerstandspunkten A bis G, so erkennen wir ferner, daß zwischen den einzelnen Punkten jeweils ein Spannungsabfall von 1 V besteht. Die Summe der Spannungsabfälle über den 6 Teilwiderständen ergibt wieder die von der Spannungsquelle gelieferte Spannung ($6 \times 1\ \text{Volt} = 6\ \text{Volt}$). Die Summe aller Spannungsabfälle entspricht somit der gesamten treibenden Spannung (vgl. hierzu Abschn. 2.3.6.1).

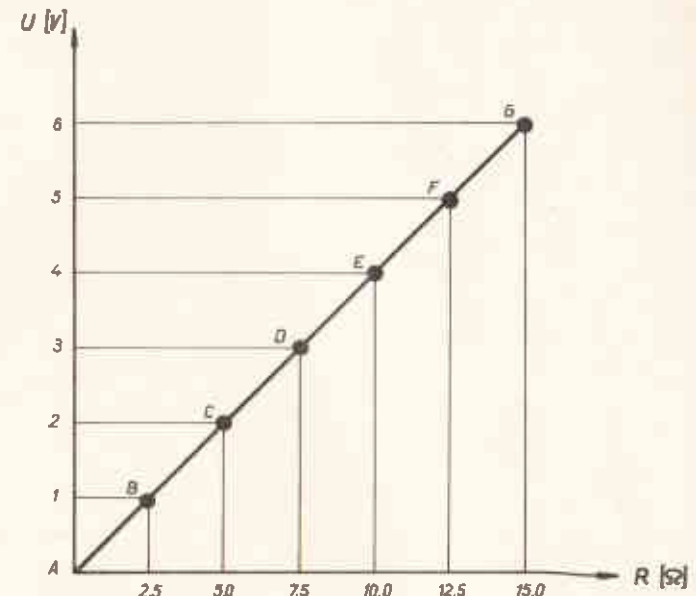


Abb. 2.27 – Widerstands-Spannungs-Diagramm

Sämtliche Spannungsabfälle lassen sich nach dem Ohmschen Gesetz berechnen, d. h. $U_1 = I_1 \cdot R_1$ oder $U_2 = I_2 \cdot R_2$ usw. Somit wird der Spannungsabfall um so größer, je größer der Widerstand und je größer der diesen Widerstand durchfließende Strom ist.

Bei den Spannungsabfällen unterscheidet man Nutzsparnungen und Spannungsverluste.

Nutzsparnungen sind Spannungsabfälle in Nutzwiderständen wie z. B. Heizgeräten, Glühlampen und anderen „Verbrauchern“. Durch die Nutzsparnungen hat man also einen Nutzen.

Spannungsverluste sind unerwünschte Spannungsabfälle in Verlustwiderständen. Zu den Verlustwiderständen gehören vor allem die Leitungswiderstände und die Innenwiderstände der Spannungsquellen.

Der durch die Leitungswiderstände ($R_{Ltg.}$) verursachte Spannungsverlust verringert die am Nutz Widerstand wirksame Spannung. Da mit zunehmender Leitungslänge der Widerstand der Leitung wächst, nimmt der Spannungsverlust mit der Länge der Leitung zu ($U_{Ltg.} = I \cdot R_{Ltg.}$). Der Einfluß des Innenwiderstands der Spannungsquellen (R_i) ist im Abschn. 2.4.3. beschrieben.

2.4.2. Spannungsteilerschaltung

Die Spannungsteilerschaltung ist eine Gruppenschaltung. Der Versuch zum „Spannungsabfall“ (vgl. hierzu Abb. 2.24 bis 2.27) hat uns gezeigt, daß sich die von der Spannungsquelle gelieferte Spannung aufteilt in Teilspannungen, die jeweils über den entsprechenden Teilwiderständen abgegriffen werden können. Der in Abb. 2.28 dargestellte Versuch zeigt nun, daß man mit einem Schiebewiderstand (Regelwiderstand, Potentiometer)

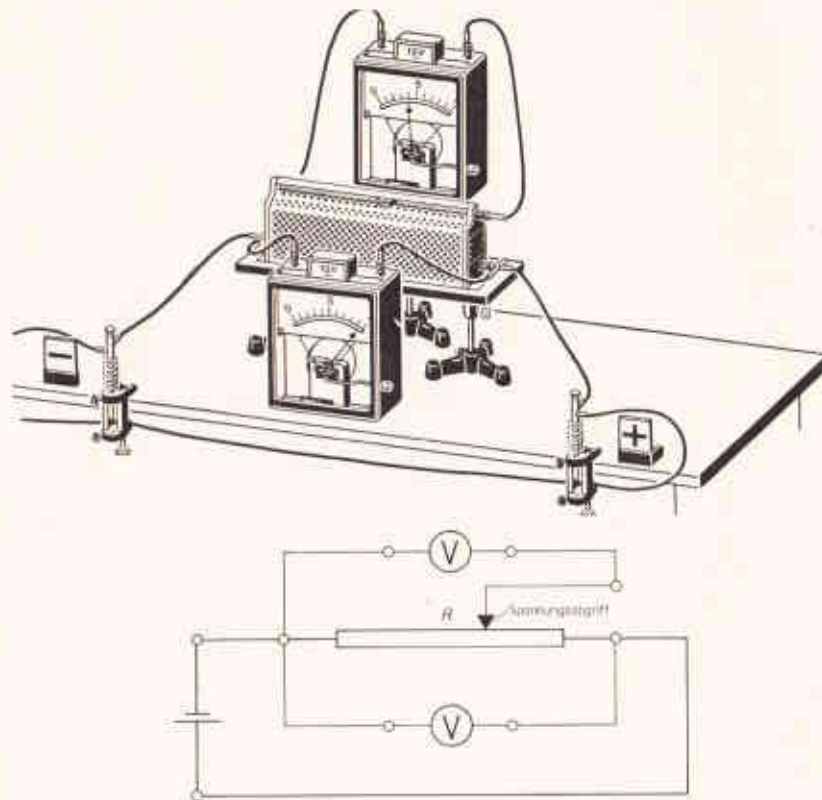


Abb. 2.28 - Spannungsteiler

eine Spannung in jeder gewünschten Weise unterteilen kann. Wird der Spannungsabgriff (Schieber) auf dem Widerstand langsam von links nach rechts geschoben, so steigt die vom oberen Voltmeter angezeigte Spannung von 0 V bis 10 V stetig an, während das untere Voltmeter konstant 10 V anzeigt. Mit einer solchen Spannungsteilerschaltung kann somit die Spannung für einen im oberen Stromkreis liegenden Verbraucher reguliert werden.

Wenn wir die Spannung über den jeweiligen Teilen des Schiebewiderstands errechnen wollen, können wir uns auch hier des Ohmschen Gesetzes bedienen (Teilspannung = Teilwiderstand $\times$ Stromstärke). Teilstücke eines Schiebewiderstands kann man auch als Einzelwiderstände betrachten.

Bei der Spannungsteilerschaltung ist darauf zu achten, daß der in einem Teil des Schiebewiderstands fließende Gesamtstrom die für den Widerstand angegebene Belastungsstromstärke nicht überschreitet.

1. Beispiel:

Drei Einzelwiderstände sind nach Abb. 2.29 in einen geschlossenen Stromkreis geschaltet, an dem eine Spannung von 12 V liegt. Wie hoch sind die Spannungen über den einzelnen Widerständen, und wie hoch ist die Spannung über dem Gesamtwiderstand?

Gegeben: $R_1 = 10 \Omega$; $R_2 = 6 \Omega$;

$R_3 = 20 \Omega$; $U = 12 \text{ V}$

Gesucht: U_1 ; U_2 ; U_3 und U

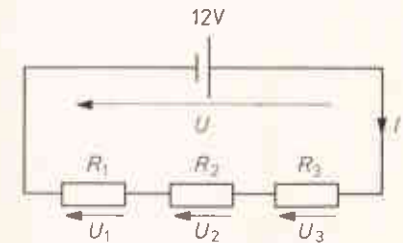


Abb. 2.29 - Schaltbild

Lösung: Als erstes müssen wir den Strom berechnen, der im Stromkreis fließt. Wir bedienen uns des Ohmschen Gesetzes, wobei berücksichtigt werden muß, daß für U die Klemmenspannung und für R der Gesamtwiderstand der Anordnung einzusetzen sind:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{10 + 6 + 20} = \frac{12}{36} = 0,33 \text{ A}$$

Nach dem Ohmschen Gesetz können wir nun die Spannungsabfälle über den Einzelwiderständen errechnen:

$$U_1 = I \cdot R_1 = 0,33 \cdot 10 = 3,3 \text{ V}$$

$$U_2 = I \cdot R_2 = 0,33 \cdot 6 = 1,98 \text{ V}$$

$$U_3 = I \cdot R_3 = 0,33 \cdot 20 = 6,6 \text{ V}$$

Die Summe der Teilspannungen beträgt:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 3,3 + 1,98 + 6,6 = \underline{\underline{11,88 \text{ V}}}$$

unter Berücksichtigung der in der Rechnung vorgenommenen Abrundungen kann man sagen $U = 12 \text{ V}$. Die über der gesamten Widerstandsanordnung herrschende Spannung ist also gleich der Klemmenspannung.

2. Beispiel:

In der Widerstandsanordnung nach Abb. 2.30 sollen die Spannungsabfälle zwischen den Punkten A und B sowie zwischen B und C ermittelt werden.

Gegeben: $U = 60 \text{ V}$
 $R_1 = 36 \Omega$
 $R_2 = 40 \Omega$
 $R_3 = 60 \Omega$

Gesucht: $U_1; U_2$

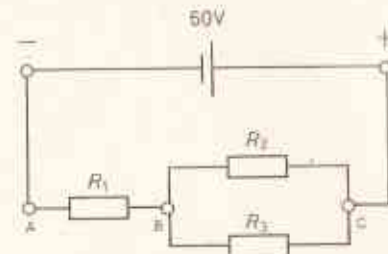


Abb. 2.30 – Schaltbild

Lösung: Zunächst müssen wir für die parallelgeschalteten Widerstände R_2 und R_3 einen Ersatzwiderstand $R_{2,3}$ errechnen.

$$R_{2,3} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{40 \cdot 60}{40 + 60} = \frac{2400}{100} = \underline{\underline{24 \Omega}}$$

Jetzt können wir den Gesamtwiderstand der Anordnung berechnen:

$$R = R_1 + R_{2,3} = 36 + 24 = \underline{\underline{60 \Omega}}$$

2.4.3. Schaltung von Spannungserzeugern

Soll ein Verbraucherwiderstand mit Strom versorgt werden, dann benötigen wir hierzu einen Spannungserzeuger. Der Spannungserzeuger hat die Aufgabe, den erforderlichen Strom durch den im Stromkreis liegenden Verbraucherwiderstand zu treiben. Hierbei müssen die elektrischen Werte des Verbraucherwiderstands mit denen des Spannungserzeugers genau übereinstimmen. Man sagt, Verbraucherwiderstand und Spannungserzeuger müssen einander angepaßt sein.

Beispiel:

Eine 24-V-Glühlampe kann nur dann mit der richtigen Helligkeit leuchten, wenn sie an 24 V geschaltet wird. Ist der Spannungswert geringer, dann leuchtet die Lampe zu dunkel; ist der Spannungswert größer als 24 V, dann brennt der Glühfaden der Lampe durch.

Um für die verschiedenen Verbraucherwiderstände die richtigen Spannungs- und Stromwerte zu erhalten, müssen je nach Bedarf die einzelnen Spannungserzeuger zusammengeschaltet werden. Die Zusammenschaltung von mehreren Spannungserzeugern (Elementen) bezeichnet man als Batterie. Für das Zusammenschalten von Spannungserzeugern gelten dieselben Gesetze wie bei den Widerstandsschaltungen.

2.4.3.1. Belasteter Spannungserzeuger

Wird ein Spannungserzeuger mit einem Verbraucherwiderstand belastet, dann fließt durch den Widerstand ein elektrischer Strom. Die Ursache für den Stromfluß ist eine elektrische Spannung, die sich im Innern der Spannungsquelle¹⁾ befindet. Diese Spannung nennt man **Quellenspannung** U_q oder **Urspannung** U_o .

Anstelle der Urspannung wird auch die elektromotorische Kraft (EMK) als die den Stromfluß verursachende Spannung angegeben. Die elektromotorische Kraft hat stets denselben Betrag wie die Urspannung, jedoch die umgekehrte Richtung (DIN 1324).

Ist eine Spannungsquelle unbelastet, dann fließt kein Strom durch den Stromkreis. An den Klemmen der Spannungsquelle liegt in unbelastetem Zustand die **Urspannung** U_o , man sagt, die **Klemmenspannung** ist gleich der Urspannung und nennt dann diese Spannung die **Leerlaufspannung**. Wird die Spannungsquelle mit einem Verbraucherwiderstand belastet, dann fließt ein Strom durch den Stromkreis. Hierdurch verringert sich die an den Klemmen der Spannungsquelle liegende Spannung, weil ein Teil der Urspannung im Innern der Spannungsquelle bereits verbraucht worden ist. Jeder Spannungserzeuger besteht daher aus einer Urspannungsquelle, die den Stromfluß verursacht, und einem inneren Widerstand, an dem bei Belastung ein Teil der Urspannung verbraucht wird. Werden die Strom- und Spannungswerte einer Spannungsquelle bei verschiedenen Belastungen untersucht, dann ist festzustellen, daß die verfügbare Klemmenspannung der Spannungsquelle bei geringer Belastung größer ist als bei stärkerer Belastung. Man stellt sich daher den Aufbau eines Spannungserzeugers so vor, als ob die widerstandslose Spannungsquelle für die Urspannung U_o mit einem inneren Widerstand R_i hintereinandergeschaltet ist. Diese Darstellung ist eine Ersatzschaltung des Spannungserzeugers, das Schaltzeichen für die Spannungsquelle.

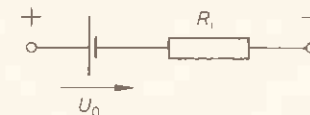


Abb. 2.31 – Chemische Spannungsquelle

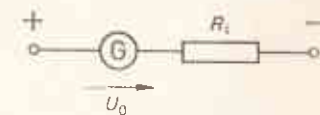


Abb. 2.32 – Generator

¹⁾ Spannungserzeuger werden in den VDE-Bestimmungen Spannungsquellen oder Stromquellen genannt.

Die Richtung des Spannungspfeils für die Ursprungspannung U_0 wird so festgelegt, daß die Pfeilspitze zum negativen Pol der Spannungsquelle zeigt (DIN 5489).

Bei einer belasteten Spannungsquelle setzt sich der Gesamtwiderstand des Stromkreises aus einer Reihenschaltung des Außenwiderstands R_a (Verbraucherwiderstand) und des inneren Widerstands R_i der Spannungsquelle zusammen. Die an den Klemmen der Spannungsquelle wirkende Spannung ist um den Spannungsverlust U_i am Innenwiderstand geringer als die Leerlaufspannung U_0 .

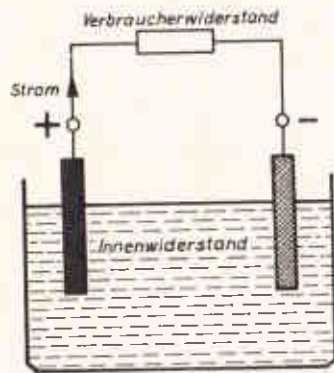


Abb. 2.33 – Elektrochemischer Spannungserzeuger

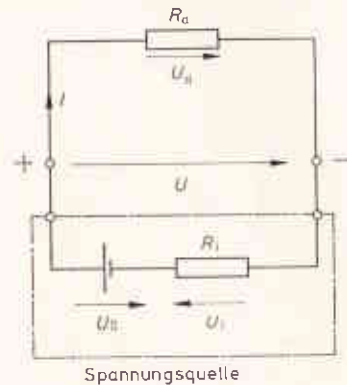


Abb. 2.34 – Ersatzschaltbild eines Spannungserzeugers

Die Spannung einer Spannungsquelle, die an dem Verbraucherwiderstand liegt, nennt man Klemmenspannung U^1 . Sie wird nach folgender Größen-gleichung berechnet:

$U = U_0 - U_i$	V
$U_i = I \cdot R_i$	V
$U = U_0 - I \cdot R_i$	V

In diesen Formeln bedeuten:

U = Klemmenspannung in V
 U_0 = Leerlaufspannung in V
 U_i = innerer Spannungsverlust in V
 I = Stromstärke in A
 R_i = innerer Widerstand in Ω

Die Leerlaufspannung treibt den Strom durch den gesamten Stromkreis. Sie ergibt sich aus der Summe der inneren und äußeren Spannungsabfälle.

¹⁾ Als Formelzeichen für die Klemmenspannung sind U und U_{KI} gebräuchlich.

Die Klemmenspannung treibt den Strom durch den äußeren Stromkreis. Sie ergibt sich aus der Differenz aus der Leerlaufspannung und dem inneren Spannungsverlust.

Bei unbelasteter Spannungsquelle fließt kein Strom, so daß im Innern der Spannungsquelle kein Spannungsverlust entsteht. Bei Leerlauf eines Spannungserzeugers ist daher die Leerlaufspannung gleich der Klemmenspannung.

Bei Kurzschluß einer Spannungsquelle sind die Anschlußklemmen widerstandslos verbunden, so daß an den Klemmen der Spannungsquelle keine Spannung liegt. Die gesamte Leerlaufspannung der Spannungsquelle wird bei Kurzschluß am inneren Widerstand wirksam. Da bei den meisten Spannungsquellen der innere Widerstand sehr klein ist, fließt bei Kurzschluß meistens auch ein starker Kurzschlußstrom.

Beispiel:

Der innere Widerstand einer Batterie für eine Nebensstellenanlage beträgt $R_i = 24 \text{ m}\Omega$. Die Leerlaufspannung wird auf $U_0 = 24 \text{ V}$ geschätzt. Wie stark ist der Kurzschlußstrom der Batterie?

Gegeben: $U_0 = 24 \text{ V}$; $R_i = 24 \text{ m}\Omega$

Gesucht: I_k

$$\text{Lösung: } I_k = \frac{U_0}{R_i} = \frac{24 \text{ V}}{24 \text{ m}\Omega} = \frac{24 \text{ V} \cdot 10^3}{24 \Omega} = 1000 \text{ A} = \underline{\underline{1 \text{ kA}}}$$

Der Kurzschlußstrom der Batterie würde $I_k = 1 \text{ kA}$ betragen.

2.4.3.2. Anpassung

Jeder Spannungserzeuger gibt an den Verbraucherwiderstand elektrische Leistung ab (vgl. hierzu auch Abschn. 2.5). Je nach ihrem Verwendungszweck müssen die Spannungserzeuger dem jeweiligen Verbraucherwiderstand angepaßt werden. Unter Anpassung der Spannungsquelle versteht man nicht nur die Anpassung der Spannungs-, Strom- und Leistungswerte an den Verbraucherwiderstand, sondern auch die Anpassung des inneren Widerstands der Spannungsquelle an den Verbraucherwiderstand.

Bei den **Stromversorgungsanlagen** ist der innere Widerstand der Spannungsquelle im Verhältnis zum Verbraucherwiderstand stets sehr klein. Deshalb ist auch die Klemmenspannung für alle Verbraucherwiderstände nahezu belastungsunabhängig. Man nennt die Widerstandsanpassung $R_a \gg R_i$ daher auch **Spannungsanpassung**.

Beispiel:

Von einer Stromversorgungsanlage für 60 V beträgt der innere Widerstand $R_i = 10 \text{ m}\Omega$. Der Verbraucherwiderstand beträgt $R_a = 10 \Omega$. Wie groß ist die Klemmenspannung?

Gegeben: $U_0 = 60 \text{ V}$; $R_i = 10 \text{ m}\Omega$; $R_a = 10 \Omega$

Gesucht: U

Lösung: $R = R_i + R_a = 10 \Omega + 0,01 \Omega = \underline{10,01 \Omega}$

$$I = \frac{U_0}{R} = \frac{60 \text{ V}}{10,01 \Omega} = \underline{6,0 \text{ A}}$$

$$U = U_0 - I \cdot R_i = 60 \text{ V} - 6,0 \text{ A} \cdot 0,01 \Omega = 60 \text{ V} - 0,06 \text{ V}$$

$$U = \underline{59,94 \text{ V}}$$

Bei einem Widerstandsverhältnis von $R_a : R_i = 10 : 0,01 = 1000 : 1$ beträgt die Klemmenspannung nahezu 60 V.

In der **Rundfunk- und Fernsehtechnik** sowie in der **Elektronik** haben die verwendeten **Spannungserzeuger meistens einen großen inneren Widerstand**. Ferner sollen diese **Spannungsquellen eine möglichst große elektrische Leistung an den Verbraucherwiderstand abgeben**. Für diese Zwecke muß das **Verhältnis des Verbraucherwiderstands zum inneren Widerstand des Spannungserzeugers so gewählt werden, daß beide Widerstände gleich groß sind**. Man nennt die Widerstandsanpassung $R_a = R_i$ daher auch **Leistungsanpassung**.

Beispiel:

Von einer Trockenbatterie für $U_0 = 9 \text{ V}$ beträgt der innere Widerstand $R_i = 1,8 \Omega$. Der Verbraucherwiderstand beträgt $R_a = 1,8 \Omega$. Wie groß ist die abgegebene elektrische Leistung?

Gegeben: $U_0 = 9,0 \text{ V}$; $R_i = 1,8 \Omega$; $R_a = 1,8 \Omega$

Gesucht: P

Lösung: $R = R_i + R_a = 1,8 \Omega + 1,8 \Omega = \underline{3,6 \Omega}$

$$I = \frac{U_0}{R} = \frac{9,0 \text{ V}}{3,6 \Omega} = \underline{2,5 \text{ A}}$$

$$P = I^2 \cdot R_a = 2,5^2 \cdot 1,8 = 6,25 \cdot 1,8 = \underline{11,2 \text{ W}}$$

Bei einem Widerstandsverhältnis von $R_a : R_i = 1,8 : 1,8 = 1 : 1$ beträgt die abgegebene Leistung $P = 11,2 \text{ W}$.

In der **Fernsprechtechnik** müssen sämtliche Fernsprechapparate mit einem ausreichenden Mikrofonspeisestrom versorgt werden, der etwa zwischen 30 mA und 60 mA betragen soll. Obwohl die Widerstandswerte der verschieden langen Anschlußleitungen sehr unterschiedlich sind, müssen diese Stromwerte bei allen Fernsprechanschlüssen eingehalten werden. Zu diesem Zweck werden die inneren Widerstände der Stromversorgungsanlagen in den Vermittlungsstellen durch Vorwiderstände derart vergrößert, daß der **innere Widerstand des Spannungserzeugers sehr groß im Verhältnis zum Verbraucherwiderstand ist**. Damit erhält man bei unterschiedlichen Verbraucherwiderständen einen nahezu gleich starken Verbraucherstrom. Man nennt die Widerstandsanpassung bei $R_a \ll R_i$ daher auch **Stromanpassung**.

Beispiel:

Von einer Stromversorgungsanlage für 60 V beträgt der vergrößerte Innenwiderstand $R_i = 1000 \Omega$. Der Verbraucherwiderstand setzt sich aus dem Leitungs- und Apparatwiderstand zusammen, er beträgt $R_a = 500 \Omega$. Wie stark ist der Strom in der Anschlußleitung?

Gegeben: $U_0 = 60 \text{ V}$; $R_i = 1000 \Omega$; $R_a = 500 \Omega$

Gesucht: I

Lösung: $R = R_i + R_a = 1000 \Omega + 500 \Omega = \underline{1500 \Omega}$

$$I = \frac{U_0}{R} = \frac{60 \text{ V}}{1500 \Omega} = \frac{60000 \text{ mV}}{1500 \Omega} = \underline{40 \text{ mA}}$$

Bei einem Widerstandsverhältnis von $R_a : R_i = 500 : 1000 = 1 : 2$ beträgt der Strom in der Fernsprechananschlußleitung $I = 40 \text{ mA}$.

Bei der Spannungsanpassung ist der innere Widerstand im Verhältnis zum äußeren Widerstand sehr klein; die Klemmenspannung ist nahezu belastungsunabhängig.

Bei der Leistungsanpassung sind innerer und äußerer Widerstand gleich groß; es wird der Höchstwert der elektrischen Leistung an den Verbraucherwiderstand abgegeben.

Bei der Stromanpassung ist der innere Widerstand im Verhältnis zum äußeren Widerstand sehr groß; die Stromstärken für die einzelnen Verbraucherwiderstände sind nahezu widerstandsunabhängig.

2.4.3.3. Hintereinanderschaltung

Um eine höhere Spannung zu erreichen, muß man die Spannungsquellen hintereinanderschalten. Bei der Hintereinanderschaltung von Spannungserzeugern (z. B. von galvanischen Elementen) wird der Pluspol des ersten mit dem Minuspol des zweiten, der Pluspol des zweiten mit dem Minuspol des dritten Elements usw. verbunden (vgl. hierzu Abb. 2.35).

Für die Hintereinanderschaltung von Spannungserzeugern gilt:

- die GesamtLeerlaufspannung ist gleich der Summe aller Einzel-leerlaufspannungen,
- der Gesamtinnenwiderstand ist gleich der Summe aller Einzel-innenwiderstände,
- der Gesamtstrom ist gleich der Einzelstromstärke und
- die Gesamtkapazität von chemischen Elementen ist gleich der Einzelkapazität.

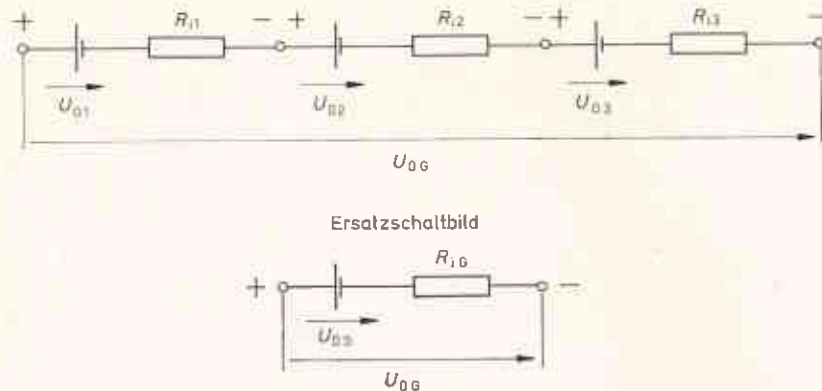


Abb. 2.35 – Hintereinanderschaltung von Spannungserzeugern

$U_{0G} = U_{01} + U_{02} + U_{03}$	V	In diesen Formeln bedeuten:
$I_G = I_1 = I_2 = I_3$	A	U_o = Leerlaufspannung in V
$K_G = K_1 = K_2 = K_3$	Ah	I = Stromstärke in A
		K = Kapazität in Ah für galvanische Elemente
$R_{iG} = R_{i1} + R_{i2} + R_{i3}$	Ω	R_i = innerer Widerstand in Ω

Haben sämtliche Spannungserzeuger die gleiche Leerlaufspannung, so ergibt sich

$$U_{0G} = n \cdot U_o \quad \text{V}$$

wobei n die Anzahl der hintereinandergeschalteten Elemente angibt und U_o die Einzelleerlaufspannung bedeutet.

Da die Innenwiderstände der hintereinandergeschalteten Elemente gleich groß sind, ergibt sich

$$R_{iG} = n \cdot R_i \quad \Omega$$

Passen wir die allgemeine Formel zur Berechnung der **Stromstärke**

$$I = \frac{U_o}{R_a + R_i}$$

dieser **Hintereinanderschaltung** an, so kann man auch schreiben

$$I = \frac{n \cdot U_o}{R_a + n \cdot R_i} \quad \text{A}$$

1. Beispiel:

Vier galvanische Elemente werden in Reihenschaltung zu einer Batterie zusammengeschaltet. Der innere Widerstand der einzelnen Elemente beträgt $0,5 \Omega$. Jedes Element hat eine Leerlaufspannung von $1,5 \text{ V}$. Wie groß ist die Leerlaufspannung der Batterie, und wie groß ist ihr innerer Widerstand? Welche Stromstärke ergibt sich, wenn der Außenwiderstand 58Ω beträgt?

Gegeben: $U_o = 1,5 \text{ V}$; $n = 4$; $R_i = 0,5 \Omega$; $R_a = 58 \Omega$

Gesucht: U_{0G} ; R_{iG} ; I

Lösung: $U_{0G} = n \cdot U_o = 4 \cdot 1,5 = \underline{\underline{6 \text{ V}}}$

$$R_{iG} = n \cdot R_i = 4 \cdot 0,5 = \underline{\underline{2,0 \Omega}}$$

$$I = \frac{U_{0G}}{R_a + R_{iG}} = \frac{6}{58 + 2,0} = \underline{\underline{0,1 \text{ A}}}$$

Die Batterie hat eine U_{0G} von 6 V und einen Innenwiderstand von $2,0 \Omega$. Die Stromstärke beträgt $0,1 \text{ A}$.

2. Beispiel:

Eine Anodenbatterie soll eine GesamtLeerlaufspannung von 90 Volt aufweisen. Die Leerlaufspannung eines Elements beträgt $1,5 \text{ Volt}$, der innere Widerstand $0,2 \Omega$. Der angeschaltete Außenwiderstand ist 200Ω . Wieviel Elemente sind in Reihe zu schalten, welcher Strom fließt durch den Außenwiderstand, wie groß ist der innere Spannungsverlust in der Batterie, und wie hoch ist dabei die Klemmenspannung?

Gegeben: $U_o = 1,5 \text{ V}$; $U_{0G} = 90 \text{ V}$; $R_i = 0,2 \Omega$; $R_a = 200 \Omega$

Gesucht: n ; I ; U_{iG} ; U

Lösung: $U_{0G} = n \cdot U_o$; $n = \frac{U_{0G}}{U_o} = \frac{90 \text{ V}}{1,5 \text{ V}} = \underline{\underline{60 \text{ Elemente}}}$

$$I = \frac{n \cdot U_o}{R_a + n \cdot R_i} = \frac{60 \cdot 1,5 \text{ V}}{200 \Omega + 60 \cdot 0,2 \Omega} = \frac{90 \text{ V}}{200 \Omega + 12 \Omega}$$

$$I = \frac{90 \text{ V}}{212 \Omega} = 0,4245 \text{ A, gerundet } \underline{\underline{0,425 \text{ A}}}$$

$$U_{iG} = I \cdot n \cdot R_i = 0,425 \text{ A} \cdot 60 \cdot 0,2 \Omega = \underline{\underline{5,1 \text{ V}}}$$

$$U = I \cdot R_a = 0,425 \text{ A} \cdot 200 \Omega = \underline{\underline{85 \text{ V}}} \text{ oder}$$

$$U = U_{0G} - U_{iG} = U_o - I \cdot n \cdot R_i = 90 \text{ V} - 0,425 \text{ A} \cdot 60 \cdot 0,2 \Omega$$

$$U = 90 \text{ V} - 5,1 \text{ V} = \underline{\underline{84,9 \text{ V, gerundet } 85 \text{ V}}}$$

Die Zahl der hintereinandergeschalteten Elemente ist 60 , der Strom beträgt $0,425 \text{ A}$, der innere Spannungsverlust ist $5,1 \text{ V}$ und die Klemmenspannung 85 V .

2.4.3.4. Parallelschaltung

Um einen stärkeren Strom zu erreichen, muß man die Spannungsquellen parallel schalten. Bei der **Parallelschaltung** von Spannungserzeugern (z. B. von galvanischen Elementen) werden die gleichnamigen Pole miteinander verbunden, also Minuspol mit Minuspol und Pluspol mit Pluspol (vgl. hierzu Abb. 2.36).

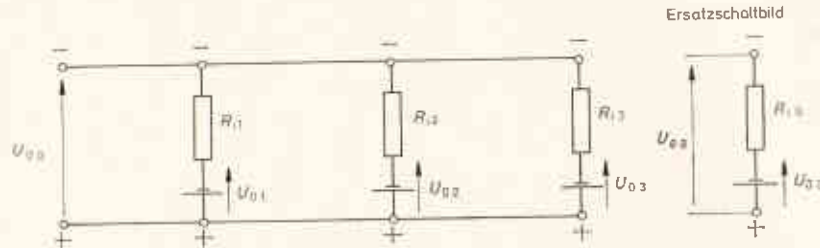


Abb. 2.36 – Parallelschaltung von Spannungserzeugern

Für die **Parallelschaltung** von Spannungserzeugern gilt:

- der Gesamtstrom ist gleich der Summe aller Einzelströme,
- die Gesamtkapazität von chemischen Elementen ist gleich der Summe aller Einzelkapazitäten,
- die Leerlaufspannung ist gleich der Einzelleerlaufspannung und
- der Gesamttinnenleitwert ist gleich der Summe aller Einzelinnenleitwerte.

$I_G = I_1 + I_2 + I_3$	A
$K_G = K_1 + K_2 + K_3$	Ah
$U_{0G} = U_{01} = U_{02} = U_{03}$	V
$G_i = G_{i1} + G_{i2} + G_{i3}$	S
$\frac{1}{R_{iG}} = \frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_{i2}} + \frac{1}{R_{i3}}$	$\frac{1}{\Omega}$

In diesen Formeln bedeuten:

I = Stromstärke in A
 K = Kapazität in Ah
für galvanische Elemente
 U_0 = Leerlaufspannung in V
 G_i = Innenleitwert in S
 $\frac{1}{R_i}$ = Innenleitwert in $1/\Omega$

Da alle Elemente den gleichen inneren Widerstand haben, so ergibt sich

$$R_{iG} = \frac{R_i}{p} \quad \Omega$$

Dabei ist p die Anzahl der parallelgeschalteten Spannungserzeuger.

Passen wir die allgemeine Formel für die Berechnung der **Stromstärke** dieser **Parallelschaltung** an, so ergibt sich

$$I = \frac{U_0}{R_a + \frac{R_i}{p}} \quad A$$

1. Beispiel:

Fünf galvanische Elemente werden parallelgeschaltet. Der innere Widerstand jedes Elements beträgt $0,5 \Omega$. Wie groß sind die GesamtLeerlaufspannung, der gesamte innere Widerstand und die Stromstärke bei einem Außenwiderstand von $1,15 \Omega$?

Gegeben: $U_0 = 1,5 \text{ V}$; $R_i = 0,5 \Omega$; $p = 5$; $R_a = 1,15 \Omega$

Gesucht: U_{0G} ; R_{iG} ; I

Lösung: $U_{0G} = U_0 = \underline{1,5 \text{ V}}$

$$R_{iG} = \frac{R_i}{p} = \frac{0,5}{5} = \underline{0,1 \Omega}$$

$$I = \frac{U_{0G}}{R_a + R_{iG}} = \frac{U_0}{R_a + \frac{R_i}{p}} = \frac{1,5}{1,15 + 0,1} = \underline{1,2 \text{ A}}$$

Die Batterie hat eine Leerlaufspannung von $1,5 \text{ V}$ und einen Innenwiderstand von $0,1 \Omega$. Sie gibt einen Strom von $1,2 \text{ A}$ ab.

2. Beispiel:

Vier galvanische Elemente mit einer Leerlaufspannung von je $1,5 \text{ Volt}$ und einem inneren Widerstand von je $0,4 \Omega$ sind parallelgeschaltet. Im Außenstromkreis liegt ein Widerstand von 10Ω . Wie groß sind der innere Spannungsverlust und die Klemmenspannung der Batterie?

Gegeben: $U_0 = 1,5 \text{ V}$; $R_i = 0,4 \Omega$; $R_a = 10 \Omega$; $p = 4$

Gesucht: U_{iG} ; U

Lösung: $U_{0G} = U_0 = 1,5 \text{ V}$, $R_{iG} = \frac{R_i}{p} = \frac{0,4 \Omega}{4} = \underline{0,1 \Omega}$

$$I = \frac{U_0}{R_a + R_{iG}} = \frac{1,5 \text{ V}}{10 \Omega + 0,1 \Omega} = \underline{0,1485 \text{ A}}$$

$$U_{iG} = I \cdot R_{iG} = 0,1485 \text{ A} \cdot 0,1 \Omega = 0,01485 \text{ V, gerundet} = \underline{0,0149 \text{ V}}$$

$$U = U_{0G} - U_{iG} = 1,5 \text{ V} - 0,0149 \text{ V} = 1,4851 \text{ V oder}$$

$$U = I \cdot R_a = 0,1485 \text{ A} \cdot 10 = \underline{1,485 \text{ V}}$$

Die Batterie hat einen inneren Spannungsverlust von $0,0149 \text{ V}$ und eine Klemmenspannung von $1,485 \text{ V}$.

2.4.3.5. Gruppenschaltung

Benötigen wir gleichzeitig eine hohe Leerlaufspannung und einen starken Strom, so wenden wir die **Gruppenschaltung** an (vgl. hierzu Abb. 2.37).

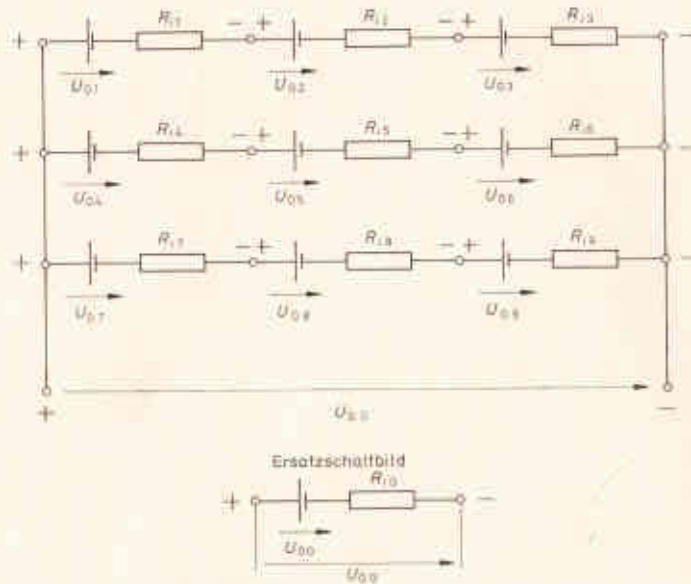


Abb. 2.37 – Gruppenschaltung von Elementen

Für die **Gruppenschaltung** von Spannungserzeugern gilt:

- die Leerlaufspannung ist gleich der Summe aller in Reihe liegenden Einzeleerlaufspannungen,
- der Gesamtstrom ist gleich der Summe aller Einzelströme,
- die Gesamtkapazität von galvanischen Elementen ist gleich der Summe aller parallelliegenden Einzelkapazitäten,
- der Gesamtinnenwiderstand wird nach den Rechenregeln für Widerstandsgruppenschaltungen ermittelt.

Da nur solche Spannungserzeuger zusammengeschaltet werden dürfen, die gleiche Spannungs-, Strom- und Widerstandswerte haben, gelten für die Berechnung von Gruppenschaltungen folgende Regeln:

Die GesamtLeerlaufspannung ist das Produkt aus der Anzahl der hintereinandergeschalteten Einzeleerlaufspannungen.

$$U_{0G} = n \cdot U_0 \quad \text{V}$$

Der innere Widerstand der in einer Reihe hintereinandergeschalteten Elemente beträgt

$$R_{1\text{Reihe}} = n \cdot R_1.$$

Nun liegen mehrere Reihen mit jeweils n hintereinandergeschalteten Elementen parallel. Bezeichnen wir die Anzahl der parallelgeschalteten Reihen mit p , so errechnet sich der gesamte Widerstand einer Batterie in Gruppenschaltung wie folgt:

$$R_{iG} = \frac{R_{1\text{Reihe}}}{p} = \frac{n \cdot R_1}{p} \quad \Omega$$

Für die **Stromstärke**, die von einer in **Gruppenschaltung** geschalteten Batterie abgegeben wird, ergibt sich aus

$$I = \frac{U_{0G}}{R_a + R_{iG}}$$

durch Einsetzen der Formeln für U_{0G} und R_{iG} die nachstehende Formel:

$$I = \frac{n \cdot U_0}{R_a + \frac{n \cdot R_1}{p}} \quad \text{A}$$

1. Beispiel:

Eine Batterie besteht aus 3 parallelgeschalteten Reihen, wobei in jeder Reihe 4 Elemente hintereinandergeschaltet sind. Jedes Element hat eine Leerlaufspannung von 1,5 V und einen inneren Widerstand von 0,3 Ω . a) Wie groß sind Leerlaufspannung und innerer Widerstand der Batterie sowie die Stromstärke bei einem Außenwiderstand von 11,6 Ω ? b) Welche Kapazität muß jedes Element aufweisen, wenn die Betriebsdauer mindestens 144 h betragen soll?

Gegeben: $U_0 = 1,5 \text{ V}$; $R_1 = 0,3 \Omega$; $R_a = 11,6 \Omega$; $n = 4$; $p = 3$

Gesucht: U_{0G} ; R_{iG} ; I ; K

Lösung: $U_{0G} = n \cdot U_0 = 4 \cdot 1,5 = \underline{\underline{6 \text{ V}}}$

$$R_{iG} = \frac{n \cdot R_1}{p} = \frac{4 \cdot 0,3}{3} = \underline{\underline{0,4 \Omega}}$$

$$I = \frac{n \cdot U_0}{R_a + \frac{n \cdot R_1}{p}} = \frac{U_{0G}}{R_a + R_{iG}} = \frac{6}{11,6 + 0,4} = \underline{\underline{0,5 \text{ A}}}$$

$$K_G = I \cdot t = 0,5 \text{ A} \cdot 144 \text{ h} = \underline{\underline{72 \text{ Ah}}}$$

$$K_G = p \cdot K$$

$$K = \frac{K_G}{p} = \frac{72 \text{ Ah}}{3} = \underline{\underline{24 \text{ Ah}}}$$

Die Batterie hat eine Leerlaufspannung von 6 V und einen inneren Widerstand von 0,4 Ω . Die Stromstärke beträgt 0,5 A; die Kapazität für jedes Element muß mindestens $K = 24$ Ah betragen.

2. Beispiel:

Zwei Batterien mit je 30 hintereinandergeschalteten Bleisammlerzellen werden zur Lieferung eines stärkeren Stroms parallelgeschaltet. Jede Zelle hat eine Leerlaufspannung von 2 Volt und einen inneren Widerstand von 0,002 Ω . Wie groß ist die Klemmenspannung der Gruppenschaltung bei einer Stromentnahme von 50 A, und wie groß ist der äußere Belastungswiderstand?

Gegeben: $U_0 = 2$ V; $R_1 = 0,002$ Ω ; $I = 50$ A; $n = 30$; $p = 2$

Gesucht: U ; R_a

Lösung: $U_{0G} = n \cdot U_0 = 30 \cdot 2$ V = 60 V

$$R_{iG} = \frac{n \cdot R_1}{p} = \frac{30 \cdot 0,002 \text{ } \Omega}{2} = \frac{0,06 \text{ } \Omega}{2} = \underline{0,03 \text{ } \Omega}$$

$$U_{iG} = I \cdot R_{iG} = 50 \text{ A} \cdot 0,03 \text{ } \Omega = \underline{1,5 \text{ V}}$$

$$U_{0G} = U + U_{iG}; \text{ daraus durch Umstellung: } U = U_{0G} - U_{iG}$$

$$U = 60 \text{ V} - 1,5 \text{ V} = \underline{58,5 \text{ V}}$$

$$U = I \cdot R_a; \text{ durch Umstellung erhält man:}$$

$$R_a = \frac{U}{I} = \frac{58,5 \text{ V}}{50 \text{ A}} = \underline{1,17 \text{ } \Omega}$$

Die Batterie hat eine Klemmenspannung von 58,5 V; der Belastungswiderstand beträgt 1,17 Ω .

3. Beispiel:

Vier Bleisammlerzellen, von denen jede eine Leerlaufspannung von 2 V und einen inneren Widerstand von 0,03 Ω hat, sollen so zu einer Batterie zusammengeschaltet werden, daß man ihr den größten Strom entnehmen kann. In welcher der drei möglichen Schaltungen ist dies der Fall, wenn der äußere Widerstand in jedem Fall 12 Ω beträgt?

Gegeben: $U_0 = 2$ V; $R_1 = 0,03$ Ω ; $n_1 = 4$; $p_1 = 1$; $n_2 = 1$; $p_2 = 4$; $n_3 = 2$; $p_3 = 2$

Gesucht: a) I_1 ; b) I_2 ; c) I_3

a) alle Zellen in Reihe

$$\text{Lösung: } I_1 = \frac{n_1 \cdot U_0}{R_a + \frac{n_1 \cdot R_1}{p_1}} = \frac{4 \cdot 2 \text{ V}}{12 \text{ } \Omega + \frac{4 \cdot 0,03 \text{ } \Omega}{1}}$$

$$I_1 = \frac{8 \text{ V}}{12 \text{ } \Omega + 0,12 \text{ } \Omega} = \frac{8 \text{ V}}{12,12 \text{ } \Omega} = \underline{0,666 \text{ A}}$$

b) alle Zellen parallelgeschaltet

$$I_2 = \frac{n_2 \cdot U_0}{R_a + \frac{n_2 \cdot R_1}{p_2}} = \frac{1 \cdot 2 \text{ V}}{12 \text{ } \Omega + \frac{1 \cdot 0,03 \text{ } \Omega}{4}}$$

$$I_2 = \frac{2 \text{ V}}{12 \text{ } \Omega + 0,0075 \text{ } \Omega} = \frac{2 \text{ V}}{12,0075 \text{ } \Omega} = \underline{0,167 \text{ A}}$$

c) 2 Zellen in Reihe, 2 Zellen parallelgeschaltet

$$I_3 = \frac{n_3 \cdot U_0}{R_a + \frac{n_3 \cdot R_1}{p_3}} = \frac{2 \cdot 2 \text{ V}}{12 \text{ } \Omega + \frac{2 \cdot 0,03 \text{ } \Omega}{2}}$$

$$I_3 = \frac{4 \text{ V}}{12 \text{ } \Omega + 0,03 \text{ } \Omega} = \frac{4 \text{ V}}{12,03 \text{ } \Omega} = \underline{0,333 \text{ A}}$$

Bei der Reihenschaltung aller Zellen ist der Strom 0,666 A. Bei der Parallelschaltung der Zellen ist der Strom 0,167 A. Bei der Gruppenschaltung der Zellen ist der Strom 0,333 A. Bei der Reihenschaltung aller Zellen gibt die Batterie den stärksten Strom ab.

2.5. Elektrische Arbeit und Leistung

Der elektrische Strom kann Arbeit verrichten, d. h., die Arbeit wird von den sich gerichtet bewegenden Elektronen verrichtet. Je mehr Elektronen durch einen Verbraucher fließen, desto größer wird die verrichtete Arbeit. Die Kraft, die die Elektronen treibt, ist die elektrische Spannung. Die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten, wird **Energie** genannt. Energie wird auch mit „gespeicherter Arbeit“ verglichen.

Die Energie (das Arbeitsvermögen) kommt in verschiedenen Formen vor, z. B. mechanische Energie, elektrische Energie, chemische Energie, magnetische Energie, Wärme-Energie, Licht-Energie.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Arbeit	W	J (Joule) ¹⁾
Energie	W	J (Joule)

Die **elektrische Arbeit** wird beeinflusst von der Spannung U und der Elektrizitätsmenge (Elektronenmenge) Q . Als Formel ergibt sich

$$\boxed{W = U \cdot Q} \quad \text{Ws}$$

Setzt man die Spannung in Volt und die Elektrizitätsmenge in Ampere-sekunden ein, so erhält man die Arbeit in Joule.

¹⁾ Joule (sprich: dschul) = englischer Physiker (1818–1889)

Da die Elektrizitätsmenge Q abhängt von der Stromstärke I und der Zeit t , in der dieser Strom fließt ($Q = I \cdot t$), ergibt sich

$$W = U \cdot I \cdot t \quad \text{Ws}$$

In dieser Gleichung ist das Produkt „ $U \cdot I$ “ die elektrische Leistung.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Leistung	P	W (Watt) ¹⁾

Die Formel lautet somit

$$P = U \cdot I \quad \text{W}$$

Dabei erhält man die Leistung in Watt (W), wenn die Spannung in Volt (V) und die Stromstärke in Ampere (A) eingesetzt werden.

Durch Einsetzen der Gleichungen des Ohmschen Gesetzes in die Gleichung $P = U \cdot I$ erhält man zwei weitere Gleichungen für die elektrische Leistung:

$$P = I^2 \cdot R \quad \text{W} \quad \text{sowie} \quad P = \frac{U^2}{R} \quad \text{W}$$

Durch Einsetzen der Gleichung $P = U \cdot I$ in die Gleichung für die elektrische Arbeit $W = U \cdot I \cdot t$ erhält man

$$W = P \cdot t \quad \text{Ws}$$

Je nach den eingesetzten Einheiten für die Leistung (W, kW) und für die Zeit (s, h) ergibt sich die elektrische Arbeit in Wattsekunden (Ws), Wattstunden (Wh) oder Kilowattstunden (kWh).

Zwischen den gebräuchlichen Maßeinheiten für die Energie (Arbeit) besteht folgender Zusammenhang:

$$1 \text{ Joule (J)} = 1 \text{ Wattsekunde (Ws)} = 1 \text{ Newtonmeter (Nm)} = 0,102 \text{ Kilopondmeter (kpm)} = 0,239 \text{ Kalorien (cal)}.$$

Während die Leistung als eine Abkürzung des Wortes „Leistungsfähigkeit“ aufgefaßt werden kann, ist die Arbeit eine Verbrauchsangabe. Die Arbeit gibt an, daß eine Leistung eine bestimmte Zeit lang gewirkt hat. Von den elektrischen „Zählern“ wird aber auch die abgenommene elektrische Arbeit (Energie) gemessen. Die Kosten K , die der Abnehmer elektri-

scher Energie zu bezahlen hat, errechnen sich, indem die am Zähler abgelesene elektrische Arbeit W in kWh mit dem Preis pro Kilowattstunde k multipliziert wird:

$$K = W \cdot k \quad \text{DM}$$

1. Beispiel:

Eine Wahlvermittlung benötigt bei einer Spannung von 60 V in Zeiten stärkster Belastung eine Stromstärke von 80 A. Wie groß ist die Leistung?

Gegeben: $U = 60 \text{ V}$; $I = 80 \text{ A}$

Gesucht: P

Lösung: $P = U \cdot I = 60 \cdot 80 = 4800 \text{ Watt} = \underline{\underline{4,8 \text{ kW}}}$

Die Leistung beträgt 4,8 kW.

2. Beispiel:

Ein elektrischer Ofen hat eine Leistung von 2 kW und wird an 220 V angeschlossen. Welche Stromaufnahme hat der Ofen?

Gegeben: $P = 2 \text{ kW}$; $U = 220 \text{ V}$

Gesucht: I

Lösung: Aus der Grundformel $P = U \cdot I$ erhalten wir durch Umstellung

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2000}{220} = \underline{\underline{9,09 \text{ A}}}$$

Die Stromstärke beträgt 9,09 A.

3. Beispiel:

Wie groß ist die Spannung bei einer Leistung von 1,2 W und bei einer Stromstärke von 40 mA?

Gegeben: $P = 1,2 \text{ W}$; $I = 40 \text{ mA}$

Gesucht: U

Lösung: Aus der Grundformel $P = U \cdot I$ erhalten wir durch Umstellung

$$U = \frac{P}{I} = \frac{1,2}{0,04} = \frac{120}{4} = \underline{\underline{30 \text{ V}}}$$

Die Spannung beträgt 30 V.

4. Beispiel:

Ein Widerstand von 2 kΩ nimmt einen Strom von 150 mA auf. Wie groß ist seine Belastung?

Gegeben: $R = 2 \text{ k}\Omega$; $I = 150 \text{ mA}$

Gesucht: P

Lösung: $P = I^2 \cdot R = 0,15 \cdot 0,15 \cdot 2000 = \underline{\underline{45 \text{ W}}}$

Der Widerstand wird mit 45 W belastet.

¹⁾ Watt = englischer Erfinder (1736–1819)

5. Beispiel:

Ein Widerstand von 400Ω liegt an einer Spannung von 220 V . Wie groß ist seine Belastung?

Gegeben: $R = 400 \Omega$; $U = 220 \text{ V}$

Gesucht: P

$$\text{Lösung: } P = \frac{U^2}{R} = \frac{220 \cdot 220}{400} = \underline{\underline{121 \text{ W}}}$$

Der Widerstand wird mit 121 W belastet.

6. Beispiel:

Eine 60-Watt -Glühlampe brennt 10 Stunden. Welche Gebühr muß bezahlt werden, wenn die kWh $0,10 \text{ DM}$ kostet?

Gegeben: $P = 60 \text{ W}$; $t = 10 \text{ h}$; $k = 0,10 \text{ DM/kWh}$

Gesucht: K

Lösung: Wir müssen zunächst die elektrische Arbeit errechnen zu
 $W = P \cdot t = 60 \cdot 10 = 600 \text{ Wh} = \underline{0,6 \text{ kWh}}$

Danach betragen die Kosten

$$K = W \cdot k = 0,6 \cdot 0,10 = 0,06 \text{ DM} = \underline{\underline{6 \text{ Pf}}}$$

7. Beispiel:

Ein Rundfunkgerät verbraucht durchschnittlich 45 W . Wie hoch ist die monatliche Gebühr, wenn das Gerät täglich fünf Stunden in Betrieb ist? Die kWh kostet $0,10 \text{ DM}$.

Gegeben: $P = 45 \text{ W}$; $t_{\text{tägl.}} = 5 \text{ h}$; $k = 0,10 \text{ DM/kWh}$

Gesucht: K

Lösung: Bevor wir die Arbeit errechnen, müssen wir die Zeit für einen Monat berechnen.

$$t_{\text{Monat}} = 30 \cdot t_{\text{tägl.}} = 30 \cdot 5 = \underline{150 \text{ h}}$$

Demnach beträgt die Arbeit

$$W = P \cdot t = 45 \cdot 150 = 6750 \text{ Wh} = \underline{6,75 \text{ kWh}}$$

Die Gebühr errechnet sich zu

$$K = W \cdot k = 6,75 \cdot 0,10 = 0,675 \text{ DM} = \underline{\underline{67,5 \text{ Pf}}}$$

Bei vielen Vorgängen in der Natur und in der Technik erfolgt eine **Umwandlung der Energieformen**, z. B. beim Elektromotor wird elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt, beim Elektroherd wird elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt.

Bei einer Energieumwandlung ist die erzeugte Energie stets genauso groß wie die verbrauchte Energie (Gesetz von der Erhaltung der Energie). Die erzeugte Energie besteht jedoch zum Teil aus nutzloser Energie, den sogenannten Verlusten. So entstehen z. B. bei den elektrischen Maschinen:

- a) **Reibungsverluste**, u. a. durch Lager- und Luftreibung, durch Reibung der Bürsten am Kollektor und an den Schleifringen.
- b) **Stromwärmeverluste**; das sind die sogenannten Kupferverluste in Leitungen und Wicklungen, die von der Stromdichte abhängen.
- c) **Eisenverluste**; hierzu gehören die Wirbelstromverluste im Eisen und die Ummagnetisierungsverluste (Hysteresisverluste).

Da die Leistung die in der Zeiteinheit verrichtete Arbeit ist, ergibt sich, daß bei jeder Energieumwandlung und auch bei mechanisch angetriebenen Maschinen wie Pumpen, Winden usw. die abgegebene Nutzleistung (P_{ab}) immer kleiner als die zugeführte Leistung (P_{zu}) ist.

Das Verhältnis der abgegebenen Nutzleistung zur zugeführten Leistung nennt man den Wirkungsgrad.

Das Formelzeichen für den Wirkungsgrad ist der griechische Buchstabe Eta (η).

$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}}$$

Der Wirkungsgrad ist stets kleiner als 1 , weil die abgegebene Leistung nicht größer als die zugeführte Leistung sein kann.

Der Wirkungsgrad hat die Einheit 1 ; er wird als Dezimalbruch (z. B. $0,8$) oder in Prozenten (z. B. 80%) angegeben.

1. Beispiel:

Ein Gleichstrommotor gibt an der Riemenscheibe $1,1 \text{ kW}$ ab und nimmt bei 220 V einen Strom von $6,5 \text{ A}$ auf. Wie groß ist sein Wirkungsgrad?

Gegeben: $P_{\text{ab}} = 1,1 \text{ kW}$; $U = 220 \text{ V}$; $I = 6,5 \text{ A}$

Gesucht: η

$$\text{Lösung: } \eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}}$$

$$P_{\text{zu}} = U \cdot I = 220 \cdot 6,5 = \underline{1430 \text{ W}}$$

$$\eta = \frac{1100}{1430} = \underline{\underline{0,769}}$$

Der Wirkungsgrad beträgt $76,9\%$.

2. Beispiel:

Ein Gleichstrommotor mit einem Wirkungsgrad von 85% nimmt zwei Stunden lang 12 kW auf. Wie groß ist die abgegebene Leistung?

Gegeben: $P_{zu} = 12 \text{ kW}$; $t = 2 \text{ h}$; $\eta = 85\%$

Gesucht: P_{ab}

Lösung: $\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$

$$P_{ab} = P_{zu} \cdot \eta = 12 \cdot 0,85 = \underline{\underline{10,2 \text{ kW}}}$$

Der Gleichstrommotor gibt 10,2 kW ab.

3. Beispiel:

Wieviel kW muß der Antriebsmotor einer Pumpenanlage aufnehmen, wenn in 30 min 13 m³ Wasser aus 135 m Tiefe gefördert werden sollen? Der Antriebsmotor hat einen Wirkungsgrad von 85% und die Pumpe einen Wirkungsgrad von 73%.

Gegeben: $t = 30 \text{ min}$; $V = 13 \text{ m}^3$; $h = 135 \text{ m}$; $\eta_M = 85\%$; $\eta_P = 73\%$;

$$\rho = 1 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}; \quad b = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Gesucht: P_{zuM}

Lösung: Die Masse des zu befördernden Wassers beträgt:

$$m = V \cdot \rho = 13000 \text{ dm}^3 \cdot 1 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} = \underline{\underline{13000 \text{ kg}}}$$

Das Gewicht des zu befördernden Wassers beträgt:

$$G = m \cdot b = 13000 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 128000 \frac{\text{kgm}}{\text{s}^2} = 128000 \text{ N} \\ = \underline{\underline{128 \text{ kN}}}$$

Die von der Pumpe zu verrichtende Arbeit beträgt:

$$W = G \cdot h = 128 \text{ kN} \cdot 135 \text{ m} = 17300 \text{ kNm} = \underline{\underline{17,3 \text{ MNm}}} = \underline{\underline{17,3 \text{ MWs}}} \\ = \underline{\underline{17,3 \text{ MJ}}}$$

Die von der Pumpe abzugebende Leistung beträgt:

$$P_{abP} = \frac{W}{t} = \frac{17300000 \text{ Ws}}{30 \cdot 60 \text{ s}} = \frac{173000}{18} \text{ W} = \frac{173}{18} \text{ kW} = \underline{\underline{9,559 \text{ kW}}}$$

Wir berechnen nun die Leistung, die der Pumpe zugeführt werden muß (P_{zuP}). Da Motor und Pumpe unmittelbar miteinander verbunden sind, entspricht die der Pumpe zuzuführende Leistung der vom Motor abzugebenden Leistung ($P_{zuP} = P_{abM}$).

$$\eta_P = \frac{P_{abP}}{P_{zuP}}$$

$$P_{zuP} = \frac{P_{abP}}{\eta_P} = \frac{9,559}{0,73} = 13090 \text{ W} = \underline{\underline{13,09 \text{ kW}}} = P_{abM}$$

$$\eta_M = \frac{P_{abM}}{P_{zuM}}$$

$$P_{zuM} = \frac{P_{abM}}{\eta_M} = \frac{13,09}{0,85} = \underline{\underline{15,4 \text{ kW}}}$$

Der Motor muß eine Leistung von 15,4 kW aufnehmen.

3. Wirkungen des Stroms

Elektrischer Strom selbst ist unsichtbar, an seinen Wirkungen kann man ihn jedoch erkennen. Von den bekanntesten Wirkungen werden in diesem Abschnitt die Wärmewirkung und die chemische Wirkung beschrieben. Die Beschreibung der magnetischen Wirkung folgt im Abschn. 6, Teil 2.

3.1. Wärmewirkung des elektrischen Stroms

Im Abschn. 2.5 wurde bereits darauf hingewiesen, daß elektrische Energie u. a. in Wärmeenergie umgewandelt werden kann.

Die zur Wärmeerzeugung umzuwandelnde elektrische Energie läßt sich nach folgender Gleichung berechnen:

$$W = U \cdot I \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t$$

Da $P = \frac{W}{t}$ ist, ergibt sich die Wärmeleistung in Watt zu

$$P = I^2 \cdot R \quad \text{W}$$

3.1.1. Anwendung der Stromwärme

Es gibt viele Möglichkeiten, mit Hilfe des elektrischen Stroms Wärme zu erzeugen und diese Wärme auszunutzen. In der Regel fließt dabei der Strom in dem zu erwärmenden Gut (unmittelbare Erwärmung) oder in einem Heizleiter, wobei die Wärmeübertragung auf das zu erwärmende Gut durch Wärmeleitung oder Wärmestrahlung erfolgt (mittelbare Erwärmung). Der Strom kann auch als Lichtbogen zwischen Elektroden fließen. Nachstehend werden einige Anwendungsbeispiele erläutert.

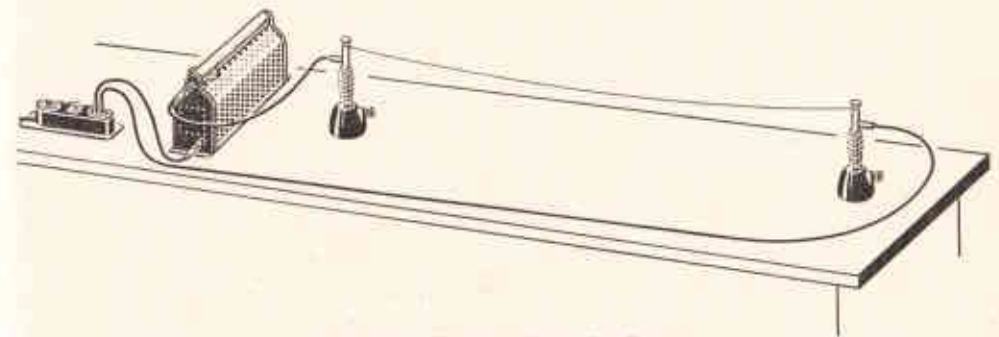


Abb. 3.1 - Wärmewirkung des Stroms

In der Versuchsanordnung nach Abb. 3.1 ist ein Draht zwischen zwei Stromklemmen gespannt. In dem Stromkreis liegt ein Schiebewiderstand, der zunächst voll eingeschaltet ist. Mit abnehmendem Widerstand jedoch senkt sich der Draht in zunehmendem Maße, wird schließlich glühend und brennt am Ende durch. Der elektrische Strom bewirkt eine Erwärmung des Leiters.

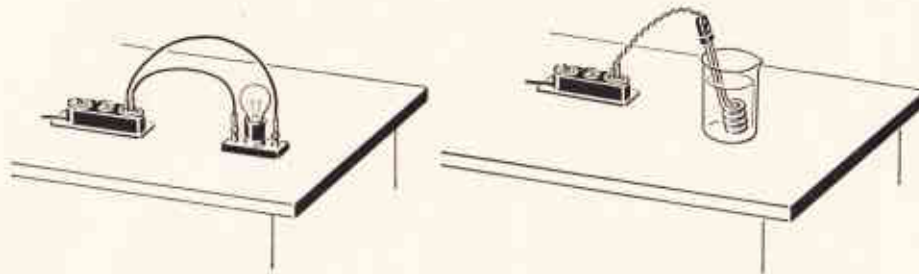


Abb. 3.2 – Glühlampe

Abb. 3.3 – Tauchsieder

Abb. 3.2 zeigt eine an das Lichtnetz angeschlossene Glühlampe. Wenn wir mit dem Netzschalter den Stromkreis schließen, wird in dem Lampenkörper ein dünner Draht durch den elektrischen Strom zum Glühen gebracht. Die Stromwärme wird zum **Beleuchten** verwendet.

Abb. 3.3 zeigt ein Gerät, das täglich in vielen Haushalten benutzt wird. So wie hier wird die elektrische Stromwärme auch in anderen Fällen im Haushalt und in der Technik zu **Heizzwecken** verwendet (z. B. beim Durchlauferhitzer, Heizstrahler, Bügeleisen, Heizkissen, Elektroöfen oder Lichtbogenschmelzöfen). Will man die für die Erwärmung eines Gegenstands erforderliche elektrische Leistung des Heizgeräts ermitteln, so muß man die benötigte Wärmemenge sowie die für die Aufheizung gewünschte Zeit kennen.

Beispiel:

Zum Erwärmen eines Raumes ist eine Wärmemenge von $27 \cdot 10^6 \text{ J} = 27 \text{ MJ}$ erforderlich. Wie groß muß die Leistung eines Elektroofens sein, der diese Wärmemenge in drei Stunden abgeben kann?

Gegeben: $W = 27 \cdot 10^6 \text{ J}$; $t = 3 \text{ h}$

Gesucht: P

$$\text{Lösung: } P = \frac{W}{t} = \frac{27 \cdot 10^6 \text{ Ws}}{3 \cdot 3600 \text{ s}} = 2,5 \cdot 10^3 \text{ W} = \underline{\underline{2,5 \text{ kW}}}$$

Abb. 3.4 zeigt eine einfache Anordnung, in der die Stromwärme dazu benutzt wird, einen Stromkreis bei Überlastung oder Kurzschluß auszuschaalten. Ein Draht ist in seinem Querschnitt und in seinem Werkstoff so

bemessen, daß er bei einer bestimmten im Stromkreis vorhandenen Stromstärke schmilzt. Wir alle kennen die **Sicherungen**, mit denen elektrische Stromkreise abgesichert werden. Für die einzelnen Stromkreise sind bestimmte Sicherungen (6A, 10A usw.) vorgeschrieben, damit eine Brandgefahr vermieden wird. Diese Gefahr besteht nicht nur bei einer Überlastung des Stromkreises, sondern auch bei einem **Kurzschluß**. Von einem Kurzschluß spricht man, wenn sich aus irgendeinem Grunde die Hin- und Rückleitung unmittelbar berühren. Der Widerstand des Stromkreises besteht dann nur aus dem Leitungswiderstand bis zum Berührungspunkt und dem inneren Widerstand der Spannungsquelle. Damit verursacht die Spannung bei dem verhältnismäßig kleinen Widerstand einen sehr hohen Strom, der den Draht unzulässig hoch erwärmt und schließlich einen Brand verursachen kann.

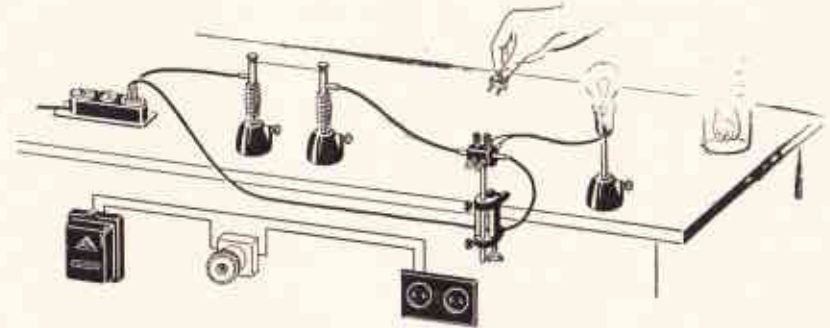


Abb. 3.4 – Stromsicherung

Auch in der Fernmeldetechnik können unzulässig hohe Spannungen und Ströme (Überspannungen, Überströme) durch Stromübertritt (galvanische Kopplung), durch atmosphärische Entladungen oder durch Starkstrombeeinflussung (kapazitive oder induktive Kopplung) entstehen. Um nun die Benutzer von Fernmeldeeinrichtungen, das Personal und die technischen Einrichtungen vor gefährdende Spannungen und Ströme zu schützen, werden neben den Einrichtungen zum Ableiten von Überspannungen (Überspannungsableiter) noch Stromgrobsicherungen und Stromfeinsicherungen verwendet.

Die Feinsicherungen sprechen schon auf schwache, die Grobsicherungen erst auf größere Stromstärken an. **In der Fernmeldetechnik wird grundsätzlich jede stromführende Leitung abgesichert.**

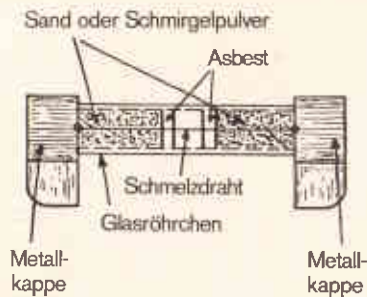


Abb. 3.5 – Stromgrobsicherung

Abb. 3.5 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der bei der DBP verwendeten Stromgrobsicherung, die anspricht, sobald der Strom die höchstzulässige Stärke überschreitet. Der Schmelzdraht befindet sich in einem Glasrohr und ist an den Enden mit sogenannten Schneidenkontakten verbunden, die wiederum guten Kontakt mit der stromführenden Leitung haben. Um den Lichtbogen zu vermeiden, ist der größte Teil des Sicherungsdrahts mit Sand oder mit Schmirgelpulver umgeben, das von zwei Asbestscheiben in der gewünschten Lage gehalten wird.

Die oben angeführten Beispiele bestätigen, daß bei Stromfluß in einem Leiter Energie in Form von Wärme frei wird (vgl. hierzu Abschn. 1.3.3.3). Das Entstehen der Wärme in einem Leiter ist aus den Zusammenstößen der Elektronen mit den Molekülen des Leiters zu erklären. Je größer die Anzahl der fließenden Elektronen ist, desto größer ist auch der Strom, aber um so größer ist auch die Zahl der Zusammenstöße zwischen den Elektronen und den Molekülen und damit auch die erzeugte Wärme.

3.1.2. Stromwärmeverluste

Durch die Wärmeentwicklung in Leitungen, Geräten oder elektrischen Maschinen entstehen aber auch unerwünschte **Energieverluste**. Man nennt diese Verluste auch **Kupferverluste** oder **Stromwärmeverluste**. Eine übermäßige Erwärmung kann ferner unerwünscht sein, weil elektrische Leiter oft mit einem Isolierstoff umgeben sind, der nur eine geringe **Wärmefestigkeit** hat. Um die Stromwärmeverluste oder die Erwärmung der Leiter in erträglichen Grenzen zu halten, darf also die Strombelastung nicht zu hoch werden.

Wir wissen bereits, daß ein Leiter mit dicht beieinanderstehenden Molekülen dem Elektronenstrom einen größeren Widerstand entgegensetzt als ein solcher mit weit auseinanderstehenden Molekülen. Wir haben weiterhin gelernt, daß der Widerstand u. a. abhängig ist vom Querschnitt des Leiters. Somit ist die Erwärmung eines Leiters auch von seinem **Querschnitt** abhängig. Zum Beweis dafür wollen wir den Versuch nach Abb. 3.1 wiederholen. Wir nehmen zuerst einen Konstantandraht von 0,2 mm Durchmesser und dann einen Konstantandraht von 0,4 mm Durchmesser. Wir sehen, daß letzterer erst viel später zu glühen beginnt und u. U. gar nicht durchbrennt.

Die Erwärmung ist also abhängig von der Stromstärke und vom Leiterquerschnitt ($P = I^2 \cdot R$). Je mehr Strom je mm^2 Querschnitt fließt, d. h., je dichter die Elektronen fließen, um so größer ist die erzeugte Wärme.

Die Stromstärke je mm^2 Leiterquerschnitt nennt man **Stromdichte**.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Stromdichte	S	$\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$

Für die Formel ergibt sich

$$S = \frac{I}{A} \quad \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Die zulässige Stromdichte für elektrische Leiter ist keine konstante Größe. Sie hängt von verschiedenen Faktoren ab, z. B. von der Kühlung des Leiters. Wir wollen uns jedoch nicht eingehender mit der höchstzulässigen Strombelastung elektrischer Leiter befassen, weil dieses Problem in der Fernmeldetechnik keine Bedeutung hat.

Beispiel:

Durch die Stromzuführungsleitung einer Vermittlungsstelle fließen $I = 120 \text{ A}$; der Kupferquerschnitt der Leitung beträgt $A = 80 \text{ mm}^2$. Wie groß ist die Stromdichte?

Gegeben: $I = 120 \text{ A}$; $A = 80 \text{ mm}^2$

Gesucht: S

$$\text{Lösung: } S = \frac{I}{A} = \frac{120 \text{ A}}{80 \text{ mm}^2} = \underline{\underline{1,5 \text{ A/mm}^2}}$$

Die Stromdichte beträgt $S = 1,5 \text{ A/mm}^2$.

3.2. Die chemischen Wirkungen des Stroms

3.2.1. Elektrolyse

In allen Leiterwerkstoffen sind die Atome in Form von Kristallgittern fest miteinander verbunden. Diese Stoffe weisen eine große Anzahl frei beweglicher Elektronen auf. Der elektrische Strom wird daher in den Leiterwerkstoffen durch die gerichtete Bewegung frei beweglicher Elektronen dargestellt. Man sagt, die elektrischen Ladungsträger in den Leiterwerkstoffen sind die Elektronen.

Eine Flüssigkeit kann nur dann den elektrischen Strom leiten, wenn sie elektrische Ladungsträger aufweist. Die elektrischen Ladungsträger einer stromleitenden Flüssigkeit werden jedoch nicht durch Elektronen, sondern durch frei bewegliche **Ionen**¹⁾ dargestellt. Ionen sind elektrisch geladene Atome oder Atomgruppen. Atomgruppen werden oftmals auch als Molekül bezeichnet.

¹⁾ Ionen = Wandernde

Wie entstehen nun in einer Flüssigkeit Ionen?

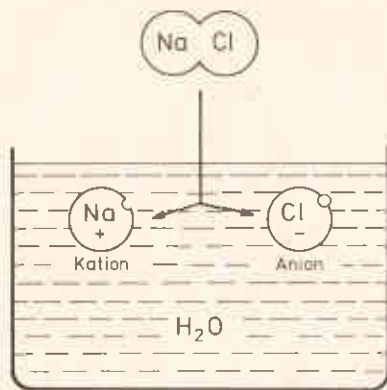


Abb. 3.6 – Molekülaufspaltung

Chemisch reines Wasser enthält fast keine Ionen; es ist ein schlechter elektrischer Leiter und hat einen hohen elektrischen Widerstand. Die chemische Formel lautet H_2O . Kochsalz ist ein fester Körper. Ein Molekül Kochsalz setzt sich zusammen aus einem Atom Natrium (Na) und einem Atom Chlor (Cl); die chemische Formel lautet daher $NaCl$. Wird Kochsalz in Wasser gelöst, dann werden die Kochsalzmoleküle aufgespalten, und zwar bilden sich bei der Aufspaltung aus einem Kochsalzmolekül ein Natriumion, das positiv geladen ist, und ein Chlorion, das negativ geladen ist. Das nahezu nichtleitende Wasser hat jetzt elektrische Ladungsträger – positive und negative Ionen – erhalten; es leitet den elektrischen Strom nach der Auflösung des Kochsalzes sehr gut. Diese Molekülaufspaltung entsteht immer dann, wenn Säuren, Laugen und Salze im Wasser gelöst werden.

Alle Moleküle von Säuren, Laugen und Salze spalten sich im Wasser in elektrische Ladungsträger, durch die die wässrige Lösung elektrisch leitend wird. Eine elektrisch leitende Flüssigkeit nennt man Elektrolyt¹⁾.

Die Aufspaltung von Molekülen in einer Flüssigkeit nennt man Dissoziation²⁾ und die hierbei entstandenen elektrischen Ladungsträger **Kationen**³⁾ und **Anionen**⁴⁾.

Die wichtigsten Stoffe werden im Wasser wie folgt aufgespalten:

Salzsäure (HCl)	in	<	H -Ionen (+) (Kation)
			Cl -Ionen (–) (Anion)
Schwefelsäure (H_2SO_4)	in	<	H_2 -Ionen (+) (Kation)
			SO_4 -Ionen (–) (Anion)
Kalilauge (KOH)	in	<	K -Ionen (+) (Kation)
			OH -Ionen (–) (Anion)
Kupfersulfat ($CuSO_4$)	in	<	Cu -Ionen (+) (Kation)
			SO_4 -Ionen (–) (Anion)

¹⁾ Elektrolyt = stromleitende Flüssigkeit

²⁾ Dissoziation = Aufspaltung

³⁾ Kation = elektrisch positiv geladenes Teilchen, das zur Katode wandert

⁴⁾ Anion = elektrisch negativ geladenes Teilchen, das zur Anode wandert

Wird z.B. Kupfersulfat ($CuSO_4$) in Wasser (H_2O) aufgelöst, dann entsteht eine Kupfersulfatlösung ($H_2O + CuSO_4$). In der Kupfersulfatlösung befinden sich nach der Aufspaltung des Kupfersulfats elektrische Ladungsträger, und zwar bilden sich positiv geladene Kupferionen und negativ geladene Sauerestionen. Die Kupfersulfatlösung ist daher elektrisch leitend geworden.

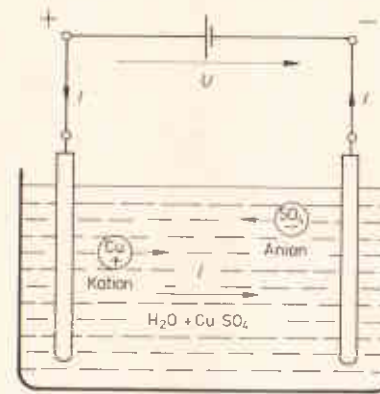


Abb. 3.7 – Elektrolyse

Taucht man in ein mit Kupfersulfat angefülltes Gefäß zwei Elektroden¹⁾, an die eine Gleichspannung geschaltet wird, dann fließt der elektrische Strom durch den gesamten Stromkreis. In den Leiterwerkstoffen des Stromkreises führen die freien Elektronen eine gerichtete Bewegung aus. Im Elektrolyten hingegen bewegen sich die Kationen in Stromrichtung zur negativen Elektrode und die Anionen wandern gegen die Stromrichtung zur positiven Elektrode hin. Die positiv geladenen Kationen werden bei Berührung mit der Minuselektrode elektrisch neutralisiert; die Minuselektrode überzieht sich mit einem Kupferbelag. Die negativ geladenen Sauerestionen gelangen zur positiven Elektrode und verursachen dort ebenfalls elektrochemische Vorgänge, die für die Anwendung der Elektrolyse jedoch ohne Bedeutung sind.

Wir fassen zusammen:

- Werden Säuren, Laugen oder Salze in Wasser gelöst, dann bilden der Wasserstoff und die Metalle stets elektrisch positiv geladene Ionen, das sind die Kationen. Die Restanteile von Säuren, Laugen und Salze bilden stets elektrisch negativ geladene Ionen, das sind die Anionen.
- Bei Stromfluß durch eine Flüssigkeit bewegen sich die Kationen stets in Stromrichtung und die Anionen gegen die Stromrichtung. Die stromleitende Flüssigkeit wird durch den elektrischen Strom chemisch zersetzt. Diesen Vorgang bezeichnet man als Elektrolyse²⁾.
- Wasserstoff und Metalle werden bei der Elektrolyse stets an der Minuselektrode, Sauerstoff und die Restanteile von Säuren, Laugen und Salze stets an der Plusselektrode ausgeschieden.

¹⁾ Elektrode = ein den Stromübergang vermittelnder Leiter

²⁾ Elektrolyse = elektrische Zersetzung chemischer Verbindungen

Die wichtigste Nutzenanwendung der Elektrolyse ist das Ausscheiden von Metallen aus einem Elektrolyten. Die bei der Elektrolyse ausgeschiedene Masse eines Stoffs wird nach dem Faradayschen Gesetz¹⁾ berechnet.

Faradaysches Gesetz:

Die bei der Elektrolyse ausgeschiedene Masse eines Stoffs ist verhältnismäßig der Stromstärke, der Zeit und dem elektrochemischen Gramm-äquivalent²⁾).

Begriff	Formelzeichen	Einheit	
		Benennung	Kurzzeichen
Masse	m	Kilogramm	kg

Größengleichung

$$m = I \cdot t \cdot c$$

kg

In dieser Formel bedeuten:

 m = Masse in kg t = Zeit in s c = elektrochemisches Gramm-äquivalent in kg/As

1 Amperesekunde = 1 Coulomb

1 As = 1 C

Einheitengleichung

$$\text{kg} = \frac{\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}}{\text{As}}$$

Das elektrochemische Gramm-äquivalent gibt die Masse eines Stoffs an, die bei der Elektrolyse pro Amperesekunde ausgeschieden wird.

Elektrochemisches Gramm-äquivalent				
Stoff	Kupfer	Silber	Aluminium	Nickel
c in $\frac{10^{-6} \text{ kg}}{\text{As}}$	0,329	1,118	0,093	0,304

Beispiel:

Das elektrochemische Gramm-äquivalent für Silber beträgt $c = 1,118 \cdot 10^{-6} \text{ kg/As}$. Das bedeutet, daß aus einer Silbernitratlösung pro Amperesekunde eine Silbermasse von $m = 1,118 \cdot 10^{-6} \text{ kg} = 1,118 \text{ mg}$ ausgeschieden wird.

Beispiel:

Eine Kupfersulfatlösung wird von einem Strom von $I = 120 \text{ A}$, $t = 4 \text{ h } 30 \text{ min}$ lang durchflossen. Welche Kupfermasse wird dabei ausgeschieden?

Gegeben: $I = 120 \text{ A}$; $t = 4 \text{ h } 30 \text{ min}$; $c = 0,329 \cdot 10^{-6} \text{ kg/As}$

Gesucht: m

Lösung: $m = I \cdot t \cdot c$

$$m = 120 \text{ A} \cdot 4,5 \cdot 3600 \text{ s} \cdot 0,329 \cdot 10^{-6} \text{ kg/As}$$

$$m = 0,64 \text{ kg} = \underline{\underline{640 \text{ g}}}$$

Die ausgeschiedene Kupfermasse beträgt $m = 640 \text{ g}$.

¹⁾ Faraday = englischer Physiker, 1791–1867

²⁾ äquivalent = gleichwertig

3.2.1.1. Elektrolytische Korrosion

In der Fernmeldetechnik ist die Nutzenanwendung der Elektrolyse von geringerer Bedeutung; jedoch sind die unerwünschten Erscheinungen elektrolytischer Vorgänge an Bleimantelkabeln, Relaiswicklungen usw. von großer Wichtigkeit, weil gegen die elektrolytische Zerstörung von Kabelmänneln und Kupferdrähten entsprechende Gegenmaßnahmen durchgeführt werden müssen. Das elektrolytische Zerstören von Kabelmänneln und Relaiswicklungen wird auch elektrolytische Korrosion¹⁾ genannt.

Elektrolytische Korrosion entsteht immer dann, wenn ein Stromübergang aus einem Metall in einen Elektrolyten stattfindet.

Bei der elektrolytischen Korrosion wird der Elektrolyt meistens durch das feuchte Erdreich, in dem sich das Bleimantelkabel befindet, oder durch die Luftfeuchtigkeit, durch die die isolierende Wirkung der Leiterisolierung von Relaiswicklungsdrähten vermindert wird, dargestellt.

1. Beispiel: Bleimantelkorrosion

Die Bleimäntel von Fernmeldekabeln, besonders die an Bahnkörpern entlang verlaufenden, sind stark korrosionsgefährdet. Die Ursache hierfür ist der unbeabsichtigte Stromfluß, der durch den Bleimantel geht.

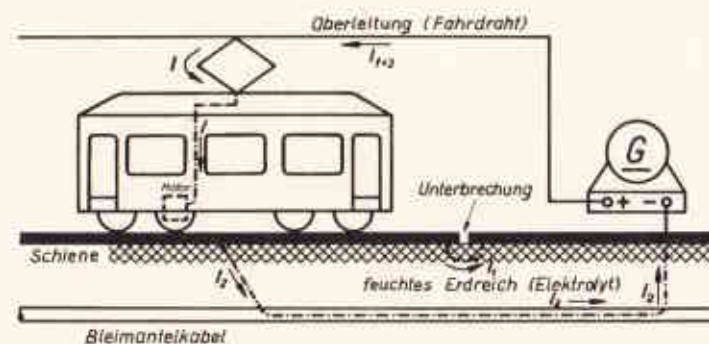


Abb. 3.8 – Bleikabel-Korrosion

Im allgemeinen werden diese Bahnen so betrieben, daß man den Strom vom Pluspol des Spannungserzeugers (Gleichrichters oder Gleichstromgenerators) über den oberirdischen Fahrdraht den Fahrzeugen zuführt. Die Rückführung der verhältnismäßig starken Ströme erfolgt über die Schie-

¹⁾ Korrosion = Zerfressen, Zernagen, Zerstören

nen zum Minuspol der Spannungsquelle (vgl. hierzu Abb. 3.8). Dabei fließt z. B. durch die an den Schienenstößen auftretenden Übergangswiderstände ein Teil des Gesamtstroms über Wege geringeren Widerstands (z. B. feuchtes Erdreich, Rohrleitungen, Wasseradern, Bleikabelmäntel usw.) als vagabundierender¹⁾ Gleichstrom zur Spannungsquelle zurück. Das feuchte Erdreich stellt mit den in ihm enthaltenen Salzen, Fäulnisstoffen usw. einen Elektrolyten dar. Fließt nun z. B. ein Strom über einen Bleikabelmantel, so muß an irgendeiner Stelle ein Stromaustritt aus dem Bleimantel ins feuchte Erdreich erfolgen. Dabei gehen Bleiionen, die Kationen, aus dem Bleimantel in Richtung des Minuspols der Spannungsquelle in das Erdreich über, d. h., das Blei wandert in das Erdreich ab. Im Laufe der Zeit wird der Bleimantel an der Abwanderungsstelle zerstört; damit kann Feuchtigkeit ins Kabel eindringen und das Kabel wird unbrauchbar.

Als Gegenmaßnahme stellt man eine unmittelbare metallische Verbindung zwischen dem Minuspol der Spannungsquelle und dem Bleikabelmantel her. Diesen Schutz zur Verhinderung der elektrolytischen Metallwanderung nennt man **Elektrodrainage**²⁾.

Bei den in neuerer Zeit verwendeten Kabeln mit Kunststoffmantel kann die elektrolytische Korrosion nicht auftreten, weil der Kunststoffmantel als Isolator einen Stromfluß zwischen Kabelmantel und Erdreich verhindert.

Alle Kabelmäntel aus Metall können durch elektrolytische Korrosion zerstört werden. Gegenmaßnahmen: Elektrodrainage oder Kabelmäntel aus Kunststoffen.

2. Beispiel: Zerstörung von Relaiswicklungen durch elektrolytische Korrosion

Die atmosphärische Luft, die im allgemeinen feucht ist, stellt einen Elektrolyten dar. Damit besteht in den technischen Einrichtungen der Fernmeldeanlagen, die mit Gleichstrom betrieben werden, die Gefahr einer elektrolytischen Korrosion.

Aus Sicherheitsgründen muß von jeder Stromversorgungsanlage für Vermittlungsstellen ein Pol geerdet sein. Würde man den Minuspol erden, dann würde von den positiv geladenen Kupferdrähten der Relaiswicklungen ausgehend ein Leckstrom durch den unvollkommenen Isolierstoff der Kupferdrähte hindurch bis zum geerdeten Eisenkern des Relais fließen können (Abb. 3.9). Dabei würden die Kupferdrähte der Relaiswicklungen an den Stromaustrittsstellen durch elektrolytische Korrosion zerstört

¹⁾ vagabundieren = umherziehen, herumstrolchen; Stromfluß bei unkontrolliertem Stromweg

²⁾ Drainage = Entwässerungsgraben, -röhre; Stromweg für unkontrollierte Ströme

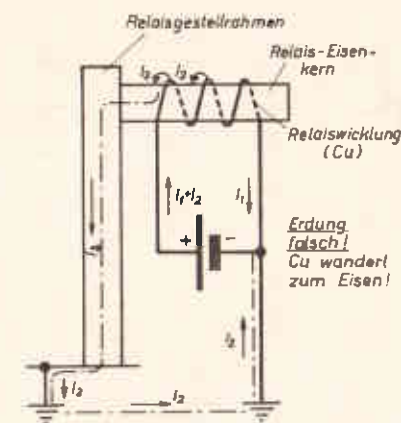


Abb. 3.9 – Metallwanderung an Relais bei Erdung des Minuspols der Batterie

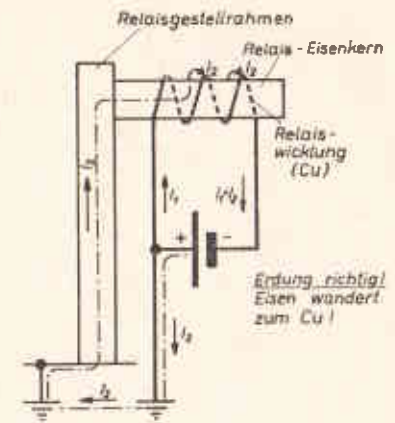


Abb. 3.10 – Metallwanderung an Relais bei Erdung des Pluspols der Batterie

werden. Da diese Kupferdrähte nur sehr dünn sind (etwa $d = 0,06 \text{ mm}$), würde sich diese Zerstörung der Drähte sehr störend bemerkbar machen.

Um die elektrolytische Korrosion von Relaiskupferdrähten zu verhindern, erdet man von den Stromversorgungsanlagen nicht den Minuspol, sondern den Pluspol (Abb. 3.10). Hierdurch fließen die Leckströme im Isolierstoff nicht vom Kupfer zum Eisen, sondern vom Eisen zum Kupfer der Relaiswicklungen hin. Dabei tritt an den Kupferdrähten keine elektrolytische Korrosion mehr auf, wohl aber an den Eisenkernen der Relais. Die elektrolytische Wirkung an den Eisenkernen ist jedoch wegen der größeren Stoffmenge ohne Bedeutung.

Von Stromversorgungsanlagen ist stets der Pluspol geerdet, um die elektrolytische Korrosion an den Kupferdrähten der Relaiswicklungen zu verhindern.

3. Beispiel: Elektrolytische Korrosion durch Elementbildung

An den Berührungsstellen zweier verschiedener Metalle (z. B. Würgoverbindungsstelle einer Aluminiumfreileitung mit einer Kupferfreileitung, Verbindungsstelle der Heiflaschen einer Sammlerbatterie mit der Kupfersammelbleche der Stromversorgung einer VStW, Bleikabelmantelverbindung mit einem Kupfererder usw.) können sich unter Einwirkung von Luft- oder Bodenfeuchtigkeit als Elektrolyt galvanische Elemente (Lokalelemente) bilden. Da die Übergangsstelle widerstandsmäßig einen Kurzschluß darstellt, wird durch den aus diesem Element kommenden Strom die Berührungsstelle elektrolytisch zerstört. Gegenmaßnahmen gegen die elektrolytische Korrosion durch Elementbildung gibt es z. Z. jedoch noch nicht. Deshalb sollten die elektrischen Verbindungen möglichst nur aus gleichartigen Metallen hergestellt sein.

3.2.2. Spannungserzeugung durch chemische Wirkungen

Tauchen wir eine Elektrode in einen Elektrolyten, dann entsteht zwischen der Elektrode und dem Elektrolyten eine elektrische Spannung. Diese Spannung entsteht dadurch, daß die Ionen in dem Elektrolyten das Bestreben haben, sich an der Elektrode auszuschleiden. Der Elektrodenwerkstoff hat hingegen das Bestreben, sich in dem Elektrolyten aufzulösen. Überwiegt das Auflösungsbestreben des Elektrodenwerkstoffs, dann gehen Metallionen in den Elektrolyten über; die Metallelektrode wird elektrisch negativ geladen, während der Elektrolyt positiv bleibt (Abb. 3.11). Überwiegt aber das Ausscheidungsbestreben des Elektrolyten, dann wandern die Metallionen aus dem Elektrolyten zur Elektrode, wobei sie ihre positive Ladung an die Elektrode abgeben. Die Elektrode wird jetzt elektrisch positiv, während der Elektrolyt negativ bleibt (Abb. 3.12).

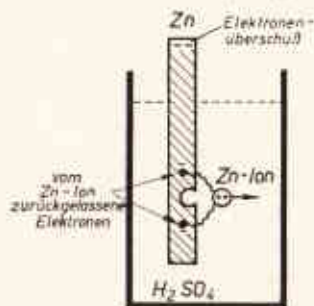


Abb. 3.11 – Auflösungsbestreben der Metalle

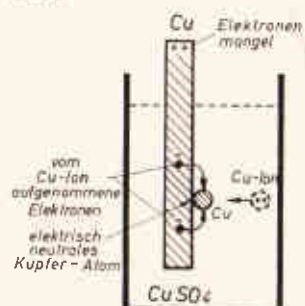
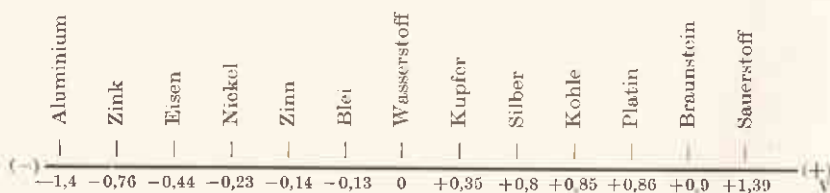


Abb. 3.12 – Ausscheidungsbestreben der Elektrolyten

Gehen die Metallionen eines Werkstoffs in den Elektrolyten über, dann ist die Elektrode negativ geladen; gehen die Metallionen des Elektrolyten aus der Lösung an die Elektrode, dann ist die Elektrode positiv geladen.

Die Höhe und die Polarität der zwischen einem Elektrodenwerkstoff und dem Elektrolyten wirksamen elektrischen Spannung ist von dem Elektrodenwerkstoff abhängig. Diese Spannungswerte sind in der **elektrochemischen Spannungsreihe**¹⁾ zusammengestellt worden. Da sich in jedem Elektrolyten Wasserstoff befindet, beziehen sich die Spannungangaben für Elektrodenwerkstoffe stets auf Wasserstoff.

Elektrochemische Spannungsreihe



¹⁾ Die elektrochemische Spannungsreihe bezeichnet man auch als „Voltische Spannungsreihe“.

In dieser Spannungsreihe stehen links die unedleren und rechts die edleren Stoffe, d. h., die unedleren Stoffe haben gegenüber Wasserstoff, der das Potential Null hat, ein negatives und die edleren ein positives Potential. Die Ursprungsspannung in Volt zwischen zwei Stoffen ergibt sich aus folgender Formel:

$$U_0 = \text{Potential 1} - \text{Potential 2}$$

Dabei gibt das Vorzeichen im Ergebnis die Polarität des Stoffs der ersten Elektrode gegenüber dem Stoff der zweiten Elektrode an.

Beispiel:

Eine Kohle- und eine Zinkelektrode befinden sich in einem Elektrolyten. Welche Spannung liegt zwischen den beiden Elektroden und welche Polarität haben sie?

Gegeben: $\varphi_C = +0,85 \text{ V}$; $\varphi_{Zn} = -0,76 \text{ V}$

Gesucht: U_0

$$\begin{aligned} \text{Lösung: } U_0 &= \varphi_C - \varphi_{Zn} \\ U_0 &= (+0,85 \text{ V}) - (-0,76 \text{ V}) = +0,85 \text{ V} + 0,76 \text{ V} \\ U_0 &= +1,61 \text{ V} \end{aligned}$$

Der Spannungswert zwischen der Kohle- und Zinkelektrode beträgt $U_0 = 1,61 \text{ V}$; die Kohlelektrode ist die Pluslektrode und die Zinkelektrode ist die Minuslektrode.

Bestehen beide Elektroden aus demselben Werkstoff, dann beträgt die Spannung zwischen diesen beiden Elektroden null Volt, weil die Einzelspannungen zwischen den Elektroden und dem Elektrolyten gleich groß sind und dieselbe Polarität haben. Ein an die Elektroden geschalteter Spannungsmesser zeigt daher bei gleichartigen Elektroden keinen Spannungswert an.

3.2.3. Primärelemente

Ein Primärelement besteht aus zwei verschiedenartigen Elektroden und einem Elektrolyten; man nennt diese Elemente auch galvanische Elemente¹⁾.

In einem Primärelement wird die chemische Energie unmittelbar in elektrische Energie umgewandelt, so daß es vor der Abgabe von elektrischer Energie nicht erst aufgeladen zu werden braucht.

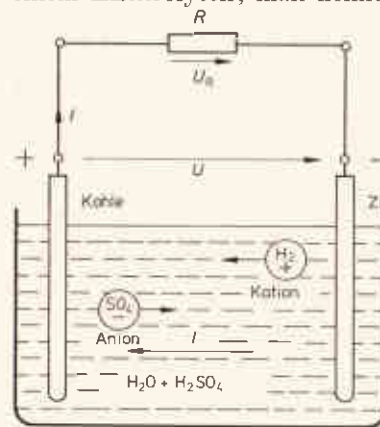


Abb. 3.13 – Primärelement

Betrachten wir z. B. die Vorgänge in einem Primärelement, das eine Kohle- und eine Zinkelektrode enthält. Nach der elektrochemischen Spannungsreihe ist die Kohlelektrode die Pluslektrode und die Zinkelektrode die Minuslektrode. Als Elektrolyt dient eine wässrige Lösung aus Schwefelsäure ($\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4$) (vgl. hierzu Abb. 3.13). Wird das Primärelement mit einem Widerstand belastet, dann fließt ein Strom durch den gesamten Stromkreis. In den Leiterwerkstoffen bewegen sich

¹⁾ Galvani = italienischer Mediziner, 1737–1789

die frei beweglichen Elektronen. Im Elektrolyten hingegen bewegen sich die Kationen und Anionen gleichzeitig, jedoch in entgegengesetzter Richtung. Die Kationen (H_2) bewegen sich mit dem Strom zur Anode (Pluselektrode), die Anionen (SO_4) gegen die Stromrichtung zur Katode (Minuselektrode) hin. Hierbei werden an beiden Elektroden chemische Veränderungen bewirkt, von denen die Veränderungen der Pluselektrode von großer praktischer Bedeutung sind.

3.2.3.1. Polarisation/Depolarisation

Innerhalb eines jeden Primärelements fließt der Strom von der Minus- zur Pluselektrode. Hierbei bewegen sich die Kationen – bei einer wässrigen Schwefelsäure sind das die Wasserstoffionen – mit dem Strom zur Pluselektrode hin. Dadurch wird die Pluselektrode infolge des Stromflusses mit Wasserstoffbläschen überzogen. Wasserstoff hat nach der elektrochemischen Spannungsreihe eine niedrigere Spannung als der Elektrodenwerkstoff. Durch den Wasserstoffbelag an der Pluselektrode verringert sich daher der wirksame, zwischen den Elektroden liegende Spannungswert eines Primärelements. Man nennt diesen Vorgang **Polarisation**, und zwar deshalb, weil sich bei Stromfluß die Pluselektrode auf den Spannungswert von Wasserstoff polarisiert.

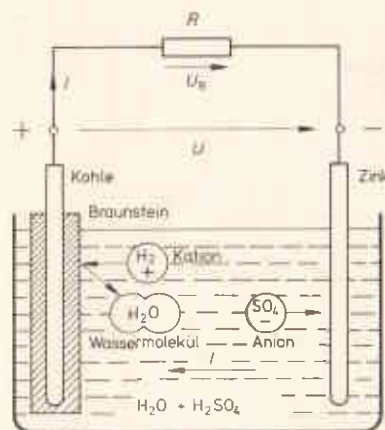


Abb. 3.14 – Depolarisation

Ein häufig verwendeter Werkstoff für die Depolarisation ist der Braunstein (MnO_2). Er ist sehr stark sauerstoffhaltig und gibt den Sauerstoff leicht an andere Stoffe ab. Wird die Pluselektrode eines Primärelements mit Braunstein umgeben (Abb. 3.14), dann kann sie nicht mehr durch die Wasserstoffbläschen polarisiert werden, weil der Wasserstoff sofort zu Wasser gebunden und in den Elektrolyten abgeleitet wird. Die Pluselektrode ist depolarisiert; bei Stromfluß findet keine Spannungsverminderung des Elements statt.

Unter Depolarisation versteht man das Verhindern der Spannungsverminderung eines Primärelements bei Stromfluß.

Wir fassen zusammen: Jedes Primärelement besteht aus

- a) zwei verschiedenartigen Elektroden,
- b) dem Elektrolyten und
- c) dem Depolarisator.

Beispiel:

Ein Zink-Kohle-Element wird mit einem äußeren Widerstand so lange belastet, bis sich die Kohlelektrode vollkommen mit Wasserstoff überzogen hat. a) Wie groß ist die Leerlaufspannung vor dem Stromfluß? b) Wie groß ist die Leerlaufspannung, nachdem die Pluselektrode sich vollkommen mit Wasserstoffbläschen überzogen hat?

Gegeben: $\varphi_C = + 0,85 \text{ V}$; $\varphi_{Zn} = - 0,76 \text{ V}$; $\varphi_H = 0 \text{ V}$

Gesucht: U_o

Lösung: a) vor der Strombelastung

$$U_o = \varphi_C - \varphi_{Zn}$$

$$U_o = + 0,85 \text{ V} - (- 0,76 \text{ V}) = + \underline{\underline{1,61 \text{ V}}}$$

b) nach der Polarisation

$$U_o = \varphi_H - \varphi_{Zn}$$

$$U_o = 0 \text{ V} - (- 0,76 \text{ V}) = + \underline{\underline{0,76 \text{ V}}}$$

Durch die vollkommene Polarisation hat sich die Leerlaufspannung des Elements von 1,61 V auf 0,76 V vermindert.

3.2.3.2. Zink-Braunstein-Element

Das Zink-Braunstein-Element hat gegenüber fast allen anderen entwickelten Bauanordnungen den Vorteil, daß es eine höhere Leerlaufspannung erzeugt. Nach der elektrochemischen Spannungsreihe ist das Spannungsgefälle zwischen Braunstein und Zink etwa 1,66 V. Im Betrieb hat das Element eine Klemmenspannung U von 1,5 V. Dieser innere Spannungsverlust ist bedingt durch den inneren Widerstand des Elements. Der innere Widerstand ist abhängig von der Größe der Elektroden und von der Art des Elektrolyten und schwankt zwischen 0,1 und 0,5 Ω . Durch Alterung des Elements steigt sein innerer Widerstand stark an.

Zink-Braunstein-Elemente kennt man heute nur noch als Trockenelemente.

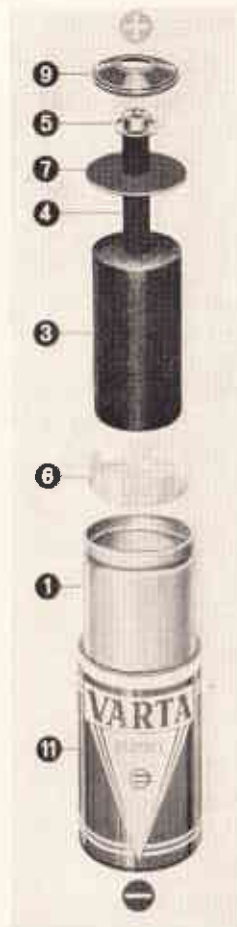


Abb. 3.15 – Trockenelement

Als Trockenelement wird das Zink-Braunstein-Element in der Fernmeldetechnik auch bei der Deutschen Bundespost verwendet.

Den Aufbau eines Trockenelements zeigt Abb. 3.15 am Beispiel der **Rundzelle**. In einer Papphülse (11) befindet sich die als Becher ausgebildete Zink-Elektrode (1). Der als Zuleitung zur positiven Elektrode dienende Kohlestift (4) besitzt oberhalb einer Abdeckscheibe (7) eine Polkappe (5). Er ist umgeben von einem Braunstein-Graphit-Gemisch (3), das als positive Elektrode und gleichzeitig als Depolarisator dient. Zwischen dieser positiven Elektrode und dem negativen Zinkbecher befindet sich ein Bodenisolator (6). An der Kennfarbe des Deckels (9) erkennt man, für welche Verwendung die Zelle besonders geeignet ist (Beleuchtung – blau; Geräte – rot; Motor – orange).

Der Elektrolyt ist beim Trockenelement keine Flüssigkeit, sondern eine mit Hilfe eines Verdickungsmittels (Weizenmehl, Kartoffelstärke) gebundene Salmiakpaste, die sich zwischen der inneren Wandung des Zinkbechers und der Braunsteinpuppe befindet; auch der Depolarisator ist von ihr durchsetzt.

Während der Stromentnahme wird der Zinkbecher zersetzt. Die Papphülse hat daher die Aufgabe, eventuell austretenden Elektrolyt aufzusaugen.

Besonders anspruchsvolle Zellentypen werden in einer allseitig abgedichteten Stahlmantelkonstruktion ausgeführt.

Außer der **Monozelle** sind in den letzten Jahren einige weitere Sonderausführungen von den Herstellerfirmen herausgebracht worden.

3.2.3.3. Luft-Sauerstoff-Element

Das **Luft-Sauerstoff-Element** ist im Prinzip ähnlich aufgebaut wie das Zink-Braunstein-Element. Als Depolarisator verwendet man aber hier nicht den Sauerstoff des Braunsteins, sondern den Sauerstoff der atmo-

sphärischen Luft. Die im Innern der Zelle befindliche Puppe besteht bei dieser Ausführung nicht aus Braunstein, sondern aus Aktivkohle, die hochporös ist. Wie ein Schwamm saugt diese den Sauerstoff der Luft begierig auf. Dieser Sauerstoff verbindet sich bei Inbetriebnahme des Elements wie beim Braunstein-Element mit dem sich absetzenden Wasserstoff zu Wasser. Als Elektrolyt findet zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit manchmal Kalilauge (KOH) Verwendung. Der konstruktive Aufbau weicht etwas von dem der anderen Elemente ab. Innerhalb der Zelle muß ein größerer Luftraum vorhanden sein, der durch verschließbare Röhrchen mit der Außenluft in Verbindung gebracht werden kann, damit der Luftsauerstoff bei Inbetriebnahme an die Aktivkohle gelangt. Diese Elemente werden meist als sog. Füllelemente ausgeführt, d. h., sie werden vor dem Gebrauch mit Wasser gefüllt, wobei sich die in fester Form in der Zelle befindlichen Laugenbestandteile auflösen und den Elektrolyten bilden. Das Luftsauerstoff-Element hat eine etwa zweieinhalbmal so große Kapazität wie die Rundzelle (etwa 150 mAh/cm³).

3.2.3.4. Brennstoffzelle

Brennstoffzellen sind chemische Spannungserzeuger, die nach dem Prinzip der sog. „Kalten Verbrennung“¹⁾ arbeiten. Es gibt eine Reihe von Ausführungen, die mit den verschiedensten Stoffen wirksam sind. Bei der DBP werden vor allem sog. Wasserstoff-Sauerstoffzellen eingesetzt. Diese arbeiten ähnlich wie galvanische Elemente. Sie bestehen aus zwei gleichartigen porösen Metallelektroden (z. B. Nickellegierungen), die sich in einem Elektrolyten, meist Kalilauge, befinden. In die eine Elektrode läßt man Wasserstoff und in die andere Sauerstoff unter einem Überdruck einströmen. Das Wasserstoffgas dringt in die feinen Kanäle der porösen Wasserstoff-Elektrode in Richtung des Elektrolyten so weit ein, bis es durch den Haarröhrchendruck (Kapillardruck) des Elektrolyten aufgehalten wird. Hierbei finden elektrochemische Reaktionen statt. An der Wasserstoffelektrode bilden sich aus dem neutralen Wasserstoffgas positive Wasserstoffionen, die in den Elektrolyten wandern; dabei wird diese Elektrode durch die zurückbleibenden Elektronen negativ geladen (Elektronenüberschuß). In der Grenzschicht der Sauerstoffelektrode bilden sich aus neutralem Sauerstoffgas negative OH-Ionen, die in den Elektrolyten abwandern und der Elektrode Elektronen entziehen, wodurch diese positiv geladen wird (Elektronenmangel). Diese negativen OH-Ionen vereinigen sich innerhalb des Elektrolyten mit den von der anderen Elektrode kommenden positiven H-Ionen zu neutralem H₂O-Molekülen (Wasser). Das entstehende Wasser muß von Zeit zu Zeit abgezogen werden, da es die Konzentration des Elektrolyten verschlechtert (vgl. hierzu Abb. 3.16).

¹⁾ Unter einer kalten Verbrennung versteht man die Verbindung eines Stoffs mit Sauerstoff, wobei keine Wärme entsteht.

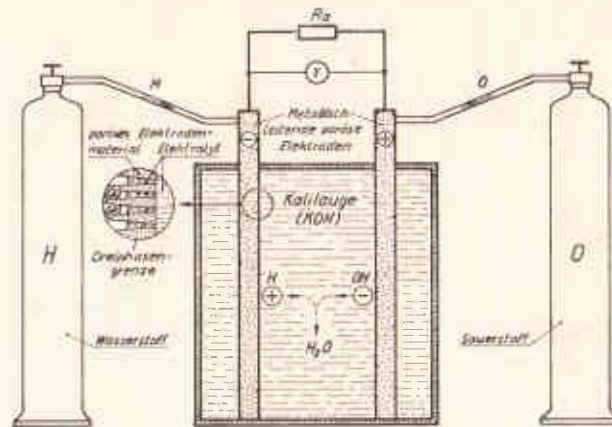


Abb. 3.16 – Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle

Die zwischen den Elektroden entstehende Spannung beträgt theoretisch etwa 1,23 V; praktisch liegt sie zwischen 0,7 und 0,9 V (je nach der Stromdichte an der Elektrodenoberfläche von 100 mA bis 50 mA/cm²). Der Wirkungsgrad dieser Elemente liegt, da keine Wärmeverluste usw. entstehen, verhältnismäßig hoch zwischen 50 und 70 v. H. Wegen ihrer hohen Wirtschaftlichkeit und ihres geringen Wartungsbedarfs werden Brennstoffzellen zur Stromversorgung von Fernmeldeeinrichtungen eingesetzt, die weit abseits vom öffentlichen Starkstromnetz und an schwer zugänglichen Stellen betrieben werden müssen. Die DBP verwendet sie z. B. zur Stromversorgung von Fernsehfüllsendern und -umsetzern in Gebirgsgegenden. Die hierfür eingesetzten Brennstoffzellenbatterien liefern z. B. bei 24 V 100 W oder bei 12 V 50 W.

Wir fassen zusammen:

Primärelement	Spannung V	Elektroden		Elektrolyt	Depolarisator
		Plus	Minus		
Zink-Braunstein	1,5	Braunstein	Zink	Salmiaklösung	Braunstein
Luft-Sauerstoff	1,5	Kohle	Zink	Salmiak- ¹⁾ lösung	Luft-sauerstoff
Brennstoffzelle	0,8	Sauerstoff	Wasserstoff	Kalilauge	Sauerstoff

¹⁾ manchmal auch Kalilauge

3.2.4. Sekundärelemente

Sekundärelemente müssen erst aufgeladen werden, bevor sie wieder elektrische Energie abgeben können; sie können wiederholt aufgeladen und wieder entladen werden. Sekundärelemente werden auch als **Sammler** oder **Akkumulatoren**¹⁾ bezeichnet. Nach ihrem Aufbau unterscheidet man Bleisammler und alkalische Sammler.

Das Grundprinzip des Sammlers besteht darin, daß sich zwei zunächst chemisch gleichartige Elektroden in einem Elektrolyten befinden. Durch den Ladestrom wird eine chemische Umwandlung in den beiden Elektroden bewirkt, so daß aus den vorerst gleichartigen Elektroden zwei ungleichartige Elektroden entstehen. Zwischen den ungleichartigen Elektroden liegt eine elektrische Spannung; der Sammler ist geladen. Werden die beiden ungleichen Elektroden eines geladenen Sammlers über einen

Widerstand verbunden, dann fließt ein Entladestrom. Die chemische Ungleichheit der Elektroden bildet sich wieder in eine chemische Gleichheit zurück, so daß der Spannungswert sich zwischen den Elektroden vermindert; der Sammler ist wieder entladen.

Der Sammler ist beim Laden ein Verbraucher und beim Entladen ein Spannungserzeuger. Beim Laden des Sammlers muß stets die Plusklemme des Sammlers mit der Plusklemme der Ladeeinrichtung verbunden werden. Sammler können nur mit Gleichstrom aufgeladen werden.

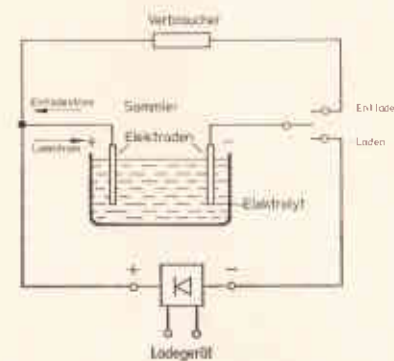


Abb. 3.17 – Sammler

3.2.4.1. Bleisammler

Ein Bleisammler besteht aus einem saurefesten Behälter aus Glas-, Hartgummi, Keramik oder dgl. Als Elektrolyt befindet sich in dem Gefäß mit destilliertem Wasser verdünnte Schwefelsäure (H₂SO₄) im Verhältnis 5 Teile Wasser auf einen Teil Schwefelsäure. In den Elektrolyten bringt man als positive bzw. negative Elektroden jeweils Bleiplatten, die durch Polbrücken zu Plattenpaketen (Plattensätzen) zusammengebaut sind. Die Anordnung ist so ausgeführt, daß sich zwischen je zwei negativen Platten eine positive Platte befindet. Dadurch hat jede Sammlerzelle grundsätzlich eine negative Platte mehr, als positive vorhanden sind (vgl. hierzu Abb. 3.18). Der Grund für diese Maßnahme liegt in der Volumenänderung

¹⁾ Akkumulator = Stromspeicher

der aktiven Masse der positiven Platten zwischen Lade- und Entladezustand. Es würden sich sonst die positiven Platten verbiegen, wenn sie nicht auf beiden Seiten von negativen Platten chemisch beeinflusst würden.

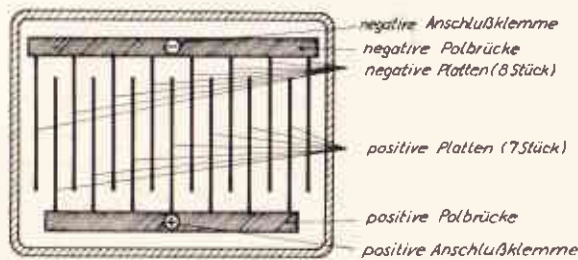


Abb. 3.18 – Plattenanordnung in einer Sammlerzelle

platten. Diese aus Weichblei gegossenen Platten sind mit einer elektrochemisch wirksamen Schicht ausgefüllt.

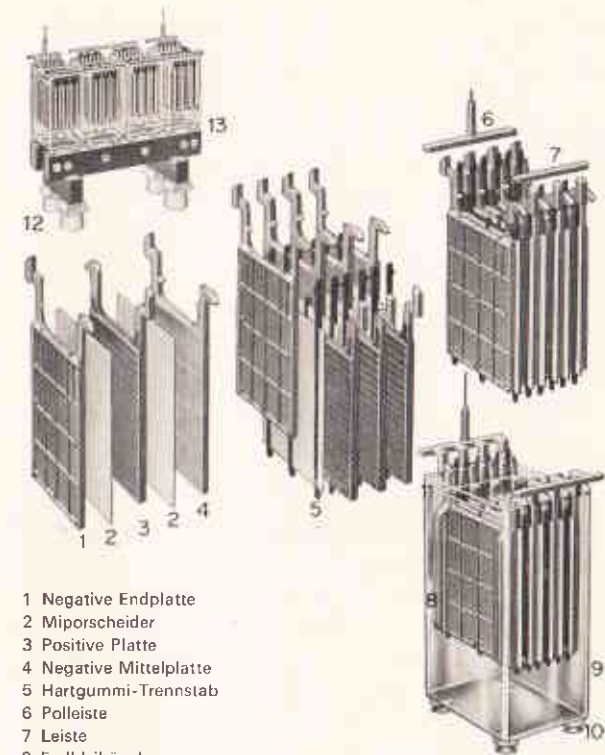
Die einzelnen Plattensätze werden in ein säurefestes Gefäß eingebracht, das bei größeren Sammlerzellen für jede Platte seitliche Führungsnuten hat, damit die Platten einen gewissen Abstand behalten und sich nicht berühren. Zwischen den Platten befinden sich sogenannte Separatoren oder Scheider. Das sind vor allem elektrolytdurchlässige Holzbrettchen oder durchlöcherter, gewellte Kunststoffplatten (Miporscheider). Sie sollen Kurzschlüsse zwischen den Platten verhindern. Das Gefäß ist außerdem so ausgebildet, daß die Platten nicht den Boden berühren. In dem Zwischenraum zwischen Platten und Gefäßboden kann sich der Schlamm herausfallender Masseteilchen absetzen, ohne die Platten miteinander zu verbinden und dadurch Kurzschlüsse zu verursachen. Er wird als Schlammraum bezeichnet (vgl. hierzu Abb. 3.19).

Die Einzelteile einer Sammlerzelle sowie die zusammengebaute Zelle und den Teil einer Akkumulatorenbatterie, wie sie in den Vermittlungsstellen Verwendung findet, zeigt Abb. 3.19.

Als Elektrolyt verwendet man mit destilliertem Wasser verdünnte Schwefelsäure, die die Platten stets voll bedecken soll (etwa 1 bis 2 cm über Plattenoberkante). Die Säuredichte ist das zuverlässigste Maß für den Lade- oder Entladezustand eines Bleisammlers. Sie muß ständig kontrolliert werden.

Im allgemeinen werden die Sammlerzellen von Firmen an Ort und Stelle aufgestellt, mit Säure gefüllt und in Betrieb genommen. Sollte jedoch einmal verdünnte Schwefelsäure angesetzt werden müssen, so ist unbedingt darauf zu achten, daß man immer nur die Säure in das destillierte Wasser gießen darf und nicht umgekehrt, weil die Lösung sonst stark spritzt und damit Kleidung und Körperteile (Augen) ge-

Die Bleielektroden sind nicht massive Bleiplatten, sondern zwecks Erreichung einer größeren Oberfläche bei kleinen Abmessungen je nach Einsatzzweck der Sammler entweder Großoberflächen-, Panzer-, Kasten- oder Gitter-



- 1 Negative Endplatte
- 2 Miporscheider
- 3 Positive Platte
- 4 Negative Mittelplatte
- 5 Hartgummi-Trennstab
- 6 Polleiste
- 7 Leiste
- 8 Endbleibügel
- 9 Glasgefäß
- 10 Gefäßisolator
- 11 Glasabdeckscheibe
- 12 Zweiteilige Gestellisolation
- 13 Fertig aufgestellte Batterie von 4 Zellen auf Holzgestell

Abb. 3.19 – Einzelteile und Aufbau einer Sammlerzelle

fährdet werden. Die Wartung der Sammlerzellen wird sich aber meistens auf die Kontrolle der Säuredichte und auf das Nachfüllen destillierten Wassers beschränken. Säure braucht nicht nachgefüllt zu werden, weil sie nicht verbraucht wird.

Das **Laden** eines Sammlers erfolgt, indem man den Pluspol der Zelle mit dem Pluspol und den Minuspol der Zelle mit dem Minuspol einer regelbaren Gleichspannungsquelle verbindet, deren Spannung größer als 2,7 V sein muß. Den Gleichstrom liefert in den meisten Fällen ein Gleichrichter, der die aus dem öffentlichen Starkstromnetz entnommene und mit Hilfe eines Transformators verminderte Wechselspannung gleichrichtet. Die Gleichrichteranlage ist mit Voltmeter und Amperemeter ausgestattet, so daß die Ladung laufend überwacht werden kann. Die Ladestromstärke



Abb. 3.20 – Spannungsverlauf beim Laden einer Bleisammlerzelle

wird von den Sammler-Herstellerfirmen vorgeschrieben und muß genau eingehalten werden. Während des Ladens steigt die Spannung pro Sammlerzelle von etwa 1,8 V (**tiefste Entladespannung**) schnell auf etwa 2,2 V und dann allmählich auf 2,4 V (vgl. hierzu Abb. 3.20). Bei dieser Spannung beginnt die Säure heftig zu gasen (**Gasungspunkt**). Das Gasen entsteht dadurch, daß von dieser Spannung an ein großer Teil des Ladestroms dazu benutzt wird, das Wasser elektrolytisch in Wasserstoff und Sauerstoff zu zersetzen. Diese Gase steigen an den Elektroden auf und entweichen. Daher muß bei Beginn der Gasung (bei 2,4 V) die Ladestromstärke auf ca. $\frac{1}{3}$ der ursprünglichen Stromstärke vermindert werden. Die Spannung steigt zum Ende der Ladung schnell auf etwa 2,7 V. Weiteres Laden ist nun zwecklos, weil die Spannung nicht weitersteigt; es würde nur eine Schädigung der Platten bewirken. Außer an einem Spannungsanstieg ist der geladene Zustand eines Bleisammlers an der Verfärbung der Platten sowie an der Säuredichte zu erkennen. Die Säuredichte wird mit einem Säuremesser (Aräometer) gemessen.

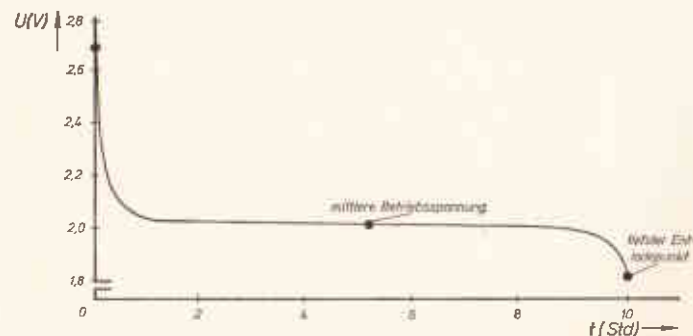


Abb. 3.21 – Spannungsverlauf beim Entladen einer Bleisammlerzelle

Bei der **Entladung** sinkt die Spannung des Sammlers schnell auf die mittlere Betriebsspannung von 2 V ab (vgl. hierzu Abb. 3.21) und bleibt dann längere Zeit gleich groß. Sinkt die Spannung auf den Tiefstwert von 1,8 V, so muß unverzüglich mit der Entladung aufgehört werden, weil sonst die Platten zerstört würden. Bei diesem Entladezustand zeigt die positive Platte eine helle braune Farbe. Die Säuredichte verringert sich. Die negative Platte wird dunkelgrau. Jetzt muß der Sammler sofort (innerhalb 24 Stdn.) wieder aufgeladen werden. Man soll Bleisammler nie längere Zeit in entladene Zustand stehenlassen, weil dann die Gefahr besteht, daß die Platten durch Bildung harten Bleisulfats unbrauchbar werden.

Der Lade- und Entladezustand eines Bleisammlers ist aus folgenden Kennzeichen ersichtlich:

Sammler	Säuredichte g/cm ³	Farbe der Platten		Zellenspannung ¹⁾ V
		Plus	Minus	
geladen	1,2	dunkelbraun	hellgrau	2,4 ²⁾
entladen	1,18	hellbraun	dunkelgrau	1,8

¹⁾ gemessen unter Belastung

²⁾ beim Erreichen des Gasungspunkts

Für den modernen „Bereitschaftsbetrieb“ für die Stromversorgungsanlagen der Vermittlungsstellen ist außer dem Betriebs-, Lade- und Entladezustand einer Bleisammlerzelle noch ein weiterer Betriebszustand bemerkenswert, den man als „**Erhaltungsladung**“ bezeichnet. Jede Bleisammlerzelle entlädt sich durch innere chemische Vorgänge selbst, auch dann, wenn sie unbelastet ist. Durch eingehende Untersuchungen wurde festgestellt, daß die ordnungsgemäße Erhaltung der Kapazität einer Zelle dann gewährleistet ist, wenn sie durch stetiges langsames Nachladen auf einem Spannungswert von 2,23 V gehalten wird.

Bei den heutigen Stromversorgungsanlagen für Vermittlungsstellen wird der Betriebsstrom über Gleichrichter dem öffentlichen Starkstromnetz entnommen. Die Akkumulatorenbatterie steht nur für den Notbetrieb bei Netzausfall in Reserve. Damit sie nun im Bedarfsfall wirklich mit ihrer vollen Kapazität zur Verfügung steht, wird sie durch die Erhaltungsladung auf dem Wert von 2,23 V je Zelle konstant gehalten.

Zusammengefaßt müssen wir damit bei Bleisammlern nachstehende wichtige Spannungen unterscheiden:

- 1,8 Volt tiefste Entladespannung,
- 2,0 Volt mittlere Betriebsspannung,

2,23 Volt	Erhaltungsladespannung.
2,4 Volt	Spannung, bei der die Gasung beginnt (Gasungspunkt),
2,7 Volt	höchste Spannung im geladenen Zustand.

3.2.4.2. Alkalische Sammler

Der **alkalische Sammler** unterscheidet sich vom Bleisammler vor allem in seinem Aufbau, in seiner Unempfindlichkeit gegen mechanische und elektrische Beanspruchung und in der Höhe seiner Spannung. Er besteht aus einem vernickelten Stahlblechgehäuse, in dem die **Elektroden aus Nickel und Eisen bzw. Kadmium** isoliert untergebracht sind. Die positive Elektrode, in einfachster Form ein vernickelter Eisengitterrahmen, enthält als aktive Masse eine Nickelverbindung und die negative Elektrode eine Eisen- oder Kadmiumverbindung. Als Elektrolyt wird **verdünnte Kalilauge** mit der Dichte $1,2 \text{ g/cm}^3$ verwendet. Zur Vergrößerung der wirklichen Oberfläche der Platten werden ebenfalls mehrere zu Plattenpaketen zusammengebaut; dabei hat das negative Plattenpaket auch eine Platte mehr als das positive.

Beim **Laden** eines alkalischen Sammlers werden Pluspol des Sammlers mit dem Pluspol der Spannungsquelle und Minuspol des Sammlers mit dem Minuspol der Spannungsquelle verbunden. Die angelegte Ladespannung beträgt etwa 2 Volt pro Zelle. Bei der Ladung verändert sich die Eisen- bzw. Kadmiumverbindung der negativen Elektrode zu reinem Eisen bzw. reinem Kadmium, während die Nickelverbindung der positiven Elektrode in eine Nickelverbindung höherer Oxydationsstufe übergeht. Die Kalilauge ändert sich bei diesem Vorgang nur unmerklich. Man kann daher beim alkalischen Sammler im Gegensatz zum Bleisammler den Ladungszustand der Zelle nicht an der Dichte des Elektrolyten erkennen. Die Spannung steigt beim Laden bis auf etwa 1,8 Volt an, sinkt dann aber schnell wieder ab. Es wird im allgemeinen mit einer mittleren Zellenbetriebsspannung von etwa 1,2 Volt gerechnet.

Bei der **Entladung** verwandelt sich durch den jetzt in entgegengesetzter Richtung fließenden Strom das Eisen bzw. Kadmium der negativen Elektrode wieder in die Eisen- oder Kadmiumverbindung zurück. Ebenso entsteht aus der höheren Oxydationsstufe der Nickelverbindung der positiven Elektrode wieder eine Verbindung niedriger Stufe. Im entladenen Zustand weist die Zelle noch eine Spannung von 1,0 Volt auf.

Die Vorteile des alkalischen Sammlers liegen in seiner großen Lebensdauer, seiner Unempfindlichkeit gegen mechanische und elektrische Überbeanspruchung, in seinem kleineren Gewicht und in seinem geringeren Wartungsbedarf. Ein Überladen ist unschädlich; auch kann er im Gegensatz zum Bleisammler nahezu unbegrenzte Zeit in ungeladenem Zustand stehenbleiben.

Moderne Ausführungen der alkalischen Sammler sind die gasdichten Zellen, z. B. die sogenannten „Knopfzellen“.

3.2.4.3. Wirkungsgrad

Auch beim Sammler ist bei Belastung die an den Klemmen zur Verfügung stehende Spannung kleiner als die im Inneren der Zelle vorhandene Ursprungsspannung. Die Ursache liegt ebenfalls in dem inneren Widerstand jeder Sammlerzelle. Dieser schwankt je nach Bauart und Größe der Bleisammlerzellen zwischen $0,01 \Omega$ bei kleinen und $0,00001 \Omega$ bei den größten Zellen. Bei den Zellen der großen Vermittlungsstellen-Batterien, die im allgemeinen aus Bleisammlern bestehen, kann er also praktisch vernachlässigt werden. Bei Stahlsammlern liegt der innere Widerstand meist etwas höher als bei Bleisammlern.

Das Fassungsvermögen an Elektrizitätsmenge oder die **Kapazität K** eines Sammlers hängt von der Oberflächengröße seiner positiven Platten ab. Sie errechnet sich als Produkt aus der **Stromstärke I in Ampere** und der **Zeit t in Stunden**:

$$K = I \cdot t \quad \text{Ah}$$

Die Kapazität wird in Amperestunden (Ah) angegeben. Die Einheit ist 1 Amperestunde ($1 \text{ Ah} = 3600 \text{ As} = 3600 \text{ C}$).

Die Kapazität ist keine konstante Größe; sie hängt von der Entladestromstärke ab. Je stärker der Entladestrom ist, um so kleiner ist die Kapazität eines Sammlers. Die Herstellerfirmen geben deshalb die Kapazität für eine bestimmte Entladedauer an (z. B. „60 Ah zehnstündig“), d. h., bei 10stündiger Entladedauer kann man der Batterie 60 Ah entnehmen; der Entladestrom darf hierbei nicht stärker als 6 A sein.

Bei der Aufladung eines Sammlers hat er bei einer bestimmten Ladestromstärke I_L innerhalb der Ladezeit eine gewisse Elektrizitätsmenge aufgenommen; dem Sammler sind Amperestunden zugeführt worden. Vergleicht man die vom Sammler abgegebenen Amperestunden $I_E \cdot t_E$ mit den ihm zugeführten Amperestunden $I_L \cdot t_L$, so stellt man fest, daß die abgegebenen Amperestunden immer geringer sind als die aufgenommenen. Das Verhältnis der beiden Werte zueinander ist der **Gütefaktor** (Amperestundenwirkungsgrad) des Sammlers:

$$\eta_{\text{Ah}} = \frac{\text{Entlade-Ah}}{\text{Lade-Ah}} = \frac{I_E \cdot t_E}{I_L \cdot t_L}$$

Der Gütefaktor eines Bleisammlers liegt etwa bei 0,95 und der eines alkalischen Sammlers bei etwa 0,70 bis 0,75.

Die Entladekapazität K_E wird allgemein als die Nennkapazität des Sammlers bezeichnet. Sie ist immer niedriger als die Ladekapazität K_L . Die Verluste entstehen durch die Zersetzung des Wassers beim Gasen und durch die bei den chemischen Umwandlungsprozessen entstehende Wärme.

Das Verhältnis der tatsächlich abgegebenen Energie zur aufgenommenen Energie wird durch den **Wattstundenwirkungsgrad** angegeben. Der Wattstundenwirkungsgrad ergibt sich aus dem Amperestundenwirkungsgrad, indem die durchschnittlichen Werte von Lade- und Entladespannung berücksichtigt werden ($\text{Ah} \cdot \text{V} = \text{Wh}$). Er errechnet sich:

$$\eta_{\text{Wh}} = \frac{\text{abgegebene Wh}}{\text{aufgenommene Wh}} = \frac{W_{\text{ab}}}{W_{\text{zu}}} = \frac{I_E \cdot t_E \cdot U_E}{I_L \cdot t_L \cdot U_L}$$

Der Wattstundenwirkungsgrad ist immer kleiner als der Amperestundenwirkungsgrad. Bei Bleisammlern beträgt er etwa 0,75, bei alkalischen Sammlern etwa 0,6.

Beispiel:

Ein Bleisammler mit der Nennkapazität von 120 Ah wird mit einem Ladestrom von $I_L = 12 \text{ A}$ während der Ladezeit von $t_L = 13 \text{ h}$ aufgeladen. Die an dem Sammler liegende Ladespannung hat einen Durchschnittswert von $U_L = 2,3 \text{ V}$. Dem Bleisammler wird während der Entladezeit von $t_E = 20 \text{ h}$ eine Stromstärke von $I_E = 6 \text{ A}$ entnommen bei einer durchschnittlichen Klemmenspannung von $U_E = 2,02 \text{ V}$. Wie groß sind Amperestunden- und Wattstundenwirkungsgrad des Sammlers?

Gegeben: $K_E = 120 \text{ Ah}$; $I_L = 12 \text{ A}$; $t_L = 13 \text{ h}$; $U_L = 2,3 \text{ V}$; $t_E = 20 \text{ h}$; $I_E = 6 \text{ A}$; $U_E = 2,02 \text{ V}$

Gesucht: η_{Ah} ; η_{Wh}

Lösung: $K_L = I_L \cdot t_L = 12 \text{ A} \cdot 13 \text{ h} = \underline{156 \text{ Ah}}$

$$\eta_{\text{Ah}} = \frac{K_E}{K_L} = \frac{120 \text{ Ah}}{156 \text{ Ah}} = \underline{0,769}$$

$$W_{\text{zu}} = U_L \cdot I_L \cdot t_L = 2,3 \text{ V} \cdot 12 \text{ A} \cdot 13 \text{ h} = \underline{359 \text{ Wh}}$$

$$W_{\text{ab}} = U_E \cdot I_E \cdot t_E = 2,02 \text{ V} \cdot 6 \text{ A} \cdot 20 \text{ h} = \underline{242 \text{ Wh}}$$

$$\eta_{\text{Wh}} = \frac{W_{\text{ab}}}{W_{\text{zu}}} = \frac{242 \text{ Wh}}{359 \text{ Wh}} = \underline{0,674}$$

Die Sammlerwirkungsgrade betragen: $\eta_{\text{Ah}} = 0,769$, $\eta_{\text{Wh}} = 0,674$.

Wir fassen zusammen:

Sammler	Elektroden		Elektrolyt	Betriebs-Zellen-spannung in V	Wirkungs-grad	
	Plus	Minus			Ah	Wh
Bleisammler	Blei-masse	Blei-masse	verdünnte Schwefel-säure	2,0	0,95	0,75
Alkalischer Sammler	Nickel	Kad-mium	Kalilauge	1,2	0,75	0,6

Zusammenstellung der Größen des elektrischen Stromkreises

Begriff	Formel-zeichen	Einheit		Größengleichung
		Benennung	Kurz-zeichen	
Elektrische Stromstärke	I	Ampere	A	$I = \frac{U}{R}$ A
Elektrische Spannung	U	Volt	V	$U = I \cdot R$ V
Elektrischer Widerstand	R	Ohm	Ω	$R = \frac{U}{I}$ Ω
Elektrischer Leitwert	G	Siemens	S	$G = \frac{1}{R}$ S
Elektrizitäts-menge	Q	Coulomb	C	$Q = I \cdot t$ C
Leiter-widerstand	R_L	Ohm	Ω	$R = \frac{l \cdot \rho}{A}$ Ω
Widerstand und Temperatur	R_t	Ohm	Ω	$R_t = R_{20}(1 + \alpha \cdot \Delta t)$ Ω
Leerlauf-spannung	U_o	Volt	V	$U_o = U + U_i$ V
Elektrische Arbeit	W	Joule	J	$W = P \cdot t$ J
Elektrische Leistung	P	Watt	W	$P = U \cdot I$ W
Stromdichte	S	Ampere pro mm^2	A/mm^2	$S = \frac{I}{A}$ $\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$
Faradaysches Gesetz	m	Kilogramm	kg	$m = I \cdot c \cdot t$ kg

4. Das elektrische Feld

4.1. Die elektrische Ladung

Im Abschnitt 1.1 dieses Bandes haben wir den Begriff der elektrischen Ladung kennengelernt. Wir wissen, daß man bei Elektronenüberschuß von einer **negativen Ladung** und bei Elektronenmangel von einer **positiven Ladung** spricht.



Abb. 4.1 – Polaritätsbestimmung

Die Polarität einer Ladung kann man bei hohen Spannungen mit einem geerdeten Neonröhren feststellen, mit dem zu diesem Zweck die zu prüfende Ladung berührt wird (vgl. hierzu Abb. 4.1). Dabei leuchtet dann die Umgebung der Elektrode auf, aus der Elektronen austreten.

Glimmt also beim Berühren einer elektrischen Ladung die geerdete Elektrode des Neonröhrens auf (vgl. hierzu Abb. 4.1, links), so fließen Elektronen von der Erde zur Ladung; die Ladung war positiv. Glimmt dagegen die mit der Ladung verbundene Elektrode des Neonröhrens auf (rechte Abb.), so fließen Elektronen von der Ladung zur Erde; die Ladung war negativ.

4.2. Das elektrische Potential

Mit Potential bezeichnet man die Spannung zwischen einer elektrischen Ladung und einem Bezugspunkt, der das Potential Null hat. Häufig wird die Erdoberfläche, oft aber auch das Apparatgehäuse oder eine willkürlich gewählte Fläche als Bezugspunkt für das Potential benutzt. Die Differenz der Potentiale zweier Punkte mit gemeinsamer Bezugsfläche nennt man Potentialdifferenz oder Potentialgefälle. Dieses **Potentialgefälle** (der Druckunterschied zwischen den betrachteten Punkten) ist die **elektrische Spannung**.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Potential	$\varphi^1)$	V (Volt)

¹⁾ φ = griechischer Buchstabe Phi

In der Abb. 4.2 sind z. B. drei Körper dargestellt, die ein Potential von +300 V, -200 V und -100 V gegen Erde haben. Die eingezeichneten Voltmeter zeigen diese Potentiale bzw. die Spannungen zwischen den Körpern an.

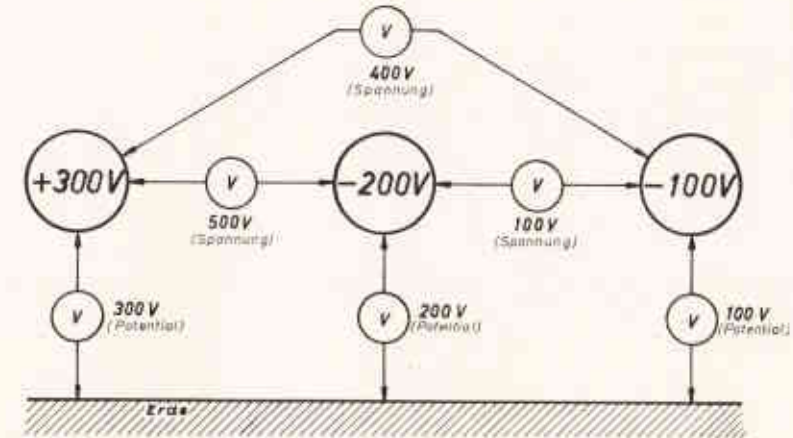


Abb. 4.2 – Elektrisches Potential

Eine Spannung kann nur zwischen zwei Körpern mit verschiedenem Potential vorhanden sein.

Beispiel:

In einer Fernmeldeschaltung weist ein Schaltungspunkt A ein elektrisches Potential von $\varphi_A = -6,3$ V gegen Erde und ein anderer Schaltungspunkt B ein elektrisches Potential von $\varphi_B = +7,6$ V gegen Erde auf. Wie groß ist die elektrische Spannung zwischen den beiden Schaltungspunkten A und B?

Gegeben: $\varphi_A = -6,3$ V; $\varphi_B = +7,6$ V

Gesucht: U

Lösung: $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = -6,3$ V - (+7,6 V) = -6,3 V - 7,6 V
 $U_{AB} = -13,9$ V

Das bedeutet, daß der Punkt A um 13,9 V negativer ist als der Punkt B. Diese Spannungsangabe kann auch in anderer Schreibweise angegeben werden:

$U_{AB} = -13,9$ V ist gleichbedeutend mit $-U_{AB} = +13,9$ V = 13,9 V
 $U_{BA} = +13,9$ V ist gleichbedeutend mit $-U_{BA} = -13,9$ V

Beachten Sie hierbei, daß der Bezugspunkt für die Spannungsangabe stets der letztgenannte Buchstabe des Indexes ist.

Die elektrische Spannung zwischen den Punkten A und B beträgt:

$U_{AB} = -13,9$ V, $-U_{AB} = 13,9$ V; $U_{BA} = 13,9$ V, $-U_{BA} = -13,9$ V.

4.3. Das elektrische Feld

In Nichtleitern (Isolatoren) verursacht eine elektrische Spannung lediglich eine geringe gerichtete Verschiebung der an den Atomkern gebundenen Elektronen (vgl. hierzu Abschn. 4.7). Bei konstanter Spannung findet jedoch **keine ständige gerichtete Elektronenbewegung** im Isolator statt. In diesem Zusammenhang spricht man daher von der **ruhenden Elektrizität** oder **statischen Elektrizität** (Elektrostatik). Der Raum, in dem elektrische Kräfte diese Verschiebung verursacht haben, wird **elektrostatisches Feld** oder kurz **elektrisches Feld** genannt.

Elektrostatische Felder treten nur in Nichtleitern auf.

Bei sehr großen Spannungen können die bindenden Kräfte zwischen Atomkern und Elektronen jedoch überwunden werden. Es kommt dann zu einem „Durchschlag“, bei dem die elektrischen Ladungen sich in Form eines Funkens ausgleichen. Wenn dieser Funke entlang der Oberfläche eines Isolators verläuft, spricht man auch von einem „Überschlag“.

Elektrische Felder sind nicht sichtbar. Mit Hilfe einer Anordnung nach Abb. 4.3 kann man sie aber nachweisen, weil leichte Körper sich in Richtung dieses Kraftfeldes einstellen. Bei diesem Versuch befinden sich in einem Glasgefäß, das mit Rizinusöl gefüllt ist, zwei Elektroden. Werden nun Grießkörner in das Glasgefäß gestreut und durch Umrühren gleich-

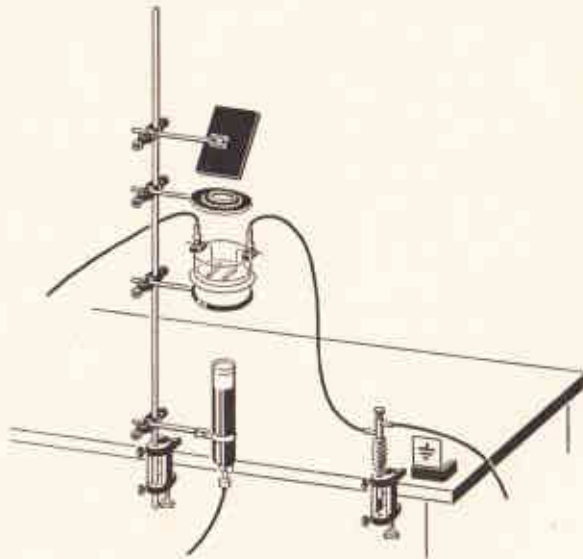


Abb. 4.3 – Elektrisches Feld

mäßig verteilt und wird anschließend eine Gleichspannung von einigen 1000 V (Bandgenerator) an die Elektroden gelegt, dann ergeben sich mit Hilfe einer Projektionseinrichtung die in den Abb. 4.4 bis 4.6 dargestellten Bilder. Die in diesen Bildern zu erkennenden Linien nennt man **elektrische Feldlinien**. Sie geben die Richtung im Raum an, in der elektrische Kräfte wirksam sind.

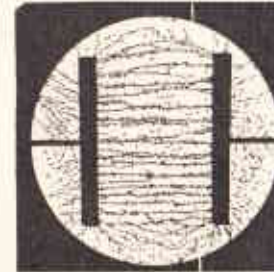


Abb. 4.4 – Elektrisches
Feld

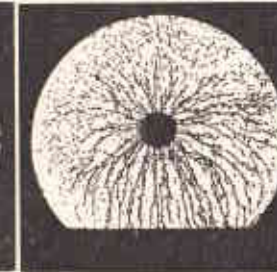


Abb. 4.5 – Elektrisches
Feld

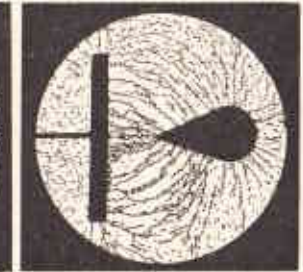


Abb. 4.6 – Elektrisches
Feld

Der Raum, in dem elektrische Feldlinien vorhanden sind, heißt „elektrisches Feld“. Die Feldlinien treten immer senkrecht aus einem positiven Leiter heraus und enden senkrecht eintretend auf dem negativen Leiter.

Das elektrische Feld zwischen zwei parallelen Platten (vgl. hierzu Abb. 4.4) bezeichnet man als **homogen** (gleichförmig) und die in den Abb. 4.5 und 4.6 dargestellten Felder als **inhomogen** (ungleichförmig). In einem homogenen elektrischen Feld verlaufen die Feldlinien parallel.

Bei der Abb. 4.6 ist zu erkennen, daß die Feldlinien an der Spitze der rechten Elektrode besonders dicht sind. Die Feldliniendichte ist also dort sehr groß, wo die Elektrodenoberfläche besonders stark gekrümmt ist.

Wenn man einer geladenen Elektrode eine Metallkugel nähert, so wird sich das elektrische Feld nicht verändern. Nimmt man statt dessen aber eine Metallspitze, so bricht das elektrische Feld zusammen. Die Spitze saugt die elektrische Ladung ab. Auf dieser **Spitzenwirkung** beruht die Wirkungsweise des Blitzableiters.

In einem weiteren Versuch wollen wir die Kraftwirkung in einem elektrischen Feld beobachten (vgl. hierzu Abb. 4.7).

Zwischen zwei Platten befindet sich eine leichte metallisierte Kugel, die isoliert aufgehängt worden ist (linke Abb.). Werden die Platten kurzzeitig ungleichnamig aufgeladen und erhält die Kugel eine positive elektrische Ladung, so bewegt sie sich zur negativen Feldgrenze hin (mittlere Abb.), wo ein Ladungsaustausch erfolgt. Die Kugel erhält eine negative Ladung und bewegt sich zur positiven Feldgrenze hin

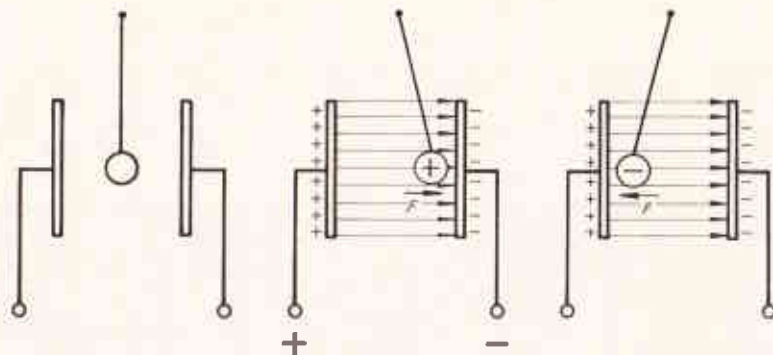


Abb. 4.7 – Kraftwirkung

(rechte Abb.). Hier erfolgt abermals ein Ladungsaustausch, worauf die Kugel sich wieder zur anderen Seite hinbewegt. Dieser Vorgang wiederholt sich bis zur Erschöpfung des Feldes.

In einem elektrischen Feld stellen wir also eine Kraftwirkung fest.

In einem von elektrischen Feldlinien angefüllten Raum, einem elektrischen Feld, wird auf einen elektrisch geladenen Körper eine Kraft ausgeübt.

4.4. Die elektrische Feldstärke

Die an irgendeiner Stelle eines elektrischen Feldes festgestellte „Spannung je m Feldlinienlänge“ nennt man elektrische Feldstärke.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Elektrische Feldstärke	E	$\frac{\text{V}}{\text{m}}$

Wenn U die Spannung in Volt und l die Länge der Feldlinien in m zwischen den betrachteten Punkten ist, so ergibt sich die Feldstärke nach der Formel:

$$E = \frac{U}{l} \quad \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

(Eine Zusammenstellung der Größen des elektrischen Feldes finden Sie am Schluß dieses Abschnitts.)

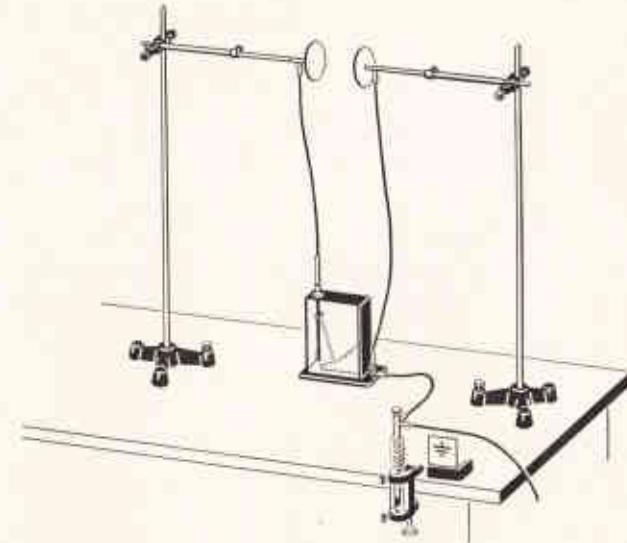


Abb. 4.8 – Feldstärke und Plattenabstand

Die elektrische Feldstärke gibt die Größe der Kraft an, die in einem elektrischen Feld ausgeübt wird. Sie ist in einem homogenen elektrischen Feld überall gleich groß.

Der in der Abb. 4.8 dargestellte Versuch soll uns das Verhalten der Feldstärke bei einer Änderung des Abstands zwischen den Feldgrenzen zeigen.

An die einander gegenüberstehenden Platten (Leiter) legen wir eine hohe Gleichspannung (Bandgenerator). Das an die Platten geschaltete Elektrometer zeigt einen Ausschlag. Nun unterbrechen wir die Zuführung zur Spannungsquelle und betrachten das Elektrometer. Wir sehen, daß auch jetzt noch zwischen den Platten eine Spannung vorhanden ist, weil das Elektrometer immer noch einen Ausschlag hat. Vergrößern wir jetzt den Abstand der Platten, ohne jedoch die Spannung wieder anzulegen, so wird das Elektrometer seinen Ausschlag ebenfalls vergrößern. Stellen wir den ursprünglichen Plattenabstand wieder her, so geht auch der Ausschlag des Elektrometers wieder auf seinen Anfangswert zurück.

Wir haben festgestellt, daß bei einer Änderung des Abstands zwischen zwei elektrisch geladenen Platten (Elektroden) die Feldstärke sich nicht verändert. Die Spannung zwischen den Platten und der Abstand der Platten ändern sich in gleicher Weise.

Ein weiterer Versuch soll uns den Verlauf der Spannung innerhalb des elektrischen Feldes zeigen (vgl. hierzu Abb. 4.9).

Zwischen den beiden Platten P_1 und P_2 besteht ein von einer angelegten Spannung abhängiges elektrisches Feld. Ein an P_1 und P_2 angeschlossenes Elektrometer zeigt

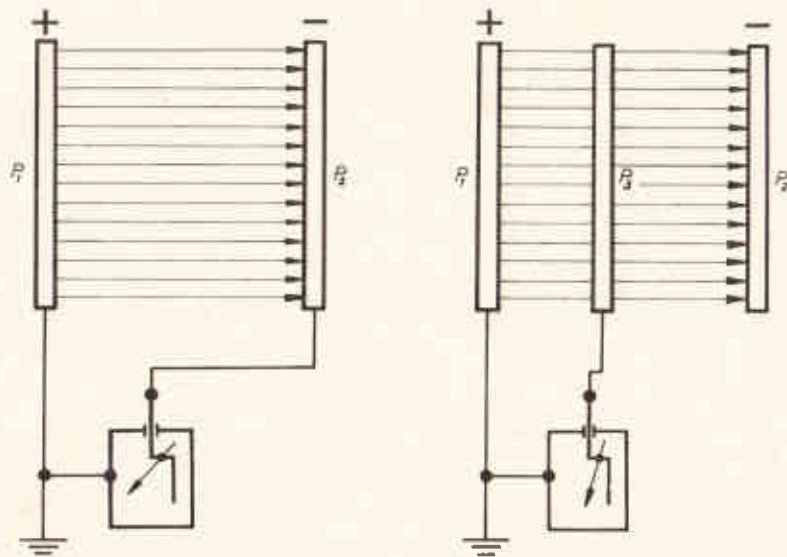


Abb. 4.9 – Spannungsverlauf im elektrischen Feld

einen bestimmten Ausschlag (linke Abb.). Jetzt bringen wir in das Feld eine weitere Platte P_3 und schalten das Elektrometer an P_1 und P_3 (rechte Abb.). Der Ausschlag bestätigt, daß auch zwischen P_1 und P_3 eine Spannung vorhanden ist. Je näher wir mit P_3 an P_1 herankommen, um so geringer wird der Ausschlag des Elektrometers, bis bei Berührung der beiden Platten kein Ausschlag mehr festzustellen ist. Berühren sich jedoch P_3 und P_2 , so zeigt das Elektrometer den gleichen Ausschlag, wie es ihn vor dem Einbringen von P_3 gezeigt hat.

Wir sehen, daß zwischen allen Punkten des elektrischen Feldes und der geerdeten Platte P_1 eine Spannung vorhanden ist, die ihren höchsten Wert zwischen der geerdeten Platte und P_2 hat. Man spricht auch hier von einem Spannungsabfall (vgl. hierzu Abschn. 2.4.1). Damit soll zum Ausdruck gebracht werden, daß die Spannung im elektrischen Feld von ihrem Höchstwert auf den Wert Null abfällt. In einem homogenen Feld verläuft der Spannungsabfall geradlinig.

Beispiel:

Die zwei Beläge eines Kondensators liegen an einer Gleichspannung von $U = 500 \text{ V}$; der Plattenabstand ist $l = 0,2 \text{ mm}$. Wie groß ist die elektrische Feldstärke zwischen den Belägen?

Gegeben: $U = 500 \text{ V}$; $l = 0,2 \text{ mm}$

Gesucht: E

$$\text{Lösung: } E = \frac{U}{l} = \frac{500 \text{ V}}{0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = \frac{500000}{0,2} \frac{\text{V}}{\text{m}} = \frac{5000}{2} \frac{\text{kV}}{\text{m}} = \underline{\underline{2500 \text{ kV/m}}}$$

Die elektrische Feldstärke im Isolierstoff beträgt $E = 2,5 \text{ MV/m}$.

4.5. Die elektrische Influenz

Elektrizität kann nicht nur durch Berühren von einem Leiter auf einen anderen Leiter übertragen werden. Ein elektrisch ungeladener (neutraler) Körper kann auch durch Annäherung so beeinflusst werden, daß er selbst elektrisch geladen wird. Diese Erscheinung nennt man elektrische Influenz.

Nähert man z. B. einen negativ geladenen Körper einem isoliert aufgestellten ungeladenen Leiter, so werden auf dem Leiter die freien Elektronen von dem negativ geladenen Körper abgestoßen. Auf der dem negativ geladenen Körper zugewendeten Seite des Leiters entsteht dadurch ein Elektronenmangel (positive Ladung). Auf der abgekehrten Seite ist nunmehr Elektronenanhäufung (negative Ladung). Dieser Zustand besteht so lange, wie die Annäherung dauert.

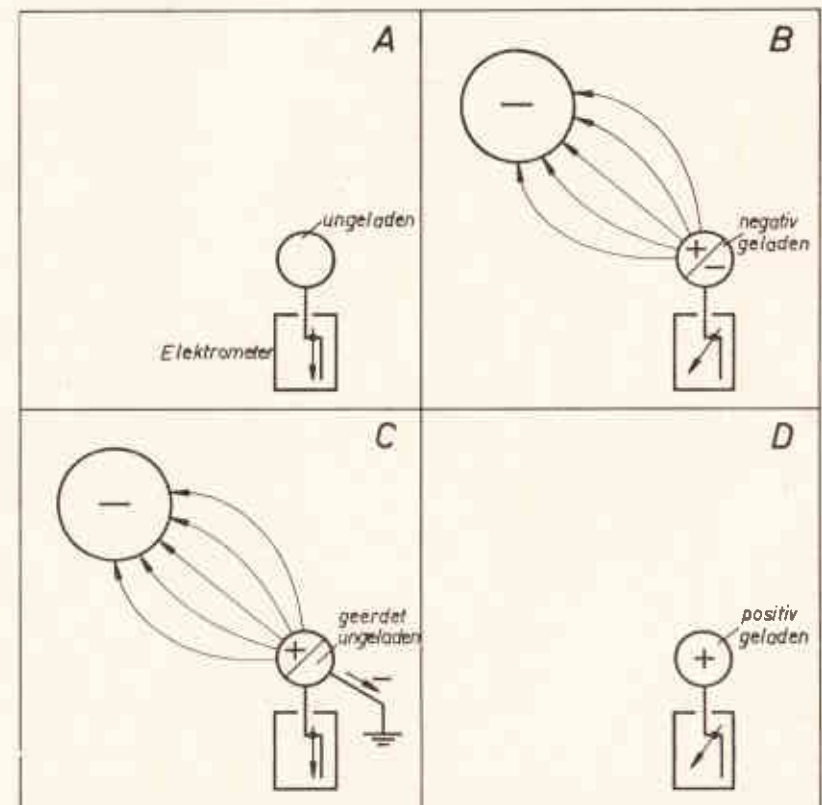


Abb. 4.10 – Elektrische Influenz

In der Abb. 4.10 erhält ein zunächst ungeladener Leiter (kleine Metallkugel) durch Annäherung einer elektrischen Ladung (große Metallkugel) einen positiven und einen negativen Pol. Man sagt, der Leiter wird **polarisiert**. Ein Elektrometer zeigt das Potential der abgestoßenen (hier negativen) Ladung an (Abb. 4.10 B). Wird nun der polarisierte Leiter kurz geerdet, so wird die nicht gebundene (nicht angezogene) negative Ladung abgestoßen (zur Erde abgeleitet); der Ausschlag des Elektrometers geht zurück (Abb. 4.10 C). Entfernt man nun die beeinflussende (influenzierende) Ladung, so kann sich die bisher gebundene positive Ladung wieder ausbreiten. Der Leiter ist positiv geladen. Das Elektrometer zeigt das Potential der positiven Ladung an (Abb. 4.10 D).

Wir sehen, daß bei einer durch Influenz bewirkten Ladungstrennung durch kurzzeitiges Erden (Abfluß) und anschließender Freigabe der gebundenen Ladung auf dem beeinflussten Leiter eine Ladung zurückbleibt. Leitet man diese Ladung ebenfalls ab, dann ist der Körper wieder elektrisch neutral.

Auch der in der Abb. 4.11 dargestellte Versuch beweist, daß in einem Leiter, der sich in einem elektrischen Feld befindet, die freien Elektronen verschoben werden.

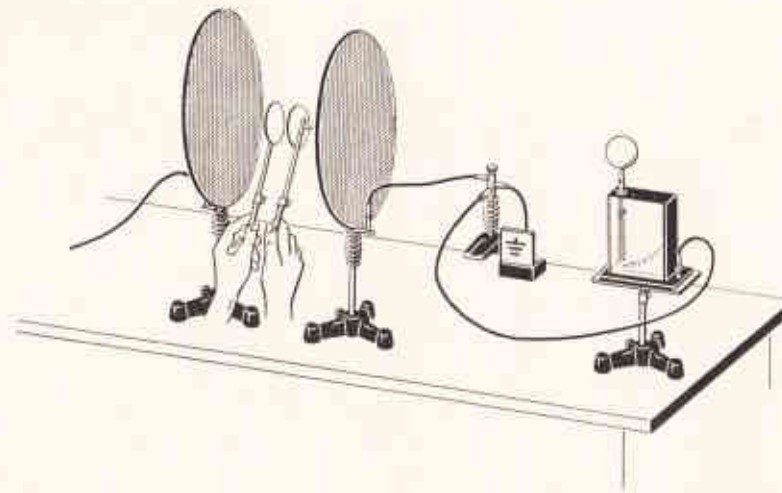


Abb. 4.11 – Ladungstrennung

Zwei sich innig berührende Metallplatten befinden sich in einem elektrischen Feld. Nach einiger Zeit trennen wir noch innerhalb des elektrischen Feldes die beiden Metallplatten voneinander und nehmen sie dann aus dem Feld heraus. Wir berühren mit der einen Platte ein Elektrometer und stellen einen Ausschlag fest; die Platte hat also ein Potential. Jetzt berühren wir das Elektrometer mit der anderen Platte, der Zeiger geht auf Null zurück; die zweite Platte hat ebenfalls ein Potential, aber es ist dem der ersten entgegengesetzt.

Bevor wir die Metallplatten in das elektrische Feld gebracht haben, waren ihre Ladungen noch gleichmäßig verteilt und so nach außen unwirksam; die Platten waren elektrisch neutral. Die im elektrischen Feld auf die Ladungen der Platten wirkenden Kräfte zwingen die freien Elektronen, dem Zug des elektrischen Feldes zu folgen. Dadurch tritt, da die innige Berührung praktisch die beiden Platten zu einem Körper vereinigte, auf der einen Seite ein Elektronenmangel (positive Ladung) und auf der anderen Seite ein Elektronenüberschuß (negative Ladung) auf (vgl. hierzu Abb. 4.12). Trennen wir die Platten noch im elektrischen Feld voneinander, behalten sie ihre Ladungen bei, wie wir es an dem Elektrometerschlag erkennen können.

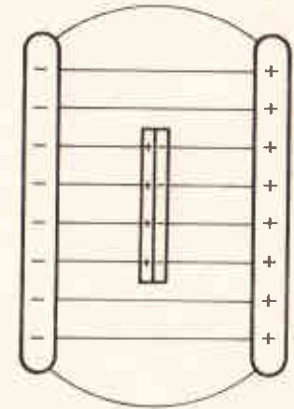


Abb. 4.12 – Elektrische Influenz

Influenz ist die Beeinflussung eines isolierten neutralen Leiters durch ein elektrisches Feld. Dabei werden die vorhandenen elektrischen Ladungen getrennt und nach außen wirksam.

Die **freien Ladungen** eines Leiters befinden sich an seiner Oberfläche (Außenwand). Dies ist eine Folge der zwischen den einzelnen gleichnamigen Ladungen wirkenden abstoßenden Kräfte.

4.6. Die elektrische Schirmwirkung

Durch Influenz können in oberirdisch verlegten Leitungen Ladungen erzeugt werden, die sich störend und gefährdend bemerkbar machen.

Unterirdisch verlegte Kabel können durch Influenz nicht von äußeren Feldern beeinflusst werden, weil die elektrischen Felder an der Erdoberfläche enden.

Mit dem in der Abb. 4.13 schematisch dargestellten Versuch soll die Schirmwirkung von Metallen im elektrischen Feld untersucht werden.

Der mit einem Elektrometer verbundene Leiter C wird in die Nähe des positiv geladenen Leiters A gebracht. Das Elektrometer schlägt aus. Bringen wir nun den nicht geerdeten Leiter B zwischen die Leiter A und C, so ändert sich der Ausschlag des Elektrometers nicht. Erden wir jedoch den Leiter B, so geht der Ausschlag des Elektrometers zurück.

Wir haben gesehen, daß elektrische Leiter sich bis zu einem bestimmten Grade durch einen **geerdeten** Leiter abschirmen lassen. Durch die Erdverbindung wird die in dem Leiter nicht gebundene elektrische Ladung

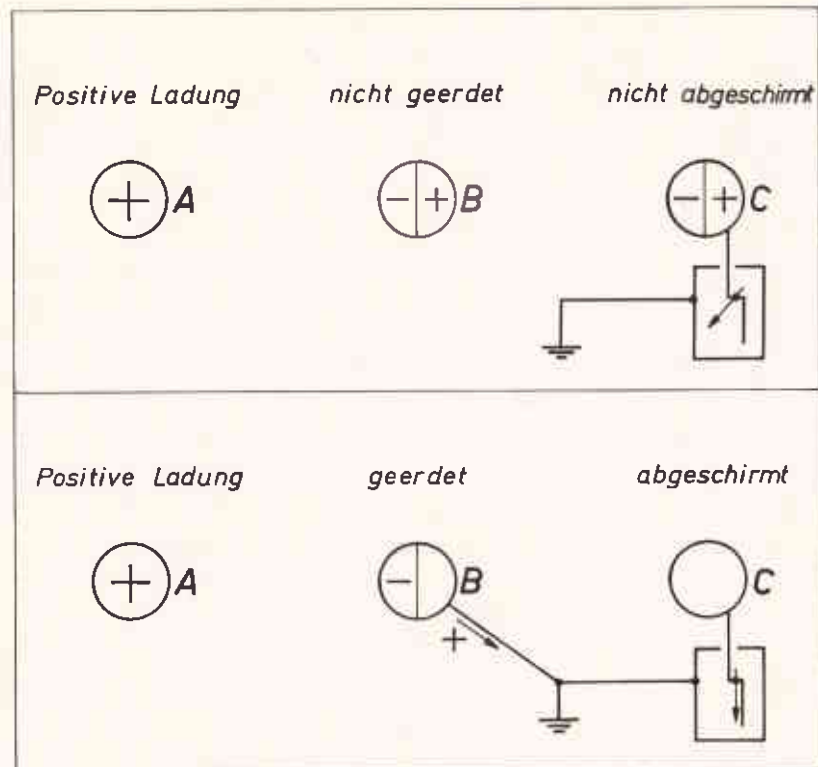


Abb. 4.13 – Elektrischer Schirm

abgestoßen. Der geerdete Leiter erscheint nach außen unelektrisch. Man sagt, er hat das Potential Null gegen Erde. Auch in der Nähe des geerdeten Leiters ist das Potential (also die Spannung gegen Erde) annähernd gleich Null. Das Potential steigt ja mit größer werdendem Abstand von der Erde (vgl. hierzu Abb. 4.9 „Spannungsverlauf im elektrischen Feld“). Im „abgeschirmten“ Leiter, der sich in der Nähe des geerdeten Leiters befindet, sind somit nur geringe durch Influenz erzeugte Spannungen gegen Erde möglich.

Zur Abschirmung kann man auch eine **metallische Umhüllung** bzw. einen Blech- oder Drahtkäfig verwenden. Wird ein solcher **Faradayscher Käfig**¹⁾ in ein elektrisches Feld gebracht, so bleibt das Innere dieses Käfigs feldfrei. Aus diesem Grunde bieten bekanntlich Kraftfahrzeuge mit einer Ganzstahlkarosserie einen guten Schutz gegen Blitzeinschläge.

¹⁾ Faraday = englischer Physiker (1791–1867)

4.7. Kondensator

4.7.1. Aufbau und Wirkungsweise

Ein Kondensator ist eine Anordnung zum Speichern von elektrischer Energie. Er besteht aus zwei elektrisch leitenden Flächen, den **Belägen**, die durch eine isolierende Zwischenschicht getrennt sind. Diese Zwischenschicht, das **Dielektrikum**, kann aus Luft, aber auch aus Papier, Kunststoffen, Porzellan, Glimmer oder anderen Stoffen bestehen. Auch zwei gegeneinander isolierte Leitungen (Kabeladern, Freileitungen) bilden einen Kondensator.

Werden die leitenden Flächen eines Kondensators an eine elektrische Spannung gelegt, so nehmen sie eine elektrische Ladung auf und speichern sie. Durch diese „Aufladung“ erhalten die leitenden Flächen also eine bestimmte Elektrizitätsmenge $+Q$ bzw. $-Q$. Die dadurch am Kondensator entstehende Potentialdifferenz (Spannung) ist der anliegenden Spannung entgegengerichtet. Der Zufluß an Elektrizitätsmenge dauert nun so lange, bis die Gegenspannung des Kondensators der anliegenden Spannung das Gleichgewicht hält.

Mit dem Entstehen der Gegenspannung bildet sich im Dielektrikum ein elektrisches Feld (vgl. hierzu Abb. 4.14). Die im elektrischen Feld wirkenden Kräfte verursachen dabei eine sogenannte dielektrische Verschiebung. Man versteht darunter eine elastische Beanspruchung des Isoliermaterials, wobei sich die einzelnen Elektrizitätsteilchen (positiver Atomkern, negative Elektronen) innerhalb des Atomverbandes gegeneinander

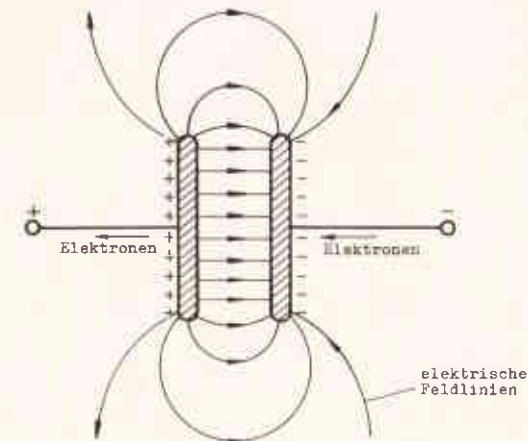


Abb. 4.14 – Elektrisches Feld zwischen zwei parallelen Platten

verschoben. Ein auf diese Weise polarisiertes Atom bezeichnet man auch als „Dipol“ (Zweipol). Eine vereinfachte Darstellung dieser Polarisation zeigt Abb. 4.15.

Durch die Verschiebung der Elektrizitätsteilchen treten innerhalb des Atomverbandes elastische Gegenkräfte auf, die versuchen, die Elektrizitätsteilchen wieder in ihre ursprüngliche Lage zurückzuziehen. Sind diese Gegenkräfte so groß geworden, daß sie der angelegten Spannung gerade das Gleichgewicht halten, dann hört die Verschiebung auf, der Kondensator wird nicht weiter aufgeladen. Soll der Kondensator noch weitere elektrische Energie aufnehmen, so muß die angelegte Spannung vergrößert werden.

Je höher die Ladespannung, desto größer ist die Elektrizitätsmenge, die ein Kondensator aufnimmt.

Während der Verschiebung findet eine gerichtete Bewegung der Elektronen statt, d. h., es fließt ein elektrischer Strom, der **Ladestrom**. Wird der Kondensator wieder entladen, d. h., die gespeicherten elektrischen Ladungen erhalten die Möglichkeit, sich auszugleichen, dann fließt so lange ein entgegengesetzt gerichteter Entladestrom, bis die Verschiebung im Dielektrikum rückgängig gemacht wurde.

Man sieht, daß die dielektrische Verschiebung dem mechanischen Spannen einer Gummischnur entspricht. Dieser Vergleich mit der Gummischnur geht noch weiter. Wird die Gummischnur überspannt, dann zerreißt sie. Diesem Zerreißen entspricht im elektrischen Feld der **Durchschlag**. Wird das Dielektrikum durch eine zu große elektrische Feldstärke beansprucht, dann können die bindenden Kräfte zwischen Atomkern und Elektronen überwunden werden. Die Elektrizitätsteilchen werden aus dem Atomverband herausgerissen und die elektrischen Ladungen gleichen sich in Form eines Funkens aus. Als Kennzeichen für die elektrische Festigkeit des Isoliermaterials wird die Feldstärke, bei der der Durchschlag erfolgt, **Durchschlagsfestigkeit** genannt. Die Durchschlagsfestig-

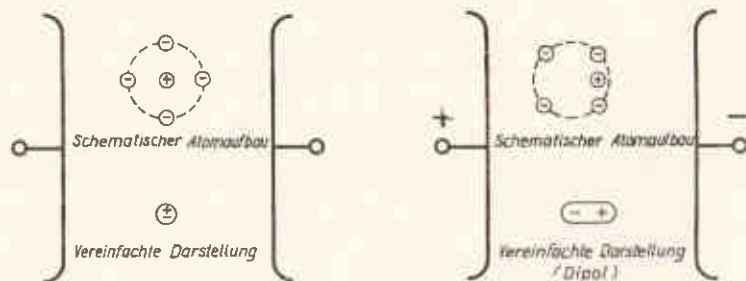


Abb. 4.15 – Polarisation im Dielektrikum

keit ist keine konstante Größe. Sie hängt u. a. von der Temperatur des Materials, von der Dicke des Materials, von der Form der Elektroden und von der Dauer der Einwirkung ab.

Einige Kondensatoren besitzen eine sogenannte selbstheilende Eigenschaft. So ist z. B. beim **Metall-Papier-Kondensator (MP-Kondensator)** der Metallbelag (Zink) durch Aufdampfen unmittelbar auf das als Dielektrikum verwendete Papier aufgebracht. Dieser sehr dünne Metallbelag verdampft bei einem Durchschlag des Kondensators in der Umgebung der Durchschlagsstelle. Dadurch wird ein Berühren der Metallschichten vermieden, so daß der Kondensator nach dem Durchschlag weiter betriebsfähig ist (vgl. hierzu Abb. 4.16).

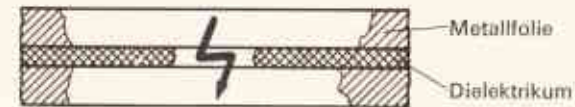


Abb. 4.16 – Durchschlag beim MP-Kondensator

Der **Elektrolytkondensator** weicht in Aufbau und Wirkungsweise von den übrigen Kondensatoren ab. Er hat bei verhältnismäßig kleinem Raumbedarf eine besonders große Kapazität (bis mehrere 1000 μF). Dafür müssen allerdings größere Verluste und eine geringere Konstanz in Kauf genommen werden.

Elektrolytkondensatoren werden neben anderen Ausführungsformen als Wickelkondensatoren hergestellt. An die Stelle des Papiers als Dielektrikum tritt jedoch eine auf elektrolytischem Wege hergestellte sehr dünne isolierende Oxidschicht (etwa 10^{-4} mm = 0,1 μm). Der Kondensator besteht im einzelnen aus zwei Aluminiumfolien, und zwar einer Aluminiumanode, die eloxiert ist, und einer blanken Aluminiumkatode. Die **Eloxalschicht** (elektrisch oxydiertes Aluminium) der Al-Anode dient als Dielektrikum. Infolge ihrer außerordentlich geringen Stärke und ihrer hohen Dielektrizitätszahl von $\epsilon_r \sim 8$ besitzt der Elektrolytkondensator eine verhältnismäßig große Kapazität. Außerdem läßt sich durch Aufrauen der Anode die Kapazität noch wesentlich vergrößern. Zwischen der Anode und der Katode befinden sich als Abstandhalter – nicht als Dielektrikum – stark saugfähige, mit einem sauerstoffreichen Elektrolyten getränkte Papierstreifen (vgl. hierzu Abb. 4.17). Die Stärke der Eloxalschicht hängt von der Spannung ab, die bei ihrer Herstellung angelegen hat (**Formierungsspannung**).

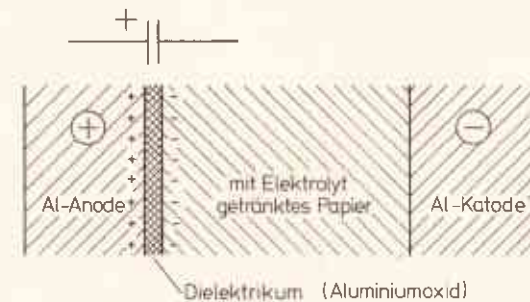


Abb. 4.17 – Elektrolytkondensator

Man unterscheidet Niedervolt-Kondensatoren (bis 100 V) und Hochvolt-Kondensatoren (über 100 V). Die gebräuchlichen Betriebsspannungen liegen zwischen 6 und 550 V. Neben der für Dauerbetrieb geltenden Betriebsspannung ist auf den Elektrolytkondensatoren noch die Spitzenspannung angegeben, die nur kurzzeitig auftreten darf. Die Angabe 35/40 V bedeutet somit 35 V Betriebsspannung und 40 V Spitzenspannung. Die Spitzenspannung entspricht etwa der Formierungsspannung und darf daher nicht überschritten werden; es würde sonst ein neuer Formierungsprozeß eintreten, der Veränderungen des Kondensators zur Folge hat.

Nach längerer Lagerung lassen die Elektrolytkondensatoren einen verhältnismäßig hohen **Reststrom** durch, da inzwischen die Oxidschicht abgebaut worden ist. Dieser Strom, der allerdings nach kurzer Zeit wieder auf den normalen Wert absinkt, ist auch nach Beendigung der Formierung erheblich größer als der bei Papierkondensatoren fließende Isolationsstrom. Elektrolytkondensatoren können sich nach einem Durchschlag auf elektrolytischem Wege regenerieren (Neuformierung). Diese Selbstheilung erfolgt, indem an der Durchschlagsstelle durch Wanderung von negativen Sauerstoffionen zur positiven Aluminiumelektrode die Oxidschicht sofort neu gebildet wird.

Der Elektrolytkondensator darf nur richtig gepolt (+ Pol an Anode, – Pol an Katode) angeschlossen werden, weil nur in dieser Richtung die Oxidschicht den Stromdurchgang sperrt. Liegt bei falschem Anschluß des Kondensators der – Pol an der Anode, dann ist die Schicht stromdurchlässig und wirkt wie ein reiner Widerstand. In diesem Fall wird außerdem auf elektrolytischem Wege die Oxidschicht (Eloxalschicht) wieder abgebaut und dadurch der Kondensator zerstört. Für reine Wechselspannungen ist deshalb der normale „gepolte“ Elektrolytkondensator nicht brauchbar. Er ist jedoch anwendbar bei schwankender Gleichspannung (Gleichspannung + überlagerte Wechselspannung).

Neben gepolten werden auch ungepolte Elektrolytkondensatoren hergestellt, die auf beiden Elektroden eine Oxidschicht besitzen. Diese Kondensatoren werden dort angewendet, wo eine im Betrieb mögliche Umpolung zur Zerstörung des gepolten Kondensators führen würde.

4.7.2. Kapazität und Dielektrikum

Die elektrische Ladung, die ein Kondensator aufnehmen kann, hängt außer von der angelegten Spannung noch von dem Fassungsvermögen (der Aufnahmefähigkeit) ab. Dieses Fassungsvermögen nennt man **Kapazität**.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Kapazität	C	F (Farad) oder $\frac{\text{As}}{\text{V}}$

Je größer die Kapazität, desto größer ist die Elektrizitätsmenge, die ein Kondensator aufnimmt.

Der Zusammenhang zwischen Elektrizitätsmenge, Kondensatorspannung und Kapazität lautet

$$Q = C \cdot U \quad \text{As}$$

Daraus ergibt sich

$$C = \frac{Q}{U} \quad \frac{\text{As}}{\text{V}} \quad \text{oder} \quad \text{F}$$

Ein Kondensator, der bei 1 Volt Spannung eine Ladung von 1 Amperesekunde aufnimmt, hat eine Kapazität von 1 Farad.

Die Einheit 1 Farad ist für praktische Zwecke zu groß. Folgende Größenordnungen der Kapazität sind gebräuchlich:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Mikروفarad } (\mu\text{F}) &= 10^{-6} \text{ Farad (F)} \\ 1 \text{ Nanofarad } (\text{nF}) &= 10^{-9} \text{ Farad (F)} \\ 1 \text{ Picofarad } (\text{pF}) &= 10^{-12} \text{ Farad (F)} \end{aligned}$$

Die Kapazität eines Kondensators hängt von den Abmessungen der Beläge (Größe und Abstand der leitenden Flächen) und vom Dielektrikum (Material zwischen den leitenden Flächen) ab.

Je größer die sich gegenüberliegenden Oberflächen der Kondensatorbeläge sind, desto größer ist die Fläche des Dielektrikums und damit das Speichervermögen, die **Kapazität**. Von der Größe der Fläche des Dielektrikums hängt es ja ab, wieviel nebeneinanderliegende Atome sich an der Elektronenbewegung, am Verschiebungsstrom, beteiligen.

Je näher die Kondensatorbeläge einander gegenüberliegen, desto geringer ist die durch die Verschiebung entstehende Gegenkraft, desto größer ist also die **Kapazität**. Die Größe der durch Aufladung des Kondensators entstehenden Gegenkraft ergibt sich ja durch Addition der in den hintereinanderliegenden Atomen entstehenden Einzelkräfte. Der Verringerung des Abstandes ist allerdings eine Grenze durch die Durchschlagsfestigkeit der isolierenden Zwischenschicht gesetzt.

Die für die isolierende Schicht zwischen den leitenden Flächen des Kondensators verwendeten Stoffe sind in ihrem Aufbau verschieden und haben demzufolge auch verschiedene Einwirkungen auf die Kapazität eines Kondensators. Der Einfluß des Dielektrikums auf die Kapazität wird durch eine Zahl angegeben, die man **Dielektrizitätskonstante** nennt.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Dielektrizitätskonstante	$\epsilon^1)$	$\frac{\text{F}}{\text{m}}$

Die Dielektrizitätskonstante ϵ ist das Produkt aus der elektrischen Feldkonstante ϵ_0 und der für den Isolierstoff geltenden Dielektrizitätszahl ϵ_r ($\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$).

¹⁾ ϵ = griechischer Buchstabe Epsilon

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Elektrische Feldkonstante	ϵ_0	$\frac{\text{F}}{\text{m}}$ oder $\frac{\text{As}}{\text{Vm}}$
Dielektrizitätszahl	ϵ_r	1
ϵ_0 hat den Wert $8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$.		

Die Dielektrizitätszahl ϵ_r ist eine auf das Vakuum bezogene Verhältniszahl, denn sie gibt an, um das Wievielfache sich die Kapazität eines Kondensators vergrößert, wenn statt Vakuum ein Isolierstoff als Dielektrikum verwendet wird:

$$\epsilon_r = \frac{\text{Kapazität des Kondensators mit Dielektrikum}}{\text{Kapazität des Kondensators mit Vakuum als Dielektrikum}}$$

Für Luft ist die Dielektrizitätszahl $\epsilon_r \sim 1$. Für die anderen als Dielektrikum verwendeten Isolierstoffe ist sie größer als 1.

Ein Versuch (vgl. hierzu Abb. 4.18) zeigt das Verhalten der Kapazität bei Änderung des Dielektrikums. Zwei Platten eines geladenen Kondensators werden mit einem Elektrometer verbunden. Schiebt man nun eine Glasscheibe zwischen die Platten, so geht der Ausschlag des Elektrometers zurück. Die beobachtete Verringerung der Spannung bedeutet eine Vergrößerung der Kapazität, da das Produkt aus Spannung und Kapazität, die Elektrizitätsmenge, ja konstant ist ($Q = C \cdot U$).

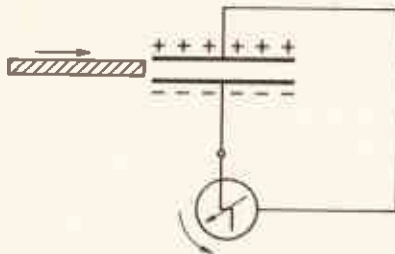


Abb. 4.18 – Dielektrikum und Kapazität

Für einige Nichtleiter sind nachstehend die Dielektrizitätszahl ϵ_r und die Durchschlagsfestigkeit E angegeben.

Werkstoff	ϵ_r	$E \left(\frac{\text{kV}}{\text{cm}} \right)$
Luft	1	20
Hartpapier	4	200
Hartgummi	3	1000
Porzellan	6	200
Glas	6	600
Glimmer	8	600
Condensa	80	200

Dielektrizitätszahl und Durchschlagsfestigkeit sind u. a. temperatur- und frequenzabhängig. In der Tabelle sind für die Durchschlagsfestigkeit die Effektivwerte einer sinusförmigen Wechselspannung von 50 Hz für eine Schichtdicke von 1 mm und 20 °C angegeben.

Die Dielektrizitätszahl beträgt für die Isolation der papierisolierten Fernmeldekabel etwa 1,6 und für die Isolation der Starkstromkabel etwa 4,3.

Zur rechnerischen Ermittlung der Kapazität eines Plattenkondensators dient folgende Formel:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \quad \text{F}$$

In dieser Formel bedeuten:

- $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ = Dielektrizitätskonstante für Vakuum in $\frac{\text{F}}{\text{m}}$,
- ϵ_r = Dielektrizitätszahl, Einheit 1,
- A = wirksame Oberfläche einer Kondensatorplatte in m^2 und
- d = Abstand der Kondensatorplatten in m.

Beispiel:

Ein Kondensator aus zwei Platten von je 10 cm^2 Fläche liegt an 220 V Gleichspannung. Das Dielektrikum besteht aus einer 0,1 mm starken Glimmerschicht ($\epsilon_r = 7$). a) Wie groß ist die Kapazität? b) Welche Elektrizitätsmenge hat er aufgenommen?

Gegeben: $A = 10 \text{ cm}^2$; $d = 0,1 \text{ mm}$; $\epsilon_r = 7$; $U = 220 \text{ V}$

Gesucht: a) C ; b) Q

$$\begin{aligned} \text{Lösung: a) } C &= \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \\ &= \frac{8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 7 \cdot 10 \cdot 10^{-4}}{0,1 \cdot 10^{-3}} \\ &= 620 \cdot 10^{-12} \text{ F} \\ C &= 620 \text{ pF} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } Q &= C \cdot U \\ &= 620 \cdot 10^{-12} \cdot 220 \\ Q &= 0,14 \cdot 10^{-6} \text{ As} \end{aligned}$$

a) Der Kondensator hat eine Kapazität von 620 pF.

b) Der Kondensator hat eine Elektrizitätsmenge von $0,14 \cdot 10^{-6} \text{ As}$ aufgenommen.

In jedem elektrischen Feld wird zwischen den Belägen eine Kraft ausgeübt. Die Stärke der Kraft richtet sich nach der Stärke der elektrischen Ladung, die im elektrischen Feld des Kondensators bei Auf- oder Entladung bewegt werden muß. Die Kraft, mit der die beiden Beläge eines ge-

ladenen Kondensators angezogen werden, ergibt sich aus dem Produkt der elektrischen Feldstärke im Isolierstoff und der aufgenommenen Elektrizitätsmenge des Kondensators.

Beispiel:

Die aufgenommene elektrische Ladung eines Kondensators beträgt $Q = 248 \text{ nAs}$. Die elektrische Feldstärke im Isolierstoff ergibt sich aus der Höhe der angeschalteten Spannung von $U = 60 \text{ V}$ und dem Plattenabstand von $d = 0,24 \text{ mm}$. Welche Kraftwirkung tritt zwischen den Belägen des Kondensators auf?

Gegeben: $Q = 248 \text{ nAs}$; $U = 60 \text{ V}$; $d = 0,24 \text{ mm}$

Gesucht: F

$$\text{Lösung: } E = \frac{U}{d} = \frac{60}{0,24 \cdot 10^{-3}} = \frac{60 \cdot 10^3}{0,24} = 250 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{m}} = \underline{\underline{250 \frac{\text{kV}}{\text{m}}}}$$

$$E = \frac{F}{Q} \quad \text{Formel umstellen nach } F!$$

$$F = E \cdot Q = 250 \cdot 10^3 \cdot 248 \cdot 10^{-9} = 0,25 \cdot 0,248 = 0,062 \text{ N} = \underline{\underline{62 \text{ mN}}}$$

Rechenprobe: Bei der Aufladung des Kondensators wird eine mechanische Arbeit verrichtet, die dem Ladungstransport der Elektrizitätsmenge von der positiven zur negativen Platte entspricht. Die mechanische Arbeit = Energie ist gleich der elektrischen Arbeit = Energie.

$$\begin{aligned} W_{\text{mech}} &= W_{\text{elektr}} \\ F \cdot d &= P \cdot t = U \cdot I \cdot t = U \cdot Q \\ 0,062 \text{ N} \cdot 0,24 \cdot 10^{-3} \text{ m} &= 60 \text{ V} \cdot 248 \cdot 10^{-9} \text{ As} \\ 62 \cdot 240 \cdot 10^{-9} \text{ Nm} &= 60 \cdot 248 \cdot 10^{-9} \text{ Ws} \\ \underline{\underline{14,88 \mu\text{Nm}}} &= \underline{\underline{14,88 \mu\text{Ws}}} \end{aligned}$$

Die Kraft zwischen den beiden Belägen beträgt $F = 62 \text{ mN}$ (etwa 6,2 p).

4.7.3. Kondensatorverluste

Kondensatoren sind nicht vollkommen verlustfrei, obwohl sie in der Regel weit geringere Verluste verursachen als Spulen.

Durch die Unvollkommenheit des Dielektrikums treten bei Kondensatoren, die an einer Wechselspannung liegen, Wärmeverluste im Isolierstoff auf. Man nennt diese im Isolierstoff entstehenden Verluste auch **dielektrische Verluste**. Die dielektrischen Verluste äußern sich vor allem darin, daß der Kondensator den Gleichstrom nicht vollkommen sperrt, sondern daß ein geringer **Leckstrom** durch das Dielektrikum hindurchfließt. Bei Anschluß des Kondensators an eine Wechselspannung beeinträchtigen die Kondensatorverluste auch die Größe der zwischen Strom und Spannung entstehenden Phasenverschiebung.

Wird für einen verlustbehafteten Kondensator ein Ersatzschaltbild gezeichnet, dann stellt man den Verlustwiderstand in Parallelschaltung zur Kapazität des Kondensators dar. Die Größe des Verlustwiderstands ist ein Maß für den sogenannten **Verlustfaktor** eines Kondensators. In der Praxis wird der Verlustfaktor von Kondensatoren meistens vernachlässigt.

4.7.4. Ausführungsformen und Daten der Kondensatoren

In der Fernmeldetechnik werden Kondensatoren zahlreich verwendet. Die verschiedensten Anforderungen, die an die Kondensatoren gestellt werden, haben zur Entwicklung einer sehr großen Anzahl verschiedenartiger Bauformen mit unterschiedlichen Eigenschaften geführt. Auf den Kondensatoren ist neben der Größe und Toleranz noch die Betriebsspannung (Nennspannung) angegeben. Dieser Wert gilt für eine Gleichspannung bzw. beim Anlegen einer Wechselspannung für den Maximalwert (nicht Effektivwert!). Daneben sind gelegentlich noch Angaben über den zulässigen Temperaturbereich, über die Prüfspannung und über Ausführungsformen vorhanden. Häufig geschieht die Kennzeichnung der Kapazitäts-, Toleranz- und Spannungswerte auch durch Farbbrünge bzw. Farbpunkte.

Eine Beschreibung der verschiedenen Ausführungsformen der Kondensatoren sowie eine Tabelle zur Erläuterung der zur Kennzeichnung verwendeten Farben enthält der Band 10 des „Handbuchs der Fernmeldetechnik – Grundreihe“.

4.7.5. Kondensatorschaltungen

4.7.5.1. Parallelschaltung

Bei dem in Abb. 4.19 dargestellten Versuch werden nacheinander ein Kondensator von $1 \mu\text{F}$, ein Kondensator von $2 \mu\text{F}$ sowie beide Kondensatoren in Parallelschaltung aufgeladen (vor jedem Einzelversuch sind die Kondensatoren sorgfältig zu entladen). Der Ausschlag des Meßinstruments zeigt, daß die aufgenommene Elektrizitätsmenge beim $1 \mu\text{F}$ -Kondensator am kleinsten und bei der Parallelschaltung am größten ist. Daraus folgt:

Die Gesamtkapazität parallelgeschalteter Kondensatoren ist größer als jede Teilkapazität.

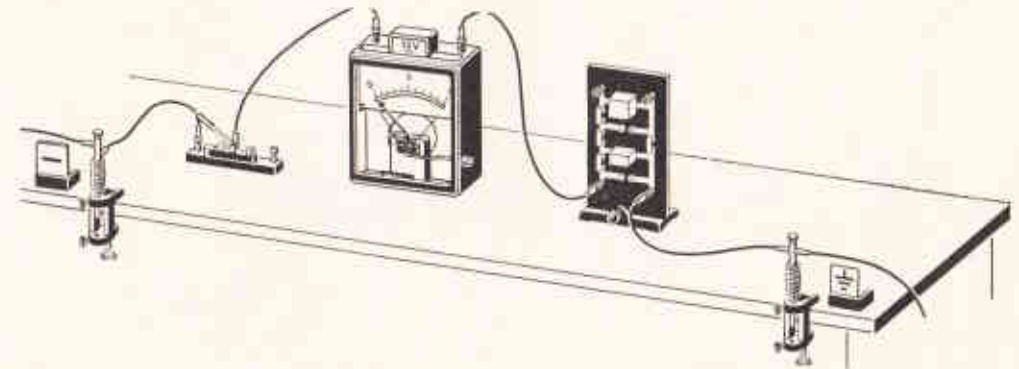


Abb. 4.19 – Kondensatoren in Parallelschaltung

Wird der Versuch mit zwei Kondensatoren von je $2 \mu\text{F}$ wiederholt, dann ist der Ausschlag des Meßinstruments bei jedem Einzelkondensator halb so groß wie der Ausschlag bei der Parallelschaltung.

Es ist also

$$Q = Q_1 + Q_2 \\ C \cdot U = C_1 \cdot U_1 + C_2 \cdot U_2$$

Da alle Zweige einer Parallelschaltung an der gleichen Spannung liegen, ergibt sich

$$C \cdot U = C_1 \cdot U + C_2 \cdot U$$

und nach Division durch U

$$C = C_1 + C_2$$

Die Größe der Kapazität hängt u. a. von der Größe der wirksamen Oberfläche ab. Durch die Parallelschaltung von Kondensatoren wird die Gesamtoberfläche gleich der Summe der Einzelflächen. Damit ergibt sich:

Die Gesamtkapazität parallelgeschalteter Kondensatoren ist gleich der Summe der Einzelkapazitäten.

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad \text{F}$$

4.7.5.2. Hintereinanderschaltung

Ein Versuch mit hintereinandergeschalteten Kondensatoren (vgl. hierzu Abb. 4.20) zeigt, daß der Ausschlag des Meßinstruments bei der Aufladung der hintereinandergeschalteten Kondensatoren kleiner ist als bei der Aufladung jedes einzelnen Kondensators. Daraus folgt:

Die Gesamtkapazität hintereinandergeschalteter Kondensatoren ist kleiner als jede Teilkapazität.

Nach dem 2. Kirchhoffschen Gesetz ist bei der Hintereinanderschaltung der Kondensatoren

$$U = U_1 + U_2 \\ \frac{Q}{C} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2}$$

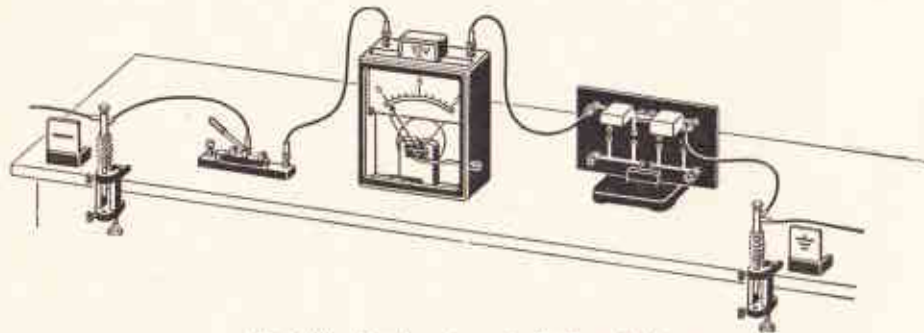


Abb. 4.20 - Kondensatoren in Reihenschaltung

Da bei der Hintereinanderschaltung die Elektrizitätsmenge auf allen Kondensatorbelägen gleich ist, ergibt sich

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

und nach Division durch Q

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Die Größe der Kapazität hängt u. a. vom Abstand der leitenden Flächen ab. Durch die Hintereinanderschaltung von Kondensatoren wird der Gesamtabstand vergrößert. Damit ergibt sich:

Der Kehrwert der Gesamtkapazität hintereinandergeschalteter Kondensatoren ist gleich der Summe der Kehrwerte der Einzelkapazitäten.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad \frac{1}{\text{F}}$$

Ähnlich wie bei der Parallelschaltung von Widerständen ergibt sich bei der Reihenschaltung von zwei Kondensatoren

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad \text{F}$$

und bei der Reihenschaltung von n Kondensatoren gleicher Größe

$$C = \frac{C_1}{n} \quad \text{F}$$

Beispiel:

3 Kondensatoren von $0,5 \mu\text{F}$, $2 \mu\text{F}$ und $4 \mu\text{F}$ sollen einmal parallel- und einmal hintereinandergeschaltet werden. Wie groß ist jeweils die Gesamtkapazität?

Gegeben: $C_1 = 0,5 \mu\text{F}$; $C_2 = 2,0 \mu\text{F}$; $C_3 = 4,0 \mu\text{F}$

Gesucht: C_r ; C_p

Lösung:

$$\frac{1}{C_r} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \\ \frac{1}{C_r} = \frac{1}{0,5} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \\ \frac{1}{C_r} = \frac{11}{4} \\ C_r = \underline{\underline{0,364 \mu\text{F}}}$$

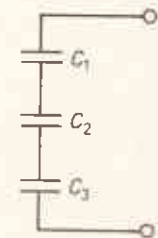


Abb. 4.21 - Schaltbild

Die Gesamtkapazität der hintereinandergeschalteten Kondensatoren beträgt $0,384 \mu\text{F}$.

$$\begin{aligned} C_p &= C_1 + C_2 + C_3 \\ C_p &= 0,5 \mu\text{F} + 2 \mu\text{F} + 4 \mu\text{F} \\ C_p &= \underline{\underline{6,5 \mu\text{F}}} \end{aligned}$$

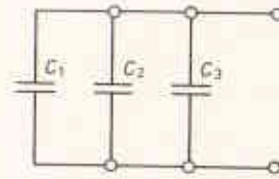


Abb. 4.22 – Schaltbild

Die Gesamtkapazität der parallelgeschalteten Kondensatoren beträgt $6,5 \mu\text{F}$.

4.7.6. Kondensatoren im Gleich- und Wechselstromkreis

Legt man eine Gleichspannung an eine Reihenschaltung eines Widerstands mit einem Kondensator (vgl. hierzu Abb. 4.23, Schalter in Stellung „Ladung“), dann lädt sich der Kondensator so lange auf, bis die Kondensatorspannung die Größe der angelegten Spannung erreicht hat. Dabei fließt kein gleichmäßiger Ladestrom. Die im Moment des Einschaltens sehr große Ladestromstärke nimmt mit fortschreitender Zeit schnell ab, weil mit Zunahme der Ladung im Kondensator die der angelegten Spannung entgegengerichtete Kondensatorspannung größer wird. Der Ladestrom erreicht den Wert Null, wenn die Kondensatorspannung den Wert der angelegten Spannung erreicht hat.

Wird die Ladespannung vom Kondensator abgeschaltet (vgl. hierzu Abb. 4.23, Schalter in Mittelstellung), dann bleibt im Kondensator die Gegenspannung längere Zeit erhalten. Erst wenn die aufgeladenen Beläge des

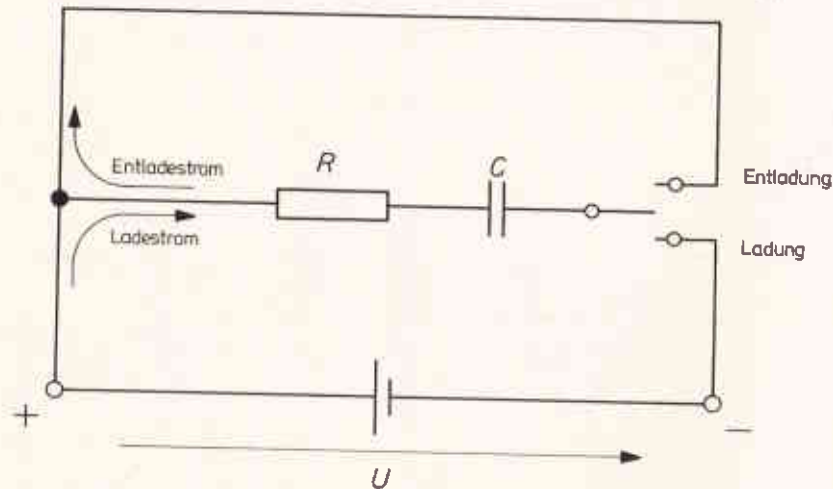


Abb. 4.23 – Kondensator im Gleichstromkreis

Kondensators leitend miteinander verbunden werden (vgl. hierzu Abb. 4.23, Schalter in Stellung „Entladung“), entlädt sich der Kondensator.

Bei verlustfreiem Kondensator ist der Widerstandswert des entladenen Kondensators null Ohm. Der Widerstandswert des geladenen Kondensators beträgt dagegen unendlich viel Ohm. Bei der Aufladung ist die Kondensatorspannung gegen die Ladestromrichtung gerichtet, bei der Entladung sind Kondensatorspannung und Entladestrom gleichgerichtet (vgl. hierzu Abb. 4.24).

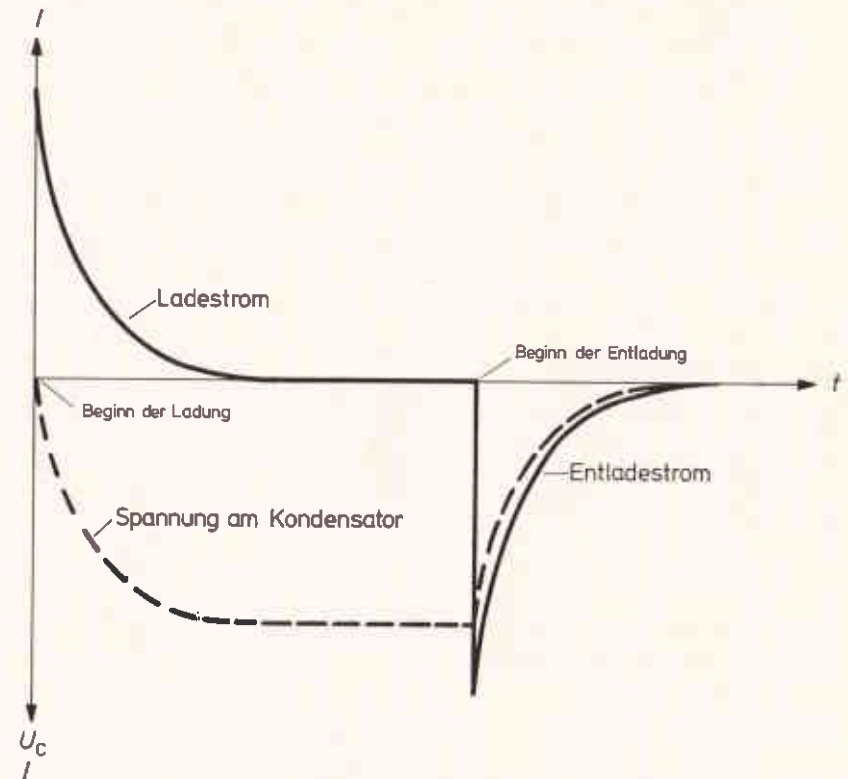


Abb. 4.24 – Ein- und Ausschaltvorgang für einen Kondensator im Gleichstromkreis

Die Erscheinungen im Kondensatorstromkreis können mit den Wirkungen einer elastischen Feder verglichen werden. Wird z. B. eine eingespannte Stahlfeder ausgelenkt, dann nimmt sie mechanische Energie auf; beim Entspannen der Feder gibt die Feder die vorher aufgenommene Energie an ihre Umwelt wieder zurück. Beim Spannen der Feder ist die Federkraft gegen die Auslenkrichtung gerichtet; beim Entspannen sind Federkraft und Bewegungsrichtung gleichgerichtet.

Legt man eine Wechselspannung an den Kondensator, dann findet ein ständiges Laden und Entladen des Kondensators statt. Die Elektronen im Isolierstoff werden

mit der Frequenz des Wechselstroms fortwährend verschoben, man sagt, die Moleküle werden ständig unipolarisiert. In den Leitungen ist ständig ein Stromfluß von wechselnder Richtung vorhanden, so daß der Kondensator den Wechselstrom im Stromkreis fließen läßt. Allerdings stellt auch der Kondensator für den Wechselstrom einen Widerstand dar. Dieser Wechselstromwiderstand (auch kapazitiver Widerstand genannt) hängt von der Kapazität des Kondensators und von der Frequenz des Wechselstroms ab (vgl. hierzu Abschn. 8 im Teil 2).

Kondensatoren werden (oft zusammen mit Spulen oder Widerständen) zu verschiedenen Zwecken verwendet, so unter anderem

- als **Sperrkondensatoren**, um Teile der Stromkreise gegen Gleichstrom zu sperren,
- als **Glättungskondensatoren** zum Vermindern der Welligkeit einer Gleichspannung,
- als **Funkenlösch- und Störschutzkondensatoren** zur Verhinderung der Funkenbildung bei Kontakten durch „Absaugen“ elektrischer Energie,
- als **Speicherkondensatoren** zur meist „blitzartigen“ Abgabe der durch Aufladung erhaltenen Energie,
- in **elektrischen Filtern und Weichen** zum Trennen von Gleichstrom und Wechselströmen verschiedener Frequenz,
- in **Schwingungskreisen** zum wechselseitigen Aufnehmen und Abgeben der Energie und
- bei **Verzögerungsrelais** zur zeitlichen Regelung des Stromanstiegs oder Stromabfalls.

4.7.7. Die Zeitkonstante

Die Zeit, die ein Kondensator bis zur völligen Aufladung bzw. Entladung benötigt, wird bestimmt durch die Größe der Kapazität und den Wert des vorgeschalteten Wirkwiderstands. Die Größe, mit der man Lade- und Entladezeit eines Kondensators berechnen kann, bezeichnet man als **Zeitkonstante**.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Zeitkonstante	τ ¹⁾	s (Sekunde)

Die Zeitkonstante einer Kondensatorschaltung ist das Produkt aus dem Vorwiderstand und der Kapazität.

Größengleichung

$$\tau = R \cdot C$$

Einheitengleichung

$$s = \frac{V}{A} \cdot \frac{As}{V} = s$$

Die Ladezeit t , während der der Strom in einem Kondensatorstromkreis seinen Nullwert erreicht hat, ist der **fünffache Wert der Zeitkonstante**.

$$t = 5 \cdot \tau$$

Beispiel:

Ein Kondensator von $C = 20 \mu F$ ist mit einem Wirkwiderstand von $R = 600 \Omega$ hintereinandergeschaltet. Diese Reihenschaltung wird an eine Gleichspannung von

¹⁾ τ = griechischer Buchstabe Tau

$U = 60 V$ geschaltet. a) Wie groß ist der Höchstwert des Ladestroms? b) In welcher Zeit ist der Kondensator aufgeladen?

Gegeben: $U = 60 V$; $R = 600 \Omega$; $C = 20 \mu F$

Gesucht: I ; t

$$\text{Lösung: } I = \frac{U}{R} = \frac{60 V}{600 \Omega} = \frac{60\,000 \text{ mV}}{600 \Omega} = \underline{\underline{100 \text{ mA}}}$$

$$\tau = R \cdot C = 600 \Omega \cdot 20 \cdot 10^{-6} F = 12\,000 \cdot 10^{-6} s = \underline{\underline{12 \text{ ms}}}$$

$$t = 5 \cdot \tau = 5 \cdot 12 \text{ ms} = \underline{\underline{60 \text{ ms}}}$$

Der Höchstwert des Ladestroms beträgt $I = 100 \text{ mA}$; dieser Stromwert ist in $t = 60 \text{ ms}$ auf null A herabgesunken; der Kondensator ist in 60 ms geladen.

Zusammenstellung der Größen des elektrischen Feldes

Begriff	Formelzeichen	Einheit		Größengleichung
		Benennung	Kurzzeichen	
Elektrisches Potential	φ	Volt	V	$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$ V
Elektrische Feldstärke	E	Volt pro Meter	$\frac{V}{m}$	$E = \frac{U}{l}$ $\frac{V}{m}$
Elektrische Ladung	Q	Coulomb	C	$Q = C \cdot U$ C
Elektrische Feldkonstante	ϵ_0	Farad pro Meter	$\frac{F}{m}$	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$
Dielektrizitätszahl	ϵ_r	Ein	1	—
Dielektrizitätskonstante	ϵ	Farad pro Meter	$\frac{F}{m}$	$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ $\frac{F}{m}$
Kapazität	C	Farad	F	$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d}$ F
Reihenschaltung von Kapazitäten	C	Farad	F	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$ $\frac{1}{F}$
Parallelschaltung von Kapazitäten	C	Farad	F	$C = C_1 + C_2 + C_3$ F
Zeitkonstante	τ	Sekunde	s	$\tau = R \cdot C$ s
Ladezeit	t	Sekunde	s	$t = 5 \cdot \tau$ s

Technische Einheiten: $1 C = 1 As$ $1 F = 1 \frac{As}{V}$

5. Spannungserzeuger

In jedem elektrisch neutralen Körper befinden sich positive und negative Ladungsträger von gleicher Anzahl; der Körper ist spannungslos. Wollen wir in einem Körper eine elektrische Spannung erzeugen, müssen die im Körper befindlichen Ladungsträger voneinander getrennt werden. Nach der Ladungstrennung ist dann an dem einen Leitungsende ein Elektronenmangel (Pluspol) und an dem anderen

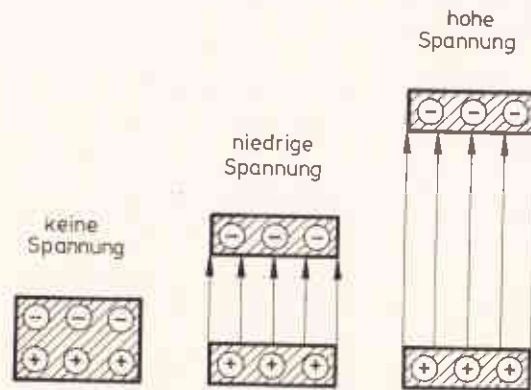


Abb. 5.1 – Ladungstrennung

auf verschiedene Arten vorgenommen werden. Wie bei einem Spannungserzeuger die Ladungstrennung ausgeführt werden soll, hängt von dem jeweiligen Verwendungszweck des Spannungserzeugers ab.

5.1. Spannungserzeugung im Magnetfeld

Durch die Einwirkung einer Magnetfeldänderung auf einen elektrischen

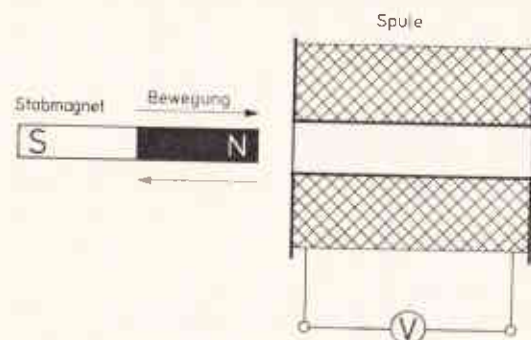


Abb. 5.2 – Induktionsspannung

Leitungsende ein Elektronenüberschuß (Minuspole) vorhanden. Auf dieser Ladungstrennung bzw. Ladungsverschiebung beruht die Wirkungsweise sämtlicher Spannungserzeuger. Bei der Ladungstrennung entsteht zwischen den getrennten ungleichnamigen Ladungen ein Arbeitsvermögen, das den elektrischen Strom durch einen geschlossenen Stromkreis zu treiben vermag. Man sagt, zwischen den ungleichnamigen elektrischen Ladungen liegt eine elektrische Spannung.

Die Ladungstrennung bzw. Ladungsverschiebung kann

Leiter werden die im Leiter befindlichen Elektronen nach einem Leiterende hin verschoben. Zwischen den beiden Leiterenden entsteht eine elektrische Spannung.

Die durch eine Magnetfeldänderung erzeugte elektrische Spannung heißt **Induktionsspannung**.

Die Entstehungsursachen von Induktionsspannungen sind im Abschn. 7 ausführlich erläutert. Man kann eine Induktionsspannung erzeugen, indem man einen Stabmagneten in den Hohlraum einer Spule einführt.

Die Spannungserzeugung im Magnetfeld hat für die Praxis große Bedeutung. Sie wird vor allem bei den Generatoren und Transformatoren ausgenutzt.

5.2. Spannungserzeugung durch chemische Einflüsse

Werden zwei verschiedenartige Elektroden in eine stromleitende Flüssigkeit getaucht, entstehen in den Elektroden unterschiedliche elektrische Ladungen. Zwischen den Elektroden liegt eine elektrische Spannung.

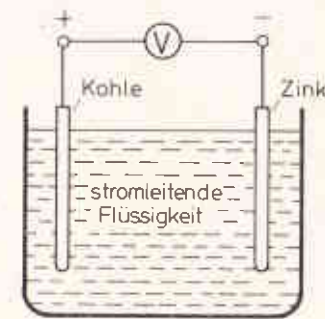


Abb. 5.3 – Chemische Spannungsquelle

Die Entstehungsursachen für die Spannungserzeugung in stromleitenden Flüssigkeiten sind im Abschn. 3.2 ausführlich erläutert.

In einer stromleitenden Flüssigkeit kann eine elektrische Spannung erzeugt werden, indem salzhaltiges Wasser in ein Glasgefäß gefüllt und zwei verschiedene Elektroden, z. B. eine Kohle- und eine Zinkelektrode, hineingetaucht werden. An den aus der Flüssigkeit herausragenden Enden der Elektroden kann die Spannung gemessen werden.

Chemische Spannungserzeuger haben in der Praxis eine große Bedeutung. Man verwendet sie vorwiegend als Sammler oder Batterien überall dort, wo kein Netzanschluß

zur Verfügung steht oder wenn bei Netzausfall ein unterbrechungsfreier Betrieb gewährleistet sein muß.

5.3. Spannungserzeugung durch Wärme

Lötet oder schweißt man zwei Drähte aus verschiedenen Leiterwerkstoffen an einem Ende zusammen und erhitzt die Verbindungsstelle, dann werden die elektrischen Ladungsträger der beiden Metalle zu den anderen Leiterenden hin verschoben. An den kalten Leiterenden entsteht eine elektrische Spannung. Einen derartigen Spannungserzeuger nennt man **Thermoelement¹⁾**.

¹⁾ Thermo = Wärme

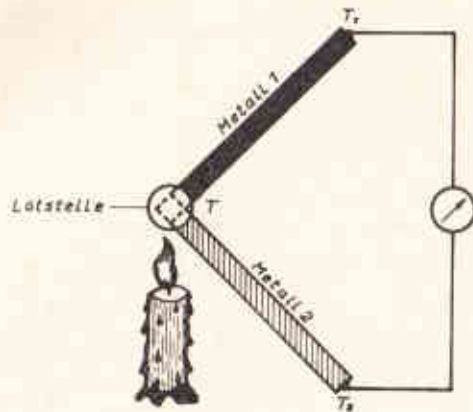


Abb. 5.4 – Thermoelement

Wir können durch Wärme eine elektrische Spannung erzeugen, indem wir die Enden eines Kupferdrahts und eines Konstantandrahts fest miteinander verbinden und die Verbindungsstelle auf etwa 100 °C erhitzen. Die an den kalten Drahtenden gemessene Spannung beträgt dann etwa 1,2 mV.

Die von einem Thermoelement erzeugte Spannung ist abhängig von den verwendeten Leiterwerkstoffen und der Höhe der Erwärmungstemperatur.

Thermoelemente verwendet man vor allem als Fernthermometer für Temperaturmessungen. Ferner werden sie

häufig für die Strommessungen verwandt, wobei die Verbindungsstelle beider Metalle durch den stromdurchflossenen Leiter erwärmt wird.

5.4. Spannungserzeugung durch Druck

Wird auf einen Kristallkörper Druck oder Zug ausgeübt, dann werden die elektrischen Ladungsträger in dem Kristall verschoben und an den Kristalloberflächen entsteht eine elektrische Spannung. Die so erzeugte Spannung wird häufig auch als **Piezelektrizität**¹⁾ bezeichnet.

Man kann durch Druck eine elektrische Spannung erzeugen, indem man auf ein Quarzkristall einen Druck oder Zug ausübt und an den rechtwinklig zur Druck- und Zugrichtung stehenden Flächen die erzeugte Spannung mißt. Eine höhere Spannung kann erzeugt werden, wenn Quarzstäbe einseitig eingespannt und dann verbogen

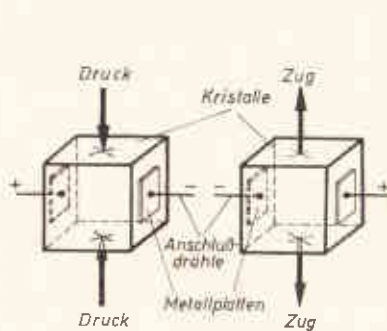


Abb. 5.5 – Piezelektrizität

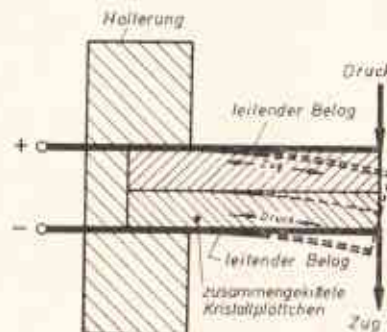


Abb. 5.6 – Bieger

¹⁾ Piezo (sprich: pi-ezo) = Druck

werden. Bei Quarzkristallstäben von etwa 5 bis 10 cm Länge und einer Druckkraft von etwa 10 mN auf die freistehenden Enden entstehen Spannungswerte bis zu etwa 1 V. Eine solche Anordnung zur Spannungserzeugung wird auch als Bieger bezeichnet.

Die Spannungserzeugung durch Druckeinwirkung wird vor allem bei Kristallmikrofonen und Kristalltonabnehmern verwendet.

5.5. Spannungserzeugung durch Licht

Bei einigen Halbleiterstoffen werden Elektronen aus dem Stoff herausgeschleudert, wenn Lichtstrahlen auf ihn einwirken. Diese besondere Eigenschaft nutzt man aus, um eine elektrische Spannung zu erzeugen. Bei diesen Spannungserzeugern befindet sich eine dünne Schicht aus einem Halbleiterstoff auf einer metallenen Unterlage. Über der Halbleiterschicht liegt eine lichtdurchlässige Metallhaut. Fallen die Lichtstrahlen durch die Metallhaut hindurch und dringen sie in die Halbleiterschicht ein, dann werden die Elektronen aus dem Halbleiterstoff herausgelöst und von der Metallhaut aufgenommen. Es findet eine Ladungverschiebung zwischen dem Halbleiterstoff und der Metallhaut statt. Zwischen der metallenen Unterlage und der Metallhaut entsteht eine elektrische Spannung. Eine solche Anordnung zur Spannungserzeugung wird als **Fotoelement**¹⁾ bezeichnet (Abb. 5.7). Ein Fotoelement, bei dem die Halbleiterschicht aus Silizium besteht, erzeugt bei einfallendem Sonnenlicht eine elektrische Leistung von etwa 10 mW/cm². Für bestimmte Steuerzwecke baut man Fotozellen. Sie enthalten in einem Glaskolben

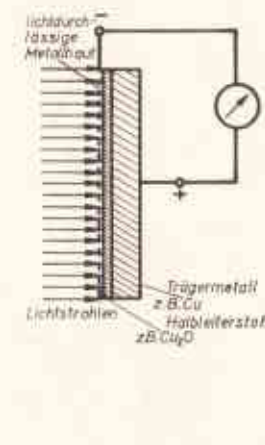


Abb. 5.7 – Fotoelement

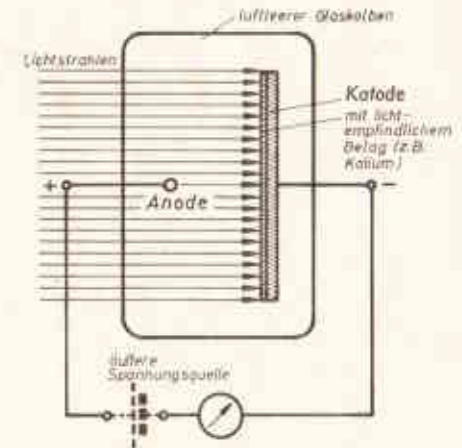


Abb. 5.8 – Fotozelle

¹⁾ Foto = Licht, Helligkeit

eine lichtempfindliche Schicht und eine Gegenelektrode (Anode). Man schaltet an die Elektroden eine äußere Spannungsquelle, durch die zusätzliche elektrische Energie geliefert wird (Abb. 5.8).

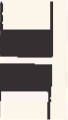
Fotoelemente verwendet man vorwiegend als Belichtungsmesser, während Fotozellen vor allem für die Steuerung von Alarmanlagen, Türöffnern usw. Anwendung finden.

5.6. Spannungserzeugung durch Reibung

Werden Isolierstoffe untereinander gerieben, dann findet zwischen den geriebenen Körpern ein Ladungsaustausch statt. Die elektrisch neutralen Körper sind durch das Reiben elektrisch aufgeladen worden; man sagt, die Körper sind elektrostatisch¹⁾ aufgeladen. Zwischen den aufgeladenen Körpern und anderen Gegenständen können manchmal sogar sehr hohe elektrische Spannungen entstehen. Die elektrostatische Aufladung von Körpern entsteht meistens ungewollt und ist oftmals sehr unerwünscht. Wir alle kennen die Erscheinung von der Funkenbildung her, die immer dann entsteht, wenn sich elektrostatisch aufgeladene Körper (Kunststofffolien, Chemiefasern usw.) wieder entladen. Die elektrostatische Aufladung von Körpern kann verhindert bzw. beseitigt werden, wenn man sie elektrisch leitend mit der Erde verbindet.

¹⁾ elektrostatisch = elektrische Erscheinung, bei der kein Strom fließt

Zusammenstellung der Spannungserzeugungsarten

Art der Spannung	Energieumsetzung	Spannungshöhe	Wirkungsgrad	Anwendung	Schaltensymbol
Reibungsspannung	Mech. Energie/ Elektr. Energie	bis ca. 100 kV	ca. 1 v. H.	Bandgenerator	
Piezospaltung	Mech. Energie/ Elektr. Energie	einige 100 mV	ca. 1 v. H. bis 5 v. H.	Kristallmikrofon, Kristalltonabnehmer	
Induktionsspannung	Magn. Energie/ Elektr. Energie	bis ca. 10 kV je nach Bauart	ca. 90 v. H.	Generatoren, Transformatoren	
Galvanische Spannung	Chem. Energie/ Elektr. Energie	bis ca. 2,6 V	30 bis 80 v. H.	Trockenelemente, Sammler, Brennstoffzellen	
Thermospannung	Wärmeenergie/ Elektr. Energie	bis ca. 0,45 V	10 bis 15 v. H.	Fernthermometer, Thermokreuze	
Lichtspannung	Wellenenergie/ Elektr. Energie	einige 100 mV	10 bis 20 v. H.	Fotozellen, Fotoelemente	

Band 5

– Werkstoffbearbeitung

Werk- und Hilfsstoffe – Werkstoffbearbeitung – Technisches Zeichnen
– Arbeitsschutz und Unfallverhütung – Umgang mit Tabellenbüchern

● Repetitor zum Band 5

Band 6

– Fernsprechapparate – Fernsprechentörung – Nebenstellenanlagen (mit Beiheft)

Fernsprechapparate – Zusatzeinrichtungen – Fernsprechentörung – VDE-Bestimmungen – Unfallverhütung – Allgemeines über Nebenstellenanlagen – Die Ausführung der Nebenstellenanlagen – Schaltungsaufbau – Aufbau und Bedienen des HVT

● Repetitor zum Band 6

Band 7

– Linientechnik (2 Teile)

Zweck und Aufbau der Bauteile im Ortsanschlußnetz – Kabelkanalanlage – Fernmeldekabel – Einziehen von Röhrenkabeln – Auslegen von Erdkabeln – Kabelmontagearbeiten – Druckluftüberwachung von Ortskabeln – Schutz gegen Korrosion – Linienunterlagen für Ortsnetze – Auskundung – Bau oberirdischer Ortsanschlußlinien – Bau oberirdischer Kabelanlagen – Unterhaltungsarbeiten an Holzmastlinien – Sprechstellenbau – Teilnehmerleinrichtungen – Erdungsanlagen – Schutz gegen Überspannungen und Überströme

● Repetitor zum Band 7

Band 8

– Grundlagen der Vermittlungstechnik (mit Beiheft)

Aufbau und Wirkungsweise der Schrittschalt- und Motordrehwähler – Orts- und Fernvermittlungstechnik – Schaltkennzeichen – Einstellvorschriften – Signaleinrichtungen, Prüf- und Meßeinrichtungen – Stromversorgung – Aufteilung großer Ortsnetze – Netzgestaltung im Selbstwählferrdienst – Unterhalten und Bedienen von Orts- und Fernvermittlungsstellen – Gliederung des Unterhaltungsdienstes

● Repetitor zum Band 8

Band 9

– Übertragungs- und Datentechnik

Elektroakustik – Leitungstechnik – Trägerfrequenztechnik – Grundlagen der Fernschreib- und Datentechnik

● Repetitor zum Band 9

– Weitere Lehrbücher siehe 2. und 4. Umschlagseite –

Band 10

— Grundlagen der Schaltungs- und Meßtechnik

Anschluß- und Verbindungstechniken — Bauelemente, Bauteile und Grundlagen der Schaltungstechnik — Niederspannungsnetz, Schutzmaßnahmen und Installationen, Gefährdung des Menschen durch den elektrischen Strom — Messen und Prüfen

● **Repetitor zum Band 10**

Die Bände werden noch durch den **Sonderband „Grundlagen der Elektronik (mit Repetitor)“** ergänzt, der beim Institut zur Entwicklung moderner Unterrichtsmedien e. V., 28 Bremen 1, Bahnhofstraße 10, bestellt werden kann. Der Band ist wie folgt gegliedert:

Sonderband — Grundlagen der Elektronik

Meßtechnik — Halbleiter — Halbleiterdioden — Transistor — Vierschicht-halbleiter-Bauelemente — Elektronenröhren — RC-Glieder — Kippstufen — Verknüpfungsglieder

● **Repetitor zum Band Grundlagen der Elektronik**

Allgemeines Prüfungswissen (2 Teile)

(für die Kräfte des BFW-, BfI- und BPI-Dienstes)

● **Repetitor zum Band Allgemeines Prüfungswissen**

Wichtig zur Vorbereitung auf Eignungsfeststellungen und Prüfungen

Deutschlehre
(mit Beiheft)

Rechtschreibung — Wortlehre — Satzlehre — Zeichensetzung — Stil- und Aufsatzkunde — Übungsaufgaben — Übungsdiktate — Lösungen

Rechenlehre

Rechnen — Raumlehre — Sortenverwandlung — Übungsaufgaben — Angewandte Aufgaben — Lösungsheft

Sämtliche Lehrwerke können bestellt werden bei:

Deutsche Postgewerkschaft — Hauptvorstand — Verlag

6 Frankfurt 71 — Rhonestraße 2