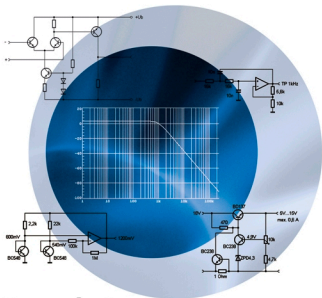


Burkhard Kainka/Herbert Bernstein



Grundwissen Elektronik

Die Grundlagen für Hobby, Ausbildung und Beruf

Teil 1: Analogtechnik

Teil 2: Messtechnik

Inhalt

1	Einleitung	11
2	Der Gleichstromkreis	13
2.1	Ladung und Strom	13
2.2	Leistung und Spannung	14
2.3	Der elektrische Widerstand, Ohmsches Gesetz	16
2.4	Drahtwiderstand	20
2.5	Reihenschaltung	24
2.6	Parallelschaltung	26
2.7	Vorwiderstände	27
2.8	Innenwiderstand	28
3	Der Wechselstromkreis	30
3.1	Effektivspannung und Leistung	30
3.2	Das Dezibel	32
3.3	Transformatoren.....	34
3.4	Kondensatoren	36
3.5	RC-Glieder	37
3.6	Kondensator-Bauformen	43
3.7	Induktivitäten	46
3.8	Spulen-Bauformen	49
3.9	Schwingkreise	51
4	Dioden-Sperrschichten	55
4.1	Leitfähigkeit und Dotierung	55
4.2	Die Diode	57
4.3	Anwendung der Diode als Gleichrichter	58
4.4	Dioden-Kennlinien	59
4.5	Dioden-Bauformen	63
5	Der bipolare Transistor	69
5.1	Aufbau und Grundfunktion	69
5.2	Der Stromverstärkungsfaktor	71
5.3	Transistor-Kennlinien	73
5.4	Transistor-Bauformen	77

Inhalt

6	Feldeffekttransistoren	81
6.1	Der J-FET	82
6.2	Doppelgate-MOS-FET	83
6.3	VMOS-Leistungstransistoren	85
7	Verstärker-Grundsaltungen	87
7.1	Der Verstärker in Emitterschaltung	87
7.2	Gegenkopplung	91
7.3	Steilheit und Innenwiderstand	94
7.4	Breitbandverstärker	96
7.5	Gleichstromgekoppelte Stufen	99
7.6	Die Kollektorschaltung (Der Emitterfolger)	102
7.7	Die Basisschaltung	104
7.8	Die Darlington-Schaltung	106
7.9	Der Differenzverstärker	107
7.10	Der Gegentaktverstärker	111
7.11	Die Konstantstromquelle	115
8	Transistor-Kippstufen	118
8.1	Statische Flip-Flops	118
8.2	Monoflops	120
8.3	Schmitt-Trigger	121
9	Transistor-Oszillatoren	122
9.1	Der Multivibrator	122
9.2	RC-Oszillatoren	123
9.3	LC-Oszillatoren	124
10	Operationsverstärker	126
10.1	Prinzipschaltung	126
10.2	Der OPV als Komparator	128
10.3	OPV-Grundsaltungen	130
10.4	Invertierende Verstärker	131
10.5	OPVs mit einfacher Spannungsversorgung	132
10.6	NF-Vorverstärker	132
10.7	Leistungsverstärker	133
10.8	Feldeffekt-OPV	135
10.9	Der OTA	141
11	Hochfrequenz-Anwendungen	144
11.1	Modulation und Demodulation	144
11.2	Das Diodenradio	145
11.3	Das Audion	146
11.4	UKW-Pendelaudion	150
11.5	HF-Oszillatoren	151

12	Stromversorgungen	154
12.1	Batterieversorgung	154
12.2	Netzteil-Grundsaltungen	155
12.3	Spannungs-Vervielfachung	158
12.4	Spannungsstabilisierung mit Z-Dioden	159
12.5	Längsregler	166
12.6	Integrierte Spannungsregler	169
12.7	Bandgap-Referenzen	172
12.8	Entkopplung der Spannungsversorgung	177
13	Spannungswandler und Schaltnetzteile	180
13.1	Spannungswandler	180
13.2	Schaltregler	183
13.3	Spannungswandler mit geschalteten Kondensatoren	186
14	Messtechnik	190
14.1	Messbereichserweiterungen beim Voltmeter	190
14.2	Messbereichserweiterung beim Amperemeter	193
14.3	Das Ohmmeter	195
14.4	Messfehler	198
14.5	Messgleichrichter	199
14.6	Logarithmierer	202
14.7	Messbrücken	204
15	Signalgeneratoren	207
15.1	Rechteck-Generatoren mit OPV	207
15.2	Rechteckgenerator mit dem 555	209
15.3	CMOS-Oszillatoren	213
15.4	Wien-Brücken-Oszillator	215
15.5	Integrierte Funktionsgeneratoren	217
15.6	Spannungsgesteuerte Oszillatoren	220
15.7	Steuerbarer Sinusgenerator mit OTA	222
16	Sensoren	227
16.1	NTC-Sensoren	227
16.2	PT100-Messwiderstände	231
16.3	KTY-Sensoren	231
16.4	Dioden und Transistoren als Temperatursensoren	233
16.5	Integrierte Temperatursensoren	234
16.6	Thermoelemente	235
16.7	Lichtsensoren: LDR	237
16.8	Fotodioden und Fototransistoren	238
16.9	Kraftsensoren und Drucksensoren	240
16.10	Piezo-Sensoren	241
16.11	Magnetfeld-Sensoren	242

Inhalt

17	Leistungselektronik	244
17.1	Lineare Leistungsregler	244
17.2	Leistungsschalter	247
17.3	Leistungs-MOS-FETs	254
17.4	PWM-Regler	258
17.5	Integrierte Leistungsschalter	260
17.6	Brückentreiber	262
17.7	Power-OPV	263
18	Filter	266
18.1	Entstörmaßnahmen	266
18.2	Passive RC-Filter	270
18.3	LC-Filter	273
18.4	Quarzfilter	276
18.5	Aktive Filter	277
18.6	Universalfilter	280
18.7	Spannungsgesteuerte Filter	280
19	Mischer und Modulatoren	283
19.1	Empfängerkonzepte	283
19.2	Multiplikative Mischer	286
19.3	Additive Mischer	289
19.4	Ringmischer	291
19.5	Integrierte Balance-Mischer	292
Literatur	296
Sachverzeichnis	297

2 Der Gleichstromkreis

Wer elektronische Schaltungen entwerfen möchte, sollte einiges über die Gesetze des Stromkreises wissen. Vieles kann mit geringem Aufwand berechnet werden, wenn man die richtigen Formeln zur Hand hat. Dieses Kapitel will die wichtigsten Gesetze und Formeln vorstellen und zugleich einige grundlegenden Prinzipien für den Entwurf elektronischer Schaltungen vermitteln.

2.1 Ladung und Strom

Die grundlegende Größe der Elektrizitätslehre ist die elektrische Ladung Q . Sie wird in Coulomb (C) gemessen. Ein Coulomb ist etwa soviel Ladung, wie in zehn Sekunden durch eine kleine Glühlampe fließt. Jedes Elektron und jeder Atomkern besitzen eine bestimmte, sehr kleine Ladung. Ein Elektron hat die Ladung $Q=1,6 \cdot 10^{-19}$ C (0,00000000000000000016 C). An elektrischen Vorgängen sind daher immer sehr viele Elektronen beteiligt.

Der elektrische Strom ist eine Bewegung elektrischer Ladung. Man kann daher die Frage stellen: Wieviel Ladung Q bewegt sich in einer bestimmten Zeit t durch einen Draht. Wenn viel Ladung in kurzer Zeit fließt, beobachtet man einen großen Strom. Die Stromstärke I wird daher so definiert:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Ladung}}{\text{Zeit}}$$

$$I = \frac{Q}{t}$$

Die Stromstärke I wird in Ampere (A) gemessen. Kleinere Ströme misst man in Milliampere (mA). 1000 mA ist gleich 1 A. Noch viel kleinere Ströme gibt man in Mikroampere (μ A) an. $1000 \mu\text{A} = 1 \text{ mA}$.

Bei der Messung der Stromstärke liegt das Messgerät nach *Abb. 2.1* immer in Reihe zum Verbraucher. Der gesamte Strom fließt durch das Amperemeter und ruft dort eine Wirkung hervor, indem er z.B. über den Umweg über magneti-

2 Der Gleichstromkreis

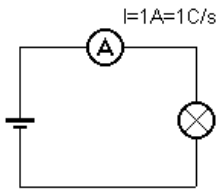


Abb. 2.1 Strom und Ladung im Stromkreis

sche Kräfte einen Zeiger bewegt. Das ideale Amperemeter beeinflusst den Stromkreis selbst nicht, weil es selbst einen sehr geringen Widerstand besitzt, sich also annähernd so verhält wie ein einfaches Kabel. Das bedeutet zugleich, dass man sehr vorsichtig sein muss, das Amperemeter niemals versehentlich parallel zur Spannungsquelle anzuschließen, denn das bedeutete einen Kurzschluss.

Meist ist es einfacher die Stromstärke zu messen als die Ladung. Man kann die Ladung aus der Stromstärke und der Zeit berechnen, indem man die obige Formel umstellt. Es soll z.B. berechnet werden, welche Ladung insgesamt von einer Akkuzelle mit den Daten 1,2 V/500 mAh bewegt werden kann. Ein Strom von 0,5 A wird eine Stunde lang, also für 3600 Sekunden aufrechterhalten. In dieser Zeit bewegt sich die Ladung:

$$Q = I \cdot t$$

$$Q = 0,5 \text{ A} \cdot 3600 \text{ s}$$

$$\underline{\underline{Q = 1800 \text{ C}}}$$

Für die gesamte Ladung von 1800 C müssen etwa 10^{22} Elektronen bewegt werden.

2.2 Leistung und Spannung

Die elektrischen Messgrößen hängen auch mit den Größen anderer physikalischer Fachbereiche zusammen. So wird z.B. die Einheit der Leistung, das Watt (W), an mechanischen Vorgängen definiert. Wenn man einen Gegenstand von einem Kilogramm gegen die Schwerkraft der Erde in zehn Sekunden um einen Meter anhebt, dann benötigt man dazu eine Leistung von ca. einem Watt. Die genaue Definition lautet: Leistung = Kraft * Weg / Zeit, die Einheit ist definiert als 1 Watt = 1 Newton * 1 Meter / 1 Sekunde. Bei einer Gewichtskraft von 9,81 N würde für das Anheben tatsächlich eine Leistung von 0,981 W benötigt. Setzt man dazu einen Elektromotor ein, wird eine elektrische Leistung

von ebenfalls etwa einem Watt benötigt, oder etwas mehr, weil der Motor nebenbei auch Wärme erzeugt. Ein Motor mit der Leistung 100 Watt könnte entsprechend mehr in kürzerer Zeit heben.

Die messbare Leistung eines elektrischen Geräts hängt von der elektrischen Stromstärke I und der elektrischen Spannung U ab (vgl. *Abb. 2.2*). Eine größere Spannung bedeutet, dass bei gleichem Strom mehr Leistung umgesetzt wird. Man kann daher die Spannung als abgeleitete Größe definieren:

$$\text{Spannung} = \frac{\text{Leistung}}{\text{Stromstärke}}$$

$$U = \frac{P}{I}$$

Umgekehrt lässt sich die elektrische Leistung berechnen, wenn Spannung und Stromstärke gemessen wurden. An einer Glühlampe wurde z.B. gemessen: $U = 6 \text{ V}$, $I = 0,4 \text{ A}$. Die Leistung beträgt dann:

$$P = U \cdot I$$

$$P = 6 \text{ V} \cdot 0,4 \text{ A}$$

$$\underline{\underline{P = 2,4 \text{ W}}}$$

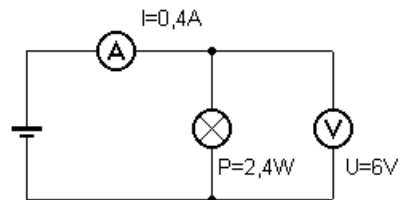


Abb. 2.2 Messung der Leistung

Diese Lampe mit der Leistung 2,4 W wird im Scheinwerfer eines Fahrrads eingesetzt. Sie ist wesentlich heller als die Rücklichtlampe mit der Leistung 0,6 W. Allgemein kann man sagen, dass mehr Leistung auch mehr Licht, mehr Wärme oder mehr Bewegung bedeutet. Viel Leistung kann durch eine hohe Spannung oder durch einen großen Strom erreicht werden. Lampen gleicher Leistung können also für unterschiedliche Spannungen ausgelegt werden.

Die elektrische Spannung wird auch als Potentialunterschied zwischen zwei Punkten einer Schaltung definiert, also z.B. zwischen den beiden Anschlüssen einer Batterie. Das elektrische Potential ist definiert als Arbeit geteilt durch

2 Der Gleichstromkreis

Ladung, gibt also an, wieviel Arbeit eine Ladung auf einem Weg verrichtet. Dazu muss ein willkürlicher Nullpunkt festgelegt werden, wozu meist die Erde verwendet wird. Eine gegen Erde gemessene Spannung kann daher auch als Potential bezeichnet werden. In elektronischen Schaltungen verwendet man oft eine Masseleitung (oft der Minusanschluss der Spannungsversorgung) als Bezugspunkt, wobei offen bleibt, ob sie tatsächlich geerdet ist. Einige Geräte werden über den Schutzleiter der Steckdose mit Erde verbunden.

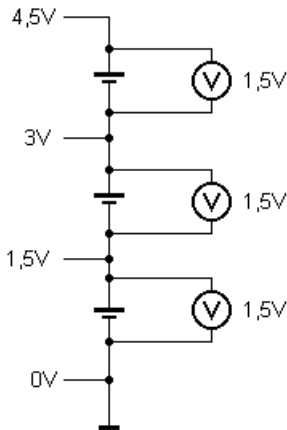


Abb. 2.3 Spannungs- und Potenzialangaben in einer Schaltung

Spannungen werden immer zwischen zwei Punkten gemessen. Deshalb bestimmt man die Spannung einer Stromquelle durch Parallelschaltung des Voltmeters. Wenn in einer Schaltung eine Spannung an einem Punkt angegeben ist, ist immer das Potenzial, also die Spannung gegenüber der gemeinsamen Masseleitung gemeint. Der Minusanschluss des Voltmeters liegt dann also an Masse. Das ideale Voltmeter ist extrem hochohmig, es fließt also nur ein vernachlässigbar kleiner Strom durch das Messgerät.

2.3 Der elektrische Widerstand, Ohmsches Gesetz

Welcher Strom in einem Stromkreis fließt, hängt einerseits von der elektrischen Spannung der Batterie ab, andererseits aber auch vom eingesetzten Verbraucher, genauer gesagt von seinem elektrischen Widerstand. Der Widerstand ist eine Eigenschaft des Verbrauchers, die man als seine Fähigkeit umschreiben kann, die schnelle Bewegung der elektrischen Ladung zu behindern. Mehr Widerstand bedeutet also bei gleicher Spannung, dass weniger Strom fließt. Der Widerstand R ist als abgeleitete Größe aus Spannung U und Stromstärke I definiert.

$$\text{Widerstand} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Stromstärke}}$$

$$R = \frac{U}{I}$$

Die Einheit des elektrischen Widerstands ist Ohm (Ω). Ein Ohm ist gleich ein Volt geteilt durch ein Ampere. Der Widerstand einer Glühlampe mit $U = 6 \text{ V}$ und $I = 0,4 \text{ A}$ kann also leicht berechnet werden:

$$R = \frac{U}{I}$$

$$R = \frac{6 \text{ V}}{0,4 \text{ A}}$$

$$\underline{\underline{R = 15 \Omega}}$$

Der Widerstand von 15 Ohm wird allerdings nur bei der vollen Spannung von 6 V gemessen. Bei kleineren Spannungen findet man weniger Widerstand, weil der Widerstand eines Metalldrahts von seiner Temperatur abhängt. Im kalten Zustand hat die Lampe nur etwa 1,5 Ω .

In der Elektronik verwendet man Widerstände als kleine, kompakte Bauteile in der Form von Kohleschicht-, Metallschicht- oder Drahtwiderständen. Diese Widerstände besitzen einen sehr konstanten elektrischen Widerstand, der als Zahl oder in Form von Farbringen aufgedruckt ist. Man findet Werte zwischen ca. 1 Ω , 1 k Ω (Kiloohm, 1000 Ω) und 1 M Ω (Megaohm, 1000000 Ω). Legt man einen Widerstand an eine bekannte Spannung, dann ist der Strom leicht zu berechnen. Ein Widerstand mit 4,7 k Ω soll z.B. an 6 V liegen (vgl. *Abb. 2.4*). Die Stromstärke ist dann:

$$I = \frac{U}{R}$$

$$I = \frac{6 \text{ V}}{4700 \Omega}$$

$$I = 0,00128 \text{ A}$$

$$\underline{\underline{I = 1,28 \text{ mA}}}$$