

Elektrotechnik Grundlagen

Kapitel 1

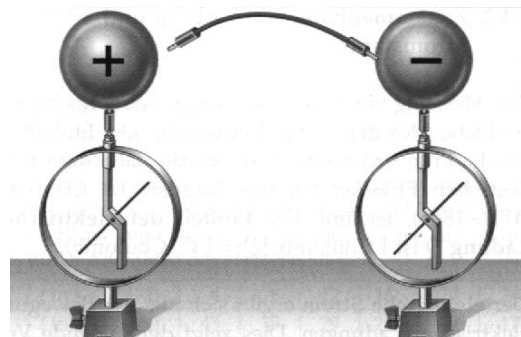
Einführung und Grundlagen zur Elektrotechnik

2004
Kurt Steudler

(Modul_ET1_Kap_01.doc)

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Grundlagen zur Elektrotechnik.....	3
1.1	Zur Geschichte und zum Wesen der Elektrizität.....	3
1.1.1	Frühgeschichtliches	3
1.1.2	Industrie-Zeitalter bis zum ersten Krieg	3
1.1.3	Das zwanzigste Jahrhundert.....	8
1.1.4	Zusammenstellung.....	10
1.2	Die elektrische Ladung.....	11
1.3	Der elektrische Strom	13
1.3.1	Beschreibung und Definition	13
1.3.2	Stromstärkeeinheit und Mass - System	14
1.3.3	Elektrische Leitung im metallischen Leiter	15
1.3.4	Strommessung	16
1.4	Die elektrische Spannung	16
1.4.1	Beschreibung und Definition	16
1.4.2	Zusammenschalten von Quellen	17
1.4.3	Spannungsmessung	18
1.5	Das Gesetz von OHM	19
1.5.1	Zusammenhang zwischen Spannung und Strom	19
1.5.2	Widerstand prismatischer Leiter	20
1.5.3	Widerstand und Mass - System	21
1.6	Arbeit und Leistung	21
1.6.1	Arbeit	21
1.6.2	Leistung.....	22
1.6.3	Wirkungsgrad	22
1.6.4	Nichtlineare Kennlinien	23
1.6.5	Angabe technischer Grössen.....	23
1.7	Anhang.....	24
1.7.1	Griechische Zeichen	24
1.7.2	Wirkung von Körperströmen	25
1.7.3	Logarithmische Achsen.....	25
1.8	Verzeichnisse	26
1.8.1	Literaturverzeichnis	26
1.8.2	Figurenverzeichnis	26
1.8.3	Tabellenverzeichnis	26
1.8.4	Stichwortverzeichnis	27



1 Einführung und Grundlagen zur Elektrotechnik

1.1 Zur Geschichte und zum Wesen der Elektrizität

1.1.1 Frühgeschichtliches

Erfahrungen mit der Elektrizität hat der Mensch schon seit Urzeiten, denken wir an Blitz und Donner. Die Erscheinungen werden Göttern zugeschrieben. (Gewittergott mit Blitz in der Hand).¹

Erkenntnisse über elektrische Phänomene² gelingen nur in kleinen Schritten. Griechische und römische Philosophen wie ARISTOTELES, THALES VON MILET, PLINIUS stellen Hypothesen auf.

Alexander von Aphrodisios beschreibt um 200 n.Chr. die Anziehungskraft des BERNSTEIN, von dem sich das Wort „Elektrizität“ herleitet.³

Auch die Eigenschaften des Magneteisensteines (Magnetismus) sind schon früh beschrieben (THALES, ARISTOTELES) und es ranken sich viele Sagen⁴ um Magnetberge.⁵

Mit den aufblühenden Naturwissenschaften zu Beginn der Renaissance versuchen MARICOURT im 13ten, CARDANO im 16ten Jahrhundert, später GALILEI, GILBERT und weitere Wissenschaftler die elektrischen und magnetischen Phänomene in Modellen⁶ zu erklären.

1.1.2 Industrie-Zeitalter bis zum ersten Krieg

Im 17ten Jahrhundert findet GUERICKE auf seiner Suche nach dem, was den leeren Raum füllt, Eigenschaften der statischen Ladung. An GUERICKEs Schwefelkugeln findet LEIBNIZ den elektrischen Funken und elektrostatische Kräfte.

GRAY und WHEELER erforschen die Fortleitung⁷ der Elektrizität und das neue Forschungsgebiet löst sich aus dem Bereich metaphysischer Vorstellungen. HAUKSBEER entdeckt, August Christian HAUSER, Heinrich WINKLER, PRIESTLEY und andere entwickeln und benutzen die Elektrisiermaschine.⁸

¹ Hammerschwingender DONAR oder THOR (Donnerstag/ Thursday).

² Erscheinung. Phänomenologie: Lehre von den Erscheinungen.

³ BERNSTEIN $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$, griechisch. $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu\iota\omicron\nu$: Elektron

⁴ PLINIUS erzählt vom Hirten MAGNES, der in seinen Sandalen mit Eisenstiften am Berg IDA (Magneteisengestein) durch die Anziehungskraft festgehalten wird.

⁵ Bekannt ist der Kompass als "Südweiser" in China bereits 1000 bis 2700 v.Chr.

⁶ Modell: Bild, Abbildung oder Vorstellung der Wirklichkeit.

⁷ Ladung ist transportier- und speicherbar.

⁸ Diese Maschinen beruhen auf der Ladungstrennung (+ und - Ladung).

De magnete

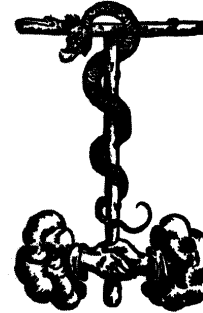
Gilbert kann sich lange Zeit nicht zu einer Veröffentlichung seiner Arbeiten entschließen. Erst 1600 wird das Werk in London gedruckt, erlebt aber dann bis 1628 allein in Deutschland drei Auflagen. In Anbetracht der Fülle an neuen Erkenntnissen, die dieses Lebenswerk enthält, bleibt das Buch über viele Jahre hinweg das Standardwerk für die Elektrizität und den Magnetismus.

Warum *Gilbert* die Herausgabe solange hinausschiebt, verrät er uns mit scharfer Zunge im Vorwort „Warum soll ich“, so heißt es dort, „... diese neue und unzulässige Philosophie dem Urteil derjenigen Leute aussetzen, die darauf geschworen sind, den Ansichten anderer zu folgen, den gefühllosen Verderbern der Wissenschaft, den gelehrten Clowns, den Federfuchsern, Sophisten, Salbadern und dem starrköpfigen Pöbel, um angeprangert, in Fetzen gerissen und mit Hohn überhäuft zu werden“. Auch für wen diese Abhandlung nun wirklich gedacht ist, steht dort, nämlich „Ihnen allein, wahre Philosophen und findige Geister, die Sie Ihre Kenntnisse nicht nur aus Büchern, sondern aus der Betrachtung der Dinge selbst beziehen, habe ich diese Grundlagen der magnetischen Wissenschaften – eine neue Art des Philosophierens geweiht“.

Bei der Erforschung des Magnetismus geht *Gilbert* systematisch vor, registriert Namen und Fundorte des Magneteisensteins, beschäftigt sich mit der Frage nach dem Unterschied von Eisenerz und Magneteisenstein und vergleicht seine Ergebnisse kritisch mit denen vorangehender Epochen. Er bestätigt dabei die bereits von *Maricourt* gemachten Feststellungen und findet außerdem viele wichtige neue Erkenntnisse.

**G V I L I E L M I G I L -
B E R T I C O L C E S T R E N -
S I S , M E D I C I L O N D I -
N E N S I S ,**

**D E M A G N E T E , M A G N E T I -
C I S Q V E C O R P O R I B V S , E T D E M A G -
n o m a g n e t e t e l l u r e ; P h y s i o l o g i a n o u a ,
p l u r i m i s & a r g u m e n t i s , & e x p e -
r i m e n t i s d e m o n s t r a t a .**



L O N D I N I

E X C V D E B A T P E T R V S S H O R T A N N O
M D C .

Titelseite jenes berühmten Buches von *Gilbert*, dem ersten wissenschaftlichen Werk über die Elektrizität

Anno MDC = Im Jahr 1600⁹

Fig. 1-1 Stimmung in der Frühzeit der Lehre von der Elektrizität. (Aus [L 1-4], S.15)

Die Speicherung elektrischer Energie gelingt mit den Leidener-Flaschen durch Ewald Jürgen VON KLEIST, dann Pieter VAN MUSSCHENBROEK, Professor an der Universität Leiden. Alessandro VOLTA gibt der Anordnung später den Namen «Kondensator».¹⁰

Im 18ten Jahrhundert experimentiert Benjamin FRANKLIN¹¹ mit Entladungsfunken, sieht die Identität zum Blitz, erfindet den Blitzableiter und definiert einen positiven und einen negative Pol.

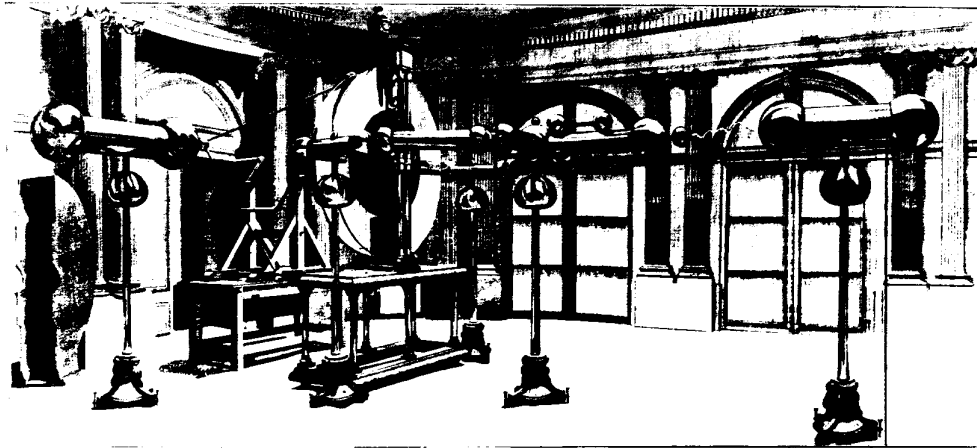
⁹ Römische Zahlen: I=1, V=5, X=10, L=50, C=100, D=500, M=1000. Alle anderen Zahlen werden durch Zusammenstellungen gebildet, wie III=3, CC=200 oder durch zwei Zahlen, wobei die erste von der zweiten abgezogen wird, wie IX=9, CM=900. Dabei darf nur stehen I vor V und X, X vor L und C, C vor D und M. Beispiel: MCMXCIII=1993.

¹⁰ Die zugehörige Masseinheit wird von CAVENDISH als Durchmesser einer Kugel in «inches» angegeben, und zwar in einem Werk aus seinem Nachlass, das 1879 erscheint, 69 Jahre nach seinem Tod und herausgegeben von James Clerk MAXWELL.

¹¹ FRANKLIN, geboren am 17. Januar 1706, hat massgebend Anteil an der Unabhängigkeitserklärung der 13 vereinigten Staaten von Amerika vom 4. Juli 1776. Auch GALVANI und Johann Wolfgang von GOETHE experimentieren mit dieser «himmlischen Elektrizität».

Es finden WHEATSTONE noch ungenau, dann Eduard WEBER, dass sich die Elektrizität mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Licht ausbreitet.¹²
Das erste Gesetz in der Lehre von der Elektrizität wird von COULOMB gefunden und GAUSS definiert daraus eine Masseinheit für die nun messbare elektrische Ladung.

Im 19ten Jahrhundert häufen sich bahnbrechende Entdeckungen. RITTER baut den ersten brauchbaren Akkumulator (Batterie). Damit steht Strom über längere Zeit (knapp eine Stunde) zur Verfügung. OERSTED zeigt, dass Strom ein Magnetfeld bewirkt. André-Marie AMPÈRE erarbeitet die Grundlagen der Elektrodynamik.¹³
Georg Simon OHM beschreibt den Zusammenhang zwischen Spannung, Strom und Widerstand.¹⁴



van Marums große Elektrisiermaschine mit der er federkielstarke Funken ziehen kann

Fig. 1-2 Die "Elektrisiermaschine" basiert auf der Trennung der Ladung. (Aus[L 1-4])

Michael FARADAY entdeckt das Induktionsgesetz¹⁵, den Transformator und den Generator. Es folgen die Funkeninduktoren, die als «Zündung» (Spule mit Unterbrecher) bei Benzinmotoren und auch als «Kuhhüter» dienen.¹⁶ Als Stromerzeuger setzen sich die Influenzmaschinen nicht durch.

Weitere wichtige Gesetze finden KIRCHHOFF, BIOT, SAVART und JOULE.

1873 erscheint «Treatise on Electricity» von James Clerk MAXWELL, dem wohl genialsten Theoretiker und Praktiker auf dem Gebiet der Elektrotechnik. Die vier MAXWELL'schen Gleichungen beschreiben die Elektrotechnik vollständig und das Zeitalter der Elektrizität und ihrer wirtschaftlichen Auswertung ist geboren.

¹² $c = 300'000 \text{ km pro Sekunde} = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$. WEBER beschreibt Strom als bewegte, geladene Teilchen (Elektronen).

¹³ Wechselwirkung des magnetischen und des elektrischen Feldes.

¹⁴ OHM'sches Gesetz. $U = R \cdot I$

¹⁵ Ebenso Joseph HENRY, ergänzt durch LENZ (LENZ'sche Regel).

¹⁶ MASSON, PAGE, RÜHMKORFF, APPS, WAGNER («Wagnerscher Hammer»).

„If we take away the scaffolding he used to build it, we find that Maxwell's beautiful edifice stands on its own. He brought together all of the laws of electricity and magnetism and made one complete and beautiful theory.“¹⁷ Richard P. FEYNMAN

Zur MAXWELL'schen Theorie

„1860 begründet JAMES CLERC MAXWELL die vollständige Theorie der elektromagnetischen Vorgänge. Betrachtet man das 19te Jahrhundert aus der Perspektive eines Menschen im Jahre 10'000, so ist diese Leistung Maxwells die bedeutendste des 19ten Jahrhunderts. Ereignisse wie zum Beispiel der amerikanische Sezessionskrieg (1861 – 1865) oder die Vormachtstellung Deutschlands unter Bismarck (1871 – 1890) verblissen neben der Bedeutung Maxwells. Maxwell sagte die Existenz der Radiowellen voraus und duetete das Licht als elektromagnetische Wellen.“

Maxwell konnte die Beschreibung der elektrischen und magnetischen Vorgänge ruhender Körper in vier partiellen Differenzialgleichungen zusammenfassen:

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \times \vec{B} &= \frac{1}{\epsilon_0 \cdot c^2} \cdot \vec{j} + \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= - \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \rho \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0\end{aligned}\tag{1-1}$$

Rasch findet die drahtgebundene Telegraphie¹⁸ mit dem eigens von Samuel MORSE entwickelten Morsealphabet¹⁹ ihre Verbreitung. Guglielmo MARCONI baut den ersten Sender, mit dem er 1901 drahtlos die Verbindung England - Amerika herstellt.

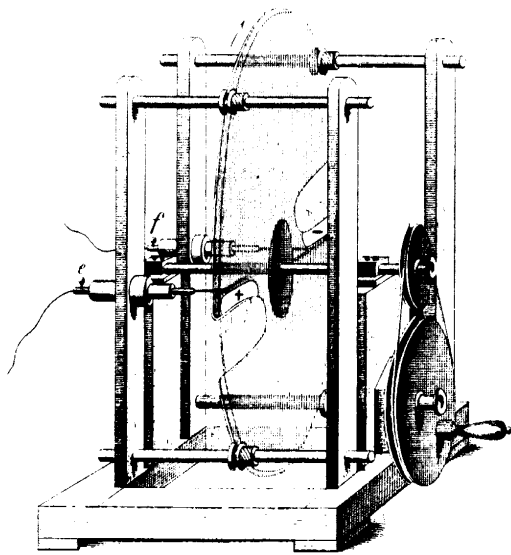
Thomas Alva EDISON, der beachtlich viele Patente anmeldet und Firmen gründet, sorgt mit seiner Glühlampe für eine rasche Ausdehnung der elektrischen Versorgungsnetze. Bereits um die Jahrhundertwende ist elektrische Energie zum Allgemeingut geworden.

Elektromotoren verändern rasch die Welt der mechanischen Industrie. Die «Übermittlung von Sprechlauten auf telegraphischem Weg», das Telefon also, wird am 14. Februar 1876 von Alexander Graham BELL und zwei Stunden später von Elisha GRAY zum Patent angemeldet.

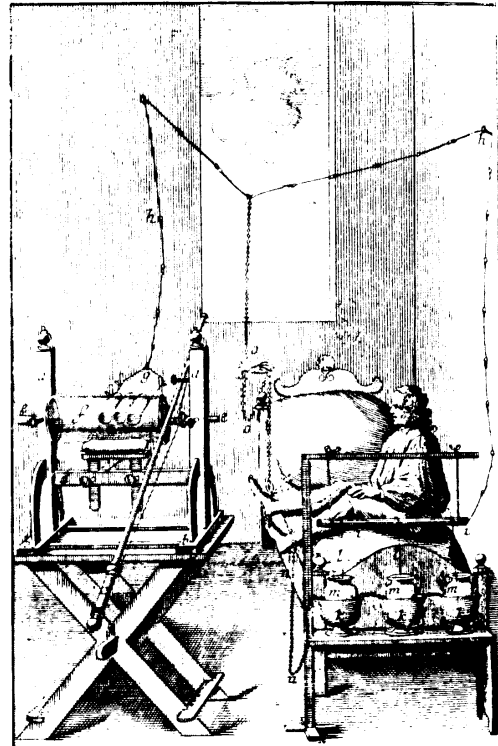
¹⁷ Edifice: Gebäude, scaffolding: Gerüst

¹⁸ gr.: τηλε Tele = fern, γραφω graphein = schreiben

¹⁹ Noch heute aktiv oder passiv im Gebrauch (Amateurfunk, Armee). Bezüglich Zeichenerkennung bei gestörten Übertragungstrecken bleibt das menschliche Ohr bis heute unübertroffen.



Influenzmaschine von *Holtz*, 1865



Die „Electrification“, eine neue Art, Kranke zu heilen

Fig. 1-3 Die „Elektrisierungsmaschine“ und ihre Anwendung. (Aus [L 1-4], S.88 und 54).

VON LIEBEN und DE FOREST entwickeln die Elektronenröhre (Verstärker) und legen damit den Grundstein zur Verbreitung des Rundfunks nach dem ersten Krieg. In der Gründung des LIEBEN - Konsortiums 1912, das die Elektronenröhre (zunächst Triode) in Serien herstellt, hat die Elektronik ihren Anfang.²⁰

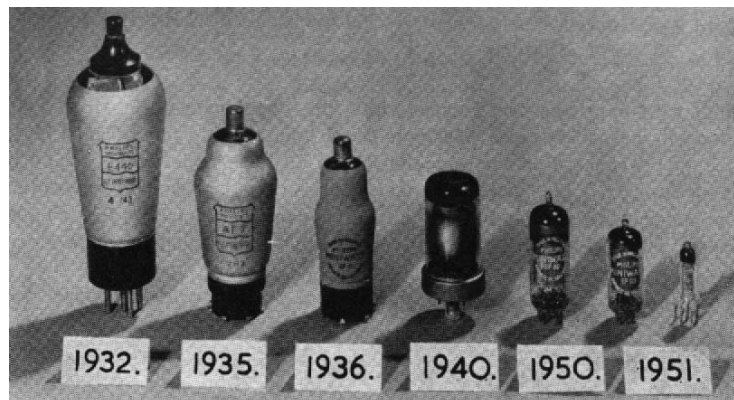
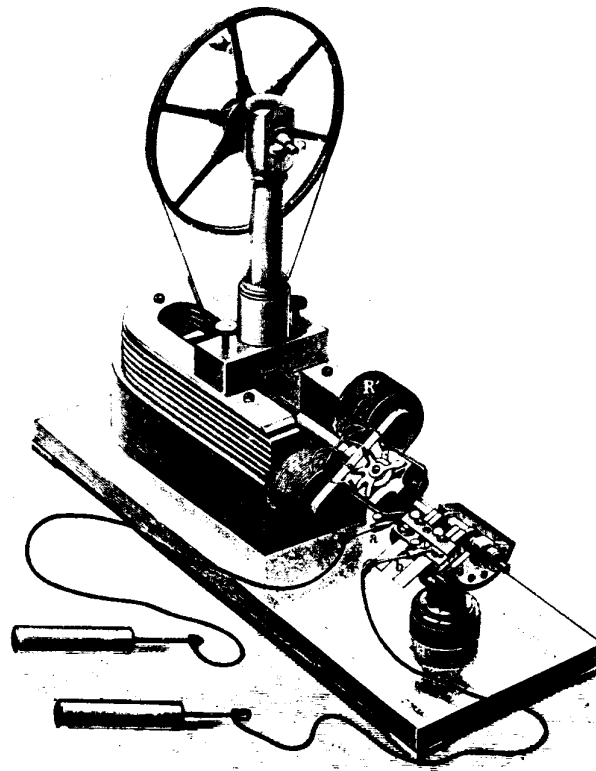


Fig. 1-4 Die Elektronenröhre in ihrer Geschichte. (Aus [L 1-1] S. 50)

²⁰ Vor VON LIEBEN und DE FOREST hat 1904 J.A.FLEMING die Vakuumröhre als Diode bereits benutzt.

Elektrotechnik und Elektronik sind eng verflochten und seit über hundert Jahren aus dem Leben der Industrienationen nicht mehr wegzudenken.²¹



Eine zweipolige Maschine mit Kommutator von *Stöhrer*

Fig. 1-5 Der Elektromotor um 1840. (Aus [L 1-4], S.193).

1.1.3 Das zwanzigste Jahrhundert

Elektronik und Elektrotechnik entwickeln sich in ihrer Vielfalt und exponentiell. 1888 kann Heinrich HERTZ die von MAXWELL theoretisch vorausgesagte elektromagnetische Welle experimentell nachweisen. Später entwickeln POPOFF in Russland und MARCONI in Italien unabhängig voneinander Sender und Empfänger für die drahtlose Übermittlung.

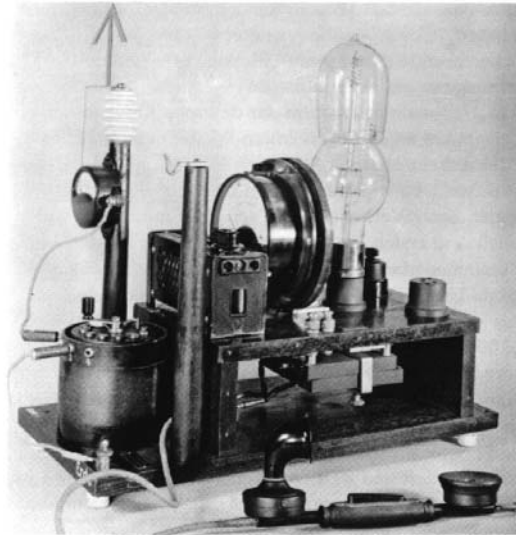
Eine erste Radiosendung wird 1906 mit einer Hochfrequenzmaschine (Langwellen) bei Berlin abgestrahlt. Es folgen 1930 die erste brauchbare Fernsehübertragung mit einer NIPKOW'schen Scheibe im UHF-70cm-Band und 1931 eine Vorführung mit einer BRAUN'schen Röhre.

Die quantitativ und qualitativ immense Entwicklung von Rundfunk und Fernsehen ist mit dem Aufkommen digitaler Techniken noch nicht abgeschlossen. Ein erstes Radargerät entwickelt HÜLSMEYER, das 1904 als «Telemobiloskop» vorgeführt wird.

²¹ In der Elektronik wird eher mit kleinen Leistungen und verstärkenden Bauelementen gearbeitet.



Schiffsfunkstation um 1910



Mit diesem Lieben-Röhren-Sender von Telefunken gelingt Meißner am 21. Juni 1913 eine Funksprechverbindung von Nauen nach Berlin

Fig. 1-6 Drahtlose Übermittlung um 1910. (Aus [L 1-4], S. 253 und 258).

Mit Hilfe der elektromagnetischen Wellen besteht heute ein weltweites Kommunikationsnetz für Anwendungen aller Art. Dieses terrestrische Netz ist mittlerweile ergänzt mit Satelliten. Damit in der Nutzung kein Chaos entsteht wurde die Fernmeldeunion gegründet. Der «International Telecommunication Union» sind praktisch alle Länder der Erde angeschlossen. Die ITU regelt das Fernmeldewesen weltweit und erlässt Vorschriften –RADIO - REGULATIONS (RR)-, die von den Regierungen in allen angeschlossenen Staaten durchzusetzen sind Fernmeldegesetz). Zur Ergänzung der RR werden von Zeit zu Zeit Konferenzen durchgeführt (World Administrative Radio Conference WARC).

Die Elektronik völlig erneuert haben BARDEEN, BRATAIN und SHOCKLEY mit der Erfindung des Germanium - Transistors 1948. Mit dieser Entwicklung und dem Basismaterial Silizium ab 1958 ist die Bahn frei für die Digitaltechnik.

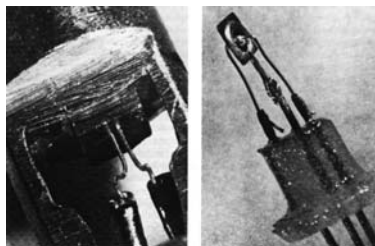


Fig. 1-7 Spitzentransistor (links) und Flächentransistor (rechts).(Aus[L 1-1] S.288)

1.1.4 Zusammenstellung

ELEKTRICITÄT

	Bernstein Magneteisenstein Schwefelkugeln	Philosophie Metaphysik Esoterik	Heilkunde Religion
Um 1600	GILBERT (de magnete) ELEKTROTECHNIK	Angewandte Wissen- schaft, welche mit mess- baren Gesetzen und mit Modellen arbeitet	
1873	J. C. MAXWELL		
	Generator 1832 Elektrische Bahn 1879 Glühlampe 1879 Transformator 1883	Telegrafie Telefonie 1876 Drahtlose Telegrafie 1896	
1900	----- 	----- 	-----
		J.A. FLEMING Röhre (Diode) 1904 ELEKTRONIK	
1912	 Haushaltgeräte aller Art	 Regelmässige Radiopro- gramme 1920 „Rundfunkfieber“ UKW Testsendungen 1929 TV Sende – Versuche 1929 Farbfernsehen 1940 Tonbandgerät 1933 Videorecorder 1953	von LIEBEN Verstärker- röhre (Triode) Radar 1935 Radioastronomie Sicherheit im Flug- und Schiffsverkehr Elektronischer Rechner mit Röhren 1946 Transistor 1948
1954	 Atomkraftwerk AKW in Russland	MIKROELEKTRONIK 1958 Integrierte Schaltungen (IC) Digital – Rechner mit IC 1961 Mikroprozessor 1970 LSI, VLSI	 TECHNISCHE INFORMATIK INFORMATIK
1985	 Generatoren bis 2 Giga- watt Leistung INDUSTRIE ELEKTRONIK	NACHRICHTEN TECHNIK	 „Alles Lernen ist nur ein sich Erinnern“ PLATO

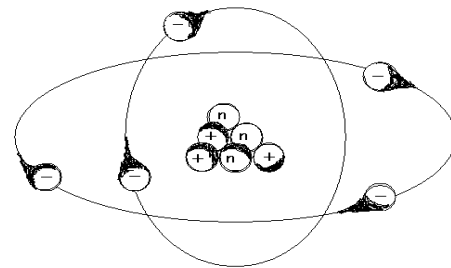
1.2 Die elektrische Ladung

Viele Erscheinungen und Naturvorgänge entziehen sich einer Beschreibung, die nur auf der Mechanik von Sir Isaac NEWTON²² gründet. Jene Kraft, welche die Elektronen auf ihre Bahn um den Atomkern zwingt, kann keine Gravitationskraft sein. Der Anteil der Gravitation an der hier wirkenden Führungskraft ist verschwindend klein (1 zu 10^{40}).

Den Elektronen und den Protonen schreiben wir einen **geladenen Zustand** zu.

Wir können diesen Zustand nicht näher deuten, kennen aber von alters her die Kraftwirkung geladener Körper aufeinander.

Die elektrische Ladung nehmen wir als gegeben hin und betrachten sie als Grundbaustein der Elektrizität.



Die elektrische Ladung ist immer gekoppelt mit Partikeln, die eine Ruhemasse haben.

Die Kenntnis der Existenz zweier verschiedener Ladungen (positiv und negativ) geht zurück auf Ch.F. de Cisternay du Foy 1698-1739.

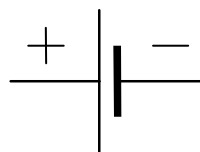
Atommodell nach Niels BOHR

-	Elektron
+	Proton
n	Neutron

Fig. 1-8 Atommodell nach Niels BOHR

Reibt man einen Siegellackstab mit einem Wolltuch und einen Glasstab mit einem Seidentuch, springen Elektronen vom Glas auf die Seide und vom Wolltuch auf den Siegellackstab. Zwei so behandelte Glas- oder Siegellackstäbe stoßen sich ab, ein Glasstab und ein Siegellackstab dagegen ziehen sich an.

Im Atom kompensieren sich die negative «Hülle»²³ und der positive Atomkern, so dass das Atom nach aussen neutral wirkt. Es ist möglich (durch Reibung, Erhitzung, chemische Prozesse, Induktion und so weiter²⁴) positive und negative Ladung zu trennen, das heisst, Ladungsquellen zu realisieren. Batterien und Induktionsmaschinen sind Beispiele.



Symbol²⁵ einer Ladungsquelle

Fig. 1-9 Ladungsquelle

²² Sir Isaac NEWTON, 1643 bis 1727. Englischer Naturforscher. Bahnbrechend für die neuere Physik, Mathematik und Astronomie durch die Entdeckung der Differential- und Integralrechnung. Entdeckt die Gesetze der Gravitation und des Spektrums. Erklärt die Gezeiten durch die Planeten- und Mondbewegung. «Philosophiae naturalis principia mathematica» 1687.

²³ Wahrscheinlichkeitsaufenthaltsraum negativer Ladung. (Keulenmodell).

²⁴ Zuführen von Energie (= Arbeit).

²⁵ Sinnbild, Sinnzeichen für bestimmte, definierbare Begriffe. Ladungsquelle: reale Quelle.

Jede Ladung besteht aus diskreten Einheiten, sogenannten Elementarladungen. Die Elementarteilchen tragen entweder keine Ladung oder eine negative oder eine positive Elementarladung e .

Name	Symbol	Masse in g	Masse in u ²⁶	Ladung
Neutron	n	$1,6748 \cdot 10^{-24}$	1,0087	0
Proton	p	$1,6725 \cdot 10^{-24}$	1,0073	+e
Elektron	e	$0,9109 \cdot 10^{-27}$	0,00055	-e

Die Ladung wird in COULOMBE gemessen. Ein Coulomb (1 C = 1 A·s) enthält 6,24 Trillionen Elementarladungen oder umgekehrt trägt eine Elementarladung

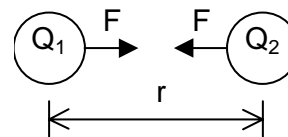
$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (1-2)$$

- Die Ladung ist **speicherbar** und **transportierbar**. Ladung lässt sich teilen bis zur Elementarladung und messen (skalare Grösse).
- In Metallen sind pro Atom ein oder zwei Elektronen durch das Zuführen von Energie frei verschiebbar; **Metalle sind elektrische Leiter**.
- In Nichtmetallen haben die Elektronen in der Regel eine starke Bindung zum Atomverband und von aussen auf Nichtmetalle gebrachte Ladung haftet dort, wo sie zugeführt wurde. Nichtmetalle dieser Art sind **Isolatoren**.
- Eine Besonderheit stellen die Halbleiter dar, die bei tiefen Temperaturen wie Isolatoren wirken und sich mit zunehmender Temperatur den Metallen nähern.

1785 konnte COULOMBE^{27 28} die Anziehungskraft zweier punktförmiger Ladungen erstmals messen. Er fand:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \quad 29$$



(1-3)

Fig. 1-10 Ladung und Kraft

BEISPIEL: Es seien gegeben $r = 1 \text{ m}$ und $Q_1 = Q_2 = Q = 1 \text{ mC}$.

Fragen: a) Wie gross ist die Kraft F zwischen den beiden Ladungen ?

b) Wieviele Elementarladungen befinden sich auf einer Kugel ? $N = ?$

c) Wie gross ist die Ladungsdichte ? (Ladung pro Quadratmeter oder pro Quadratmillimeter. Der Durchmesser der beiden metallischen Kugeln sei $d = 10 \text{ cm}$).

²⁶ $u = 1 \text{ unit (Einheit)} = 1,6605655 \cdot 10^{-24} \text{ g}$. 12ter Teil der Masse des Kohlenstoffnuklids ^{12}C . Verwendet in der Atomphysik und in der Chemie.

²⁷ Charles Augustin de COULOMB, 14.6.1736 - 23.8.1806, französischer Physiker und Ingenieur. Er fand das Coulombsche Gesetz und konstruierte die Coulombsche Drehwaage, mit der die Kräfte zwischen Ladungen und zwischen Magnetpolen gemessen werden konnten.

²⁸ C(oulomb) gilt als Mass für die Ladungsmenge. 1 C enthält $6,2423 \cdot 10^{18}$ Elementarladungen. 1C=1A·s.

²⁹ ϵ_0 heisst „Dielektrizitätskonstante“.

1.3 Der elektrische Strom

1.3.1 Beschreibung und Definition

**Bewegte elektrische Ladung bezeichnet man als Strom
oder
Strom ist bewegte Ladung**

Ein um den Atomkern laufendes (oszillierendes) Elektron bildet einen Kreisstrom (und hat ein magnetisches Feld zur Folge). Geladene, bewegte Staubpartikel und bewegte Elektronen in Metallen, hervorgerufen durch ein elektrisches Feld, sind weitere Beispiele elektrischer Ströme.

DEFINITION Die Richtung des elektrischen Stromes ist die Bewegungsrichtung der positiven Ladung (AMPÈRE 1820).^{30 31}

Zur **quantitativen**³² Beurteilung des elektrischen Stromes führen wir die **Stromstärke** ein.

DEFINITION Die Stromstärke **I** ist die pro Zeiteinheit durch den betrachteten Leiterquerschnitt transportierte Ladung.

$$I = \frac{dQ}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1-4)^{33}$$

DIMENSION Aus der Definition folgt: $[I]^{34} = C \cdot s^{-1} = A^{35}$

³⁰ André Marie AMPÈRE, 22.1.1775 - 10.6.1836, französischer Physiker und Mathematiker. Untersucht die Einwirkung elektrischer Ströme aufeinander und erklärt den Magnetismus durch atomare elektrische Kreisströme.

³¹ Was sich bewegt, sind die negativ geladenen Elektronen. Der positiv geladene Atomkern bleibt in Ruhe.

³² Quantität: Menge, Masse, Grösse. Quantitativ: der Quantität nach, mengenmässig.

³³ Streng mathematisch ist nicht dQ/dt mit $\Delta \rightarrow 0$, denn \exists eine kleinste, unteilbare Ladungsmenge, nämlich die Elementarladung. (\exists : es gibt, es ist, es hat, es existiert ...).

³⁴ $[]$ bedeutet: Dimension, Dimension sein von ...

³⁵ Darin sind **A** und **s** Grundgrössen, Grössen zu denen, im internationalen Einheitensystem (SI), eine Messvorschrift vereinbart ist. **C** ist eine abgeleitete Grösse.

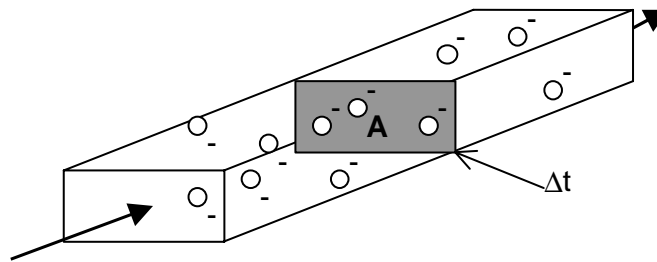


Fig. 1-11 Strom als bewegte Ladung

Vergleichend einige Werte:

- Steuerstrom eines Kleinsignal - Transistors $I_b < 1 \text{ mA}$
- Strom in einer Glühlampe (100 Watt) $I \approx 500 \text{ mA}$
- Strom in einer Starkstromleitung $I \text{ ca. } 5 \text{ kA}$
- Strom in einem mässigen Blitz $I \text{ ca. } 10 \text{ kA}$
(Blitze über 100 kA sind sehr selten)
- Gleichstrom in einer Stahlofenelektrode $I \approx 30 \text{ kA}$

Der elektrische Strom äussert sich in drei Wirkungen:

- Jeder Strom verändert seine Umgebung; diese veränderte Umgebung heisst magnetisches Feld. Über das magnetische Feld wirken Ströme mit Kräften aufeinander.
- Ein stromführender Leiter wird warm. Die Wärmewirkung wird genutzt (Heizofen, Kochplatten und so weiter).
- In elektrolytischen Leitern (Lösungen von Salzen, Säuren und Basen) bewirkt der Stromdurchgang eine Materialabscheidung an den Elektroden (den metallischen Stromzuführungen). Diese chemische Wirkung wird genutzt (Galvanisieren).

BEISPIEL:

- a) Welche Ladung ist durch den Leiterquerschnitt geflossen, wenn eine konstante Stromstärke von $I = 1,6 \text{ mA}$ während 6 min 36 s gemessen wird ?
- b) Ein Akkumulator kann eine Ladung von 91 Ah abgeben. Wie lange kann man einen Strom von 327 mA entnehmen ?
- c) Einer Quelle mit 6 Ah Ladung wird während 12 h 25 min ein konstanter Strom I entnommen. Wie gross ist dieser Strom I , wenn die Restladung 2 Ah beträgt ?

1.3.2 Stromstärkeeinheit und Mass - System

Die Stromstärkeeinheit 1 Ampere³⁶ (1 A) ist aufgrund der magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes festgelegt:

«Die gesetzliche Haupteinheit der elektrischen Stromstärke ist das Ampere (Symbol: A). Das Ampere ist der Strom, der durch zwei in einem Abstand von einem Meter parallel zueinander im leeren Raum angeordneten geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbarem Querschnitt unveränderlich fließend zwischen diesen Leitern eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ Newton je Meter hervorrufen würde.» (Bundesgesetz vom 1.4.1949).

Die Dimension jeder elektrischen Grösse lässt sich mit dem MKSA - System (SI)³⁷

³⁶ Als Einheit wird Ampere mit **e** statt **è** geschrieben.

eindeutig festlegen.³⁸

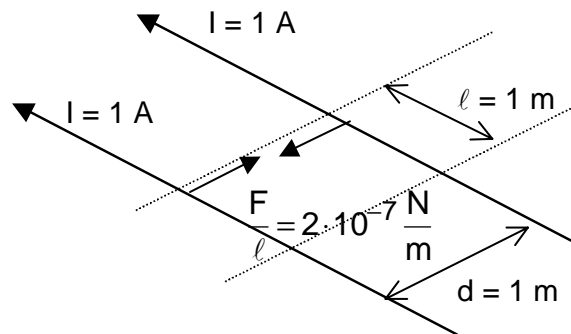


Fig. 1-12 Definition der Stromstärke

1.3.3 Elektrische Leitung im metallischen Leiter

In Metallen existieren Elektronen, die nicht stark an einzelne Atomkerne gebunden sind. Durch ein elektrisches Feld, verursacht von einer Ladungsquelle, werden diese Leitungselektronen bewegt. Dabei stossen diese Leitungselektronen dauernd mit Atomen zusammen; sie werden gebremst und wieder beschleunigt.

Die einzelnen Leitungselektronen bewegen sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Von aussen betrachtet lässt sich eine mittlere Geschwindigkeit v_e feststellen; dies bei einer Elektronendichte von n Elektronen pro Volumeneinheit.

In der kurzen Zeit gehen $N = n \cdot A \cdot v_e \cdot \Delta t$ Elektronen durch den Leiterquerschnitt A . Die dabei transportierte Ladung beträgt $\Delta Q = N \cdot e = n \cdot e \cdot A \cdot v_e \cdot \Delta t$. Für die Stromstärke I findet sich wegen $I = \Delta Q / \Delta t$: $I = n \cdot e \cdot A \cdot v_e$. Damit wird die mittlere Geschwindigkeit v_e der Leitungselektronen

$$v_e = \frac{I}{n \cdot e \cdot A} = \frac{J}{n \cdot e} \quad (1-5)$$

worin J die Stromdichte mit $J = I / A$ darstellt. (Stromdichte = $\frac{\text{Strom}}{\text{Fläche}}$)

AUFGABE Es seien $J = 5 \text{ MA m}^{-2}$ und $n = 1,3 \cdot 10^{29} \text{ m}^{-3}$.
Wie gross wird die Geschwindigkeit v der Leitungselektronen ?

³⁷ SI: Système International d'Unités. Das MKSA-System ist Teil des SI. Es stehen M für Meter (m), K für Kilogramm (kg), S für Sekunden (s) und A für Ampere (A). Das MKSA-System wurde 1948 international festgelegt, das SI im Jahre 1960. In unserem Land tritt das MKSA-System am 1.1.1950 in Kraft, das volle SI am 1.1.1978.

³⁸ Gemäss Verordnung gilt **der** Meter (in den übrigen deutschsprachigen Ländern **das** Meter).

1.3.4 Strommessung

Jeder Strom verändert seine Umgebung; diese veränderte Umgebung heisst magnetisches Feld. Über das magnetische Feld wirken Ströme mit Kräften aufeinander. Die herkömmlichen Strom – Messinstrumente gründen auf dieser Wirkung des elektrischen Stromes.

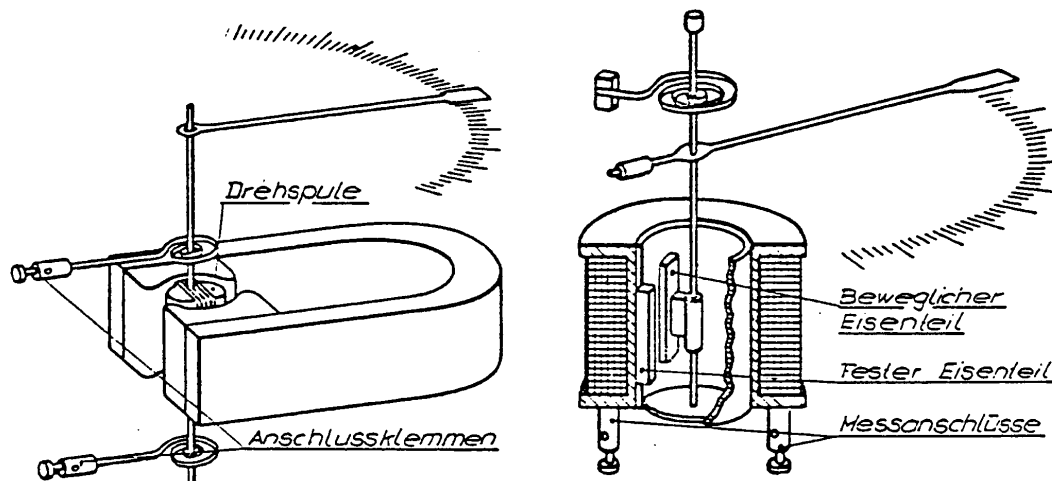


Fig. 1-13 Drehspulinstrument (links) und Weicheiseninstrument (rechts)

1.4 Die elektrische Spannung

1.4.1 Beschreibung und Definition

Eine Ladungsquelle liefert an ihren Polen getrennte Ladungen. Verbindet man die Pole mit einem Verbraucher (einer Last), so findet ein Ladungsausgleich, ein Stromfluss statt. Die gleiche Last (der Widerstand) bewirkt aus verschiedenen Quellen (Autobatterie, 230 V -Netz) einen unterschiedlich starken Strom.

Die Ladungsquellen unterscheiden sich demnach in ihrer Intensität, in ihrer Klemmenspannung **U**.

Für den beschriebenen Ladungstransport von einem Pol zum anderen muss die Quelle Arbeit (Energie) aufwenden. Auf dieser Tatsache beruht die Definition der elektrischen Spannung.

DEFINITION Die Spannung **U** einer Quelle ist gleich dem Verhältnis aus der Arbeit ΔW und der transportierten Ladung ΔQ . Dabei ist ΔW jene äussere Arbeit, die aufgewendet werden muss, um eine Ladungsmenge ΔQ unendlich langsam von einem Pol zum andern zu transportieren.

$$U = \frac{dW}{dQ} = \lim_{\Delta Q \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta Q} \quad (1-6)^{39}$$

³⁹ Streng mathematisch ist nicht dW/dQ mit $\Delta Q \rightarrow 0$, denn \exists eine kleinste, unteilbare Ladungsmenge,

DIMENSION: Aus der Definition folgt: $[U] = \text{Joule pro Coulomb} = \text{J} \cdot \text{C}^{-1} = \text{Volt} = \mathbf{V}$

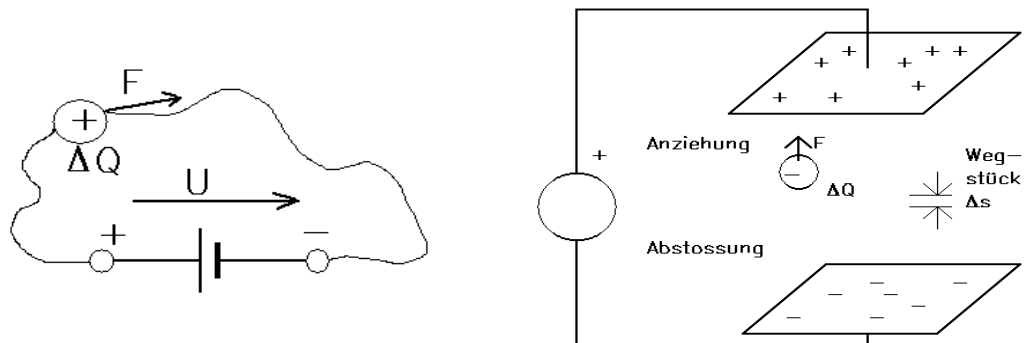


Fig. 1-14 Elektrische Spannung

Zwischen den beiden gezeigten Platten herrscht ein elektrisches Feld E . Die Probeladung ΔQ wird gegen dieses Feld E bewegt.

Vergleichend einige Werte:

- Photoelement etwa 20 mV
- Leclanché-Element 1,5 V
- Licht- und Kraftnetz 230 V / 400 V
- Freileitungen bis 1 MV

1.4.2 Zusammenschalten von Quellen

Die Spannung von zwei **in Serie geschalteten** Quellen addieren sich.

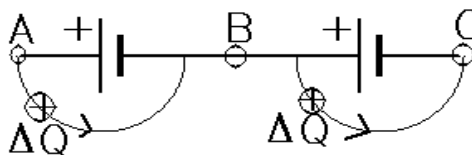


Fig. 1-15 Serieschaltung von Quellen

Beim Verschieben der Ladung ΔQ von A nach C verrichten die Quellen die Arbeit $\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2$. Damit wird $\mathbf{U} = U_1 + U_2$.

nämlich die Elementarladung. (\exists : es gibt, es ist, es hat, es existiert ...).

Beim **Parallelschalten gleicher Quellen** addieren sich die einzelnen Quellenströme zum Gesamtstrom I .

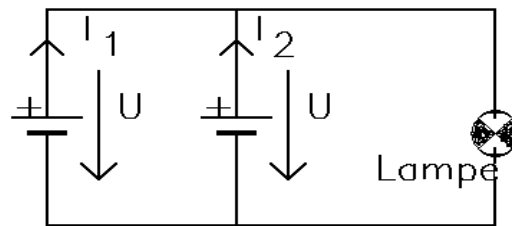


Fig. 1-16 Parallelschaltung von Quellen

Ladbare Quellen gleicher Spannung und gleicher Ergiebigkeit (Kapazität) darf man parallel schalten. Beim Parallelschalten ungleicher Quellen riskiert man unzulässig hohe Ausgleichströme zwischen den einzelnen Quellen.⁴⁰

1.4.3 Spannungsmessung

Ursprünglich wurde mit statischen Voltmetern gemessen. Diese Instrumente gründen auf der Erscheinung, dass sich entgegengesetzte Ladungen anziehen und sich gleiche Ladungen abstossen.

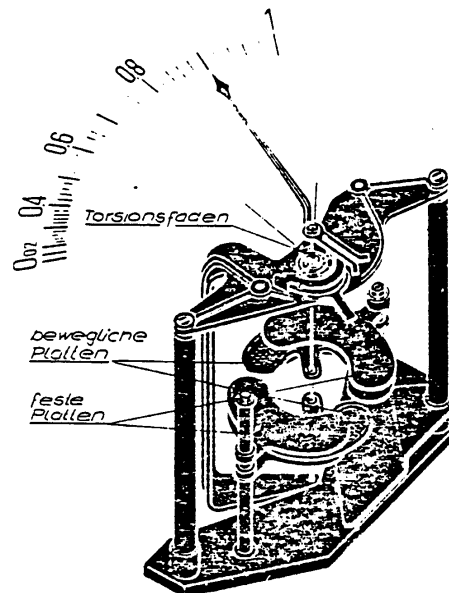


Fig. 1-17 Statisches Voltmeter

Spannungen lassen sich mit einem geeigneten Vorwiderstand R_V auch mit Drehspul- und Weicheiseninstrumenten messen.

⁴⁰ Ungleiche ladbare Quellen dürfen nicht parallel geschaltet werden.

1.5 Das Gesetz von OHM

1.5.1 Zusammenhang zwischen Spannung und Strom

Zwischen den Klemmen einer Quelle besteht ein elektrisches Feld, das bei ausreichender Ergiebigkeit der Quelle auch erhalten bleibt, wenn durch eine angeschlossene Last Ladung fliesst. Als Ursache der unmittelbar an jeder Stelle der Last (und Leiters) einsetzenden Elektronenbewegung, betrachten wir das sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitende elektrische Feld.⁴¹

Die Stromstärke, der Strom I , in der Last (im Leiter) ist eine Funktion der Quellenspannung

$$I = f(U) = I(U) \quad (1-7)^{42}$$

Die Funktion $f(U)$ hängt wesentlich von der Atomstruktur der Last (des Leiters) ab. Für die verschiedenen Materialien ist $f(U)$ bezeichnend und wird daher Charakteristik genannt. Für eine Vielzahl von Materialien ist die Charakteristik linear, das heisst es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Strom I und Spannung U . In diesem linearen Fall heisst die Funktion $I = f(U)$ OHM'sches Gesetz.

Das Gesetz von OHM⁴³, die Gesetzmässigkeit, die OHM gefunden hat, lautet:

$$U = U(I) = R \cdot I \quad (1-8)$$

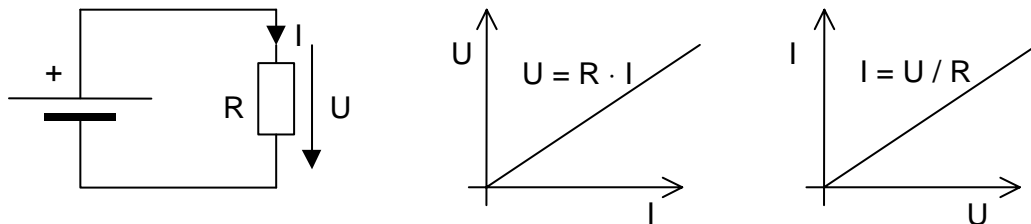


Fig. 1-18 Das Gesetz von OHM

Der von OHM gefundene Zusammenhang gilt allgemein als Definition des Widerstandes R .

DIMENSION Aus $U = R \cdot I$ folgt: $[R] = \text{Volt/Ampere} = \text{Ohm} = \Omega$ ⁴⁴,
wobei $1 \Omega = 1 \text{ VA}^{-1}$.

An Stelle des Widerstandes R wird oft dessen Reziprokwert G ⁴⁵ $= 1/R = R^{-1}$ ver-

⁴¹ Das Feld und nicht die Elektronen.

⁴² Dieser Zusammenhang ist für viele Materialien **nicht** linear.

⁴³ Georg Simon OHM, 16.3.1789 - 6.7.1854, deutscher Physiker; er fand 1826 das OHM'sche Gesetz. Nach ihm ist das Einheitenzeichen $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$ für den elektrischen Widerstand benannt.

⁴⁴ Omega, griechischer Buchstabe, gross. Zugehöriger Kleinbuchstabe: ω .

⁴⁵ **G** steht für den grossen griechischen Buchstaben Gamma. Zugehöriger Kleinbuchstabe: γ .

wendet.

G wird als Leitwert bezeichnet und hat die Dimension $[G] = [R]^{-1} = \Omega^{-1} = AV^{-1} = S = \text{Siemens}$.^{46 47}

Das Schaltzeichen für den Widerstand R besteht aus einem nichtausgefüllten Rechteck (siehe oben).

1.5.2 Widerstand prismatischer Leiter

Die verschiedenen Materialien setzen dem Strom, den bewegten Elektronen, und damit dem Energietransport, einen unterschiedlichen Widerstand **R** entgegen. Dieser Widerstand ist abhängig von der Länge l und dem Querschnitt A des Leiters (z.B. ein Draht), sowie mit ρ vom Material selbst.

Für die in der Technik wichtige Klasse der prismatischen Leiter (Atomstruktur) gilt der Zusammenhang:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (1-9)$$

$$G = \gamma \cdot \frac{A}{l} \quad (1-10)^{48}$$

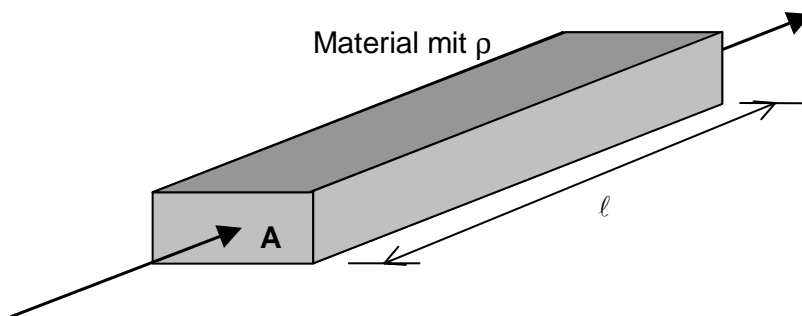


Fig. 1-19 Widerstand prismatischer Leiter

Die Materialgröße ρ heisst **spezifischer Widerstand** und ist von der Temperatur abhängig:

$$\rho(\vartheta) = \rho_{20^\circ\text{C}} \cdot [1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta + \beta \cdot (\Delta\vartheta)^2]; \quad \Delta\vartheta = \vartheta - 20^\circ\text{C} \quad (1-11)$$

α ist der lineare, materialabhängige Temperaturkoeffizient in $^\circ\text{C}^{-1}$.
 β ist der quadratische, materialabhängige Temperaturkoeffizient in $^\circ\text{C}^{-2}$.
 ρ_{20} : spezifischer Widerstand bei 20°C .

⁴⁶ Zu Ehren von Werner von SIEMENS, 13.12.1816 - 6.12.1896; zahlreiche für die gesamte Elektrotechnik grundlegende Erfindungen.

⁴⁷ In den U.S.A wird statt Siemens S auch verwendet: **mho** und das Zeichen \oslash

⁴⁸ ρ ist der spezifische Widerstand des Materials und γ der spezifische Leitwert.

Material	$[\rho] = \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$	$[\alpha] = \text{°C}^{-1}$	$[\beta] = \text{°C}^{-2}$
Aluminium Al	0,0287	$4,7 \cdot 10^{-3}$	
Gold Au	0,022		
Kohle (rein)	65	$- 2,0 \cdot 10^{-4}$	
Kohle für „Bürsten“	40		
Konstantan CuNi44	0,490		
Kupfer Cu (Mittel)	0,0175	$4,3 \cdot 10^{-3}$	
Manganin CuMn12Ni	0,4292		
NaCl n/10 Kochsalzlösg.	$1,04 \cdot 10^6$	$- 2,26 \cdot 10^{-2}$	$+ 4,26 \cdot 10^{-3}$
Neusilber	0,3		
Nickel Ni	0,07	$6,7 \cdot 10^{-3}$	
Nickelin (Legierung)	0,43	$2,3 \cdot 10^{-4}$	
Nussbaum (trocken)	$5,0 \cdot 10^{11}$		
Platin Pt	0,105	$3,9 \cdot 10^{-3}$	
Quecksilber	0,96		
Silber Ag	0,0165	$4,1 \cdot 10^{-3}$	
Stahl (Mittel)	0,12	$5,2 \cdot 10^{-3}$	
Zinn	0,11		

1.5.3 Widerstand und Mass - System

Mit der Entdeckung des Quanten – Hall – Effektes (Klitzing – Effekt) 1980 kann die Widerstandseinheit OHM genauer gemessen werden, als die SI – Einheit Ampere. Es wird geprüft, ob die Grundgrösse A durch Ω ersetzt werden soll.

1.6 Arbeit und Leistung

1.6.1 Arbeit

Der Transport von Ladung benötigt Arbeit oder Energie.⁴⁹ Das elektrische Feld verrichtet an der Ladung ΔQ die Arbeit ΔW mit $dW = U \cdot \Delta Q$.
Aus 1.3.1 kennen wir $\Delta Q = I \cdot \Delta t$, so dass $\Delta W = U \cdot I \cdot \Delta t$ wird.

Transportieren wir Ladung über einige Zeit, kann die dafür aufzuwendende Energie

⁴⁹ Die Begriffe Arbeit und Energie sind in den Naturwissenschaften einander gleichgestellt.

für stationäre ⁵⁰ Ströme und Spannungen durch Summieren ⁵¹ errechnet werden:

$$W = \sum_k \Delta W_k = U \cdot I \cdot \sum_k \Delta t_k \quad \text{und es wird}$$

$$W = U \cdot I \cdot t \quad (1-12)$$

DIMENSION [W] = V · A · s = W · s = J (= Watt-Sekunden = Joule) ^{52 53}
 Aus der Mechanik gilt: 1 J = 1 N · m = 1 kg · m² · s⁻², womit 1W = 1 kg · m² · s⁻³ wird.

1.6.2 Leistung

Leistung ist die pro Zeiteinheit verrichtete Arbeit

$$P = \frac{dW}{dt} = U \cdot \frac{dQ}{dt} \quad \text{und damit wird}$$

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R} \quad (1-13)$$

DIMENSION [P] = V · A = W = J · s⁻¹ = N · m · s⁻¹ = kg · m² · s⁻³.

1.6.3 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad η ist das Verhältnis von nutzbar gemachter Energie zur aufgewendeten Energie. $\eta \leq 1$ (oder 100%).

$$\eta = \frac{W_{\text{nutzbar}}}{W_{\text{aufgewendet}}} = \frac{W_2}{W_1} = 1 - \frac{W_1 - W_2}{W_1} = 1 - \frac{\Delta W}{W_1} \quad (1-14)$$

Falls die Energie gleichzeitig zugeführt und nutzbar gemacht wird, gilt auch $\eta = P_2/P_1$.

⁵⁰ Stationär bedeutet zeitunabhängig, in der Zeit gleichbleibend.

⁵¹ Summieren in infinitesimal kleinen Schritten. → Mathematik.

⁵² WATT James, 19.1.1736 - 19.8.1819, britischer Ingenieur, erfand die erste brauchbare Dampfmaschine grösserer Leistung.

⁵³ JOULE James Prescott, 24.12.1818 - 11.10.1889, britischer Physiker, bestimmte das mechanische Wärmeäquivalent.

1.6.4 Nichtlineare Kennlinien

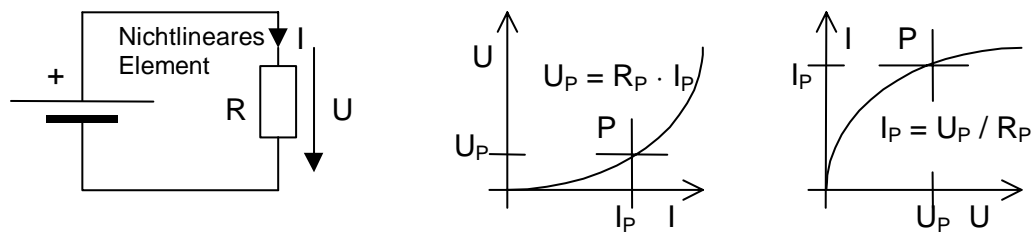


Fig. 1-20 Nichtlineare Kennlinie

Der von OHM gefundene Zusammenhang gilt allgemein als Definition des Widerstandes R , das heisst auch für nichtlineare Kennlinien.

Das Gesetz von OHM gilt hier in jedem Punkt der Kennlinie. Allerdings ist der Widerstandswert R_P in jedem Punkt verschieden.

Überlegen Sie, wie mit Hilfe der Ähnlichkeit der Widerstand oder der Leitwert für jeden Punkt konstruiert werden kann.

1.6.5 Angabe technischer Grössen

Lineare technische Grössen werden gemäss DIN 1301 folgendermassen angegeben:

Eine bis drei Stellen vor dem Komma, multipliziert mit einem Faktor 10^{3n} mit $n \in \mathbb{N}$, der mit einer Vorsatzbenennung abgelöst wird.

Beispiel: Der Wert $0,00003467 \text{ V}$ geht über in $34,67 \cdot 10^{-6} \text{ V}$ und wird geschrieben als $34,67 \mu\text{V}$.

Die Vorsatzbenennungen sind

Faktor	Vorsatzbenennung	Vorsatzzeichen	Faktor	Vorsatzbenennung	Vorsatzzeichen
10^{-18}	Atto	a	10^1	Deka	da
10^{-15}	Femto	f	10^2	Hekto	h
10^{-12}	Piko	p	10^3	Kilo	k
10^{-9}	Nano	n	10^6	Mega	M
10^{-6}	Mikro	μ	10^9	Giga	G
10^{-3}	Milli	m	10^{12}	Tera	T
10^{-2}	Zenti	c	10^{15}	Peta	P
10^{-1}	Dezi	d	10^{18}	Exa	E

Die Abkürzungen 10^{-2} Zenti, 10^{-1} Dezi, 10^1 Deka und 10^2 Hekto sind in der Elektrotechnik nicht üblich und vor den elektrischen Dimensionen nicht zulässig.

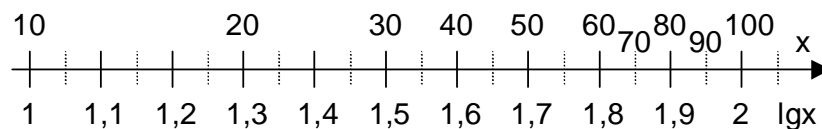
In der Atomphysik ist zusätzlich bekannt das Angström ($1\text{\AA} = 10^{-8} \text{ cm} = 10^{-10} \text{ m}$).

1.7.2 Wirkung von Körperströmen

Körperstromstärke 50 Hz in mA	~0,5	~10	0,5 bis 25	25 bis 80	80 bis 3000	> 3000
Erforderliche Berührungsspannung in V			bis 50	50 bis 100	100 bis 3000	3.000
Wahrnehmbarkeitsschwelle	+					
Loslassschwelle		+				
Muskelreizung			+	+	+	+
Schmerz				+	+	+
Vorhofflimmern					+	+
Lebensgefährliches Herzklappenflimmern					+	+

Überblick auf Wirkungen von 50-Hz Körperströmen in Anlehnung an die IEC Publikation 479

1.7.3 Logarithmische Achsen



1.8 Verzeichnisse

1.8.1 Literaturverzeichnis

- L 1-1 Biefer Hans, Industrielle Elektronik, Verlag AG Aargauer Tagblatt, Aarau/Schweiz 1966.
- L 1-2 Frohne Heinrich, Löcherer Karl-Heinz und Müller Hans, Grundlagen der Elektrotechnik, Verlag B.G. Teubner, Stuttgart – Leipzig, 1996, ISBN 3-519-46400-4.
- L 1-3 Gren Joachim und Krause Joachim, Metzler Physik, Verlag Schroedel, Hannover, 1998, ISBN 3-507-10700-7.
- L 1-4 Sattelberg Kurt, Vom Elektron zur Elektronik, Eine Geschichte der Elektrizität, AT Verlag, Aarau/Schweiz, 1982, ISBN 3-855-02144-9.

1.8.2 Figurenverzeichnis

Fig. 1-1	Stimmung in der Frühzeit der Lehre von der Elektrizität. (Aus [L 1-4], S.15).....	4
Fig. 1-2	Die „Elektriermaschine“ basiert auf der Trennung der Ladung. (Aus[L 1-4]).....	5
Fig. 1-3	Die „Elektriermaschine“ und ihre Anwendung. (Aus [L 1-4], S.88 und 54).....	7
Fig. 1-4	Die Elektronenröhre in ihrer Geschichte. (Aus [L 1-1] S. 50)	7
Fig. 1-5	Der Elektromotor um 1840. (Aus [L 1-4], S.193).....	8
Fig. 1-6	Drahtlose Übermittlung um 1910. (Aus [L 1-4], S. 253 und 258).....	9
Fig. 1-7	Spitzentransistor (links) und Flächentransistor (rechts).(Aus[L 1-1] S.288).....	9
Fig. 1-8	Atommodell nach Niels BOHR	11
Fig. 1-9	Ladungsquelle	11
Fig. 1-10	Ladung und Kraft	12
Fig. 1-11	Strom als bewegte Ladung.....	14
Fig. 1-12	Definition der Stromstärke.....	15
Fig. 1-13	Drehspulinstrument (links) und Weicheiseninstrument (rechts).....	16
Fig. 1-14	Elektrische Spannung.....	17
Fig. 1-15	Serieschaltung von Quellen.....	17
Fig. 1-16	Parallelschaltung von Quellen.....	18
Fig. 1-17	Statisches Voltmeter.....	18
Fig. 1-18	Das Gesetz von OHM.....	19
Fig. 1-19	Widerstand prismatischer Leiter	20
Fig. 1-20	Nichtlineare Kennlinie	23

1.8.3 Tabellenverzeichnis

1.8.4 Stichwortverzeichnis

Ampère	13	metallischer	15
Arbeit		prismatischer	20
Dimension	22	Leitwert	
Symbol	22	Dimension	20
Atom	11	Symbol	20
Bernstein	3	Literatur	26
elektrische Ladung	11	logarithmische Achsen	25
elektrische Spannung	16	magnetisches Feld	16
elektrischer Leiter	12	Mass-System	14
elektrischer Strom	13	Maxwell	6
Elektriermaschine	3	Metalle	12
Elektron	11	Neutron	11
Elementarladung	12	nichtlineare Kennlinie	23
Elementarteilchen	12	Ohm	
Figuren	26	Dimension	19
Frühe Geschichte	3	Gesetz	19
Geschichte		Symbol	19
frühe	3	Proton	11
Industrialisierung	3	Quelle	11
zwanzigstes Jhd.	8	Sachwortregister	27
Gesetz von Ohm	19	Spannung	
griechische Zeichen	24	Definition	16
Grössen	23	Dimension	17
Grössenangaben	23	Symbol	17
Isolator	12	Spannungsmessung	18
Kennlinie		spezifischer Widerstand	20
lineare	19	Stichworte	27
nichtlineare	23	Strom	
Körperstrom	25	Ampère	13
Kraft und Ladung	12	Definition	13
Ladung		Dimension	13
bewegte	13	Magnetfeld	16
Dimension	12	Symbol	13
Kraft	12	Wirkungen	14
Quelle	11	Stromdichte	15
Symbol	12	Tabellen	26
Ladungsquelle	11	technische Grössen	23
Leistung	21	Temperatur	20
Dimension	22	Wirkungen des Stromes	14
Symbol	22	Wirkungsgrad	22
Leiter	12		