

Klaus Beuth/Olaf Beuth

Elementare Elektronik

mit Grundlagen der Elektrotechnik

8., überarbeitete Auflage

Vogel Communications Group

Zur Fachbuchgruppe «Elektronik» gehören die Bände:

Klaus Beuth/Olaf Beuth: Elementare Elektronik

Heinz Meister: Elektrotechnische Grundlagen (Elektronik 1)

Klaus Beuth/Olaf Beuth: Bauelemente (Elektronik 2)

Klaus Beuth/Wolfgang Schmusch: Grundsaltungen (Elektronik 3)

Klaus Beuth/Olaf Beuth: Digitaltechnik (Elektronik 4)

Helmut Müller/Lothar Walz: Mikroprozessortechnik (Elektronik 5)

Wolfgang Schmusch: Elektronische Meßtechnik (Elektronik 6)

Klaus Beuth/Stephan Breide/Christian Friedrich-Lüders/Richard Hanebuth/Günther Kurz:
Nachrichtentechnik (Elektronik 7)

Wolf-Dieter Schmidt: Sensorschaltungstechnik (Elektronik 8)

Olaf Beuth/Klaus Beuth: Leistungselektronik (Elektronik 9)

Weitere Informationen:
www.vogel-fachbuch.de

ISBN 978-3-8343-3280-6

E-Book 978-3-8343-6172-1

8. Auflage. 2013

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.
Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form
(Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen
Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt
oder verbreitet werden.

Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich
genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Hungary

Copyright 1987 by

Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

Umschlaggestaltung: Michael M. Kappenstein,
Frankfurt/M.

Vogel Communications Group GmbH & Co. KG,
Max-Planck-Straße 7/9, 97082 Würzburg,

Tel.: +49 931 418-0

Vorwort

Die Elektronik wuchs heran als ein Teilgebiet der Elektrotechnik und wurde in mehr oder weniger großem Umfang zunächst nur von den Angehörigen elektrotechnischer Berufe genutzt und weiterentwickelt. Erstaunliche Dinge konnte man jetzt verwirklichen. Elektrische Steuerungen aller Arten wurden mit Elektronik wesentlich leistungsfähiger, kleiner und sogar billiger. Die Mikroelektronik erlaubt die Herstellung sehr komplizierter Schaltungen auf kleinem Raum und zu Preisen, die man vorher nicht für möglich gehalten hätte. Mechanische Teile können in großer Zahl eingespart werden.

Mit dem Aufkommen der Digitaltechnik wuchsen der Elektronik vielfältige weitere Möglichkeiten zu. Digitale Signale werden durch nur zwei Zustände, 0 und 1, in bestimmten Codes dargestellt. Die Schaltungen arbeiten nach digitaler Logik. Elemente der Computertechnik dringen immer mehr auch in Bereiche ein, die mit dem eigentlichen Rechnen nichts zu tun haben. Der steuernde Mikrocomputer, die künstliche Intelligenz, ist in vielen Maschinen wirksam. Roboter übernehmen Teilaufgaben in der Produktion, Kraftfahrzeuge erhalten einen Bordcomputer als zentrale Steuereinheit. Werkzeugmaschinen, Geräte der Nachrichtentechnik und Haushaltsgeräte werden digital gesteuert und arbeiten zum großen Teil automatisch.

Angehörige von Berufen, die bisher der Elektrotechnik und der Elektronik weitgehend fernstanden, wie z. B. Maschinenbauer und Kraftfahrzeugtechniker, werden plötzlich mit elektronischen Bauteilen und Schaltungen konfrontiert. Sie sollen mit solchen Schaltungen umgehen können, sie montieren, in Betrieb nehmen und warten und nach Möglichkeit auch reparieren. Vor allem erwartet man von ihnen, dass sie Fehler eingrenzen und beurteilen können. Das alles geht nicht ohne fundierte Kenntnisse.

Führungskräfte müssen informiert sein. Ihr Wissen muss den großen Überblick erlauben und Entscheidungen ermöglichen, die vielleicht sehr weitreichend sind. Grundkenntnisse sind erforderlich. Unbedingt notwendig ist die Kenntnis der Begriffe. Ohne Begriffskennntnis kann man Gesprächen und Vorträgen nicht folgen und ist so ziemlich hilflos. Man sollte mitreden können.

Die Autoren haben es sich zur Aufgabe gemacht, ein Buch vorzulegen, das alle wichtigen Teilgebiete der Elektronik leicht verständlich, klar gegliedert und mit hohem Informationswert darstellt. Es war ihr Ziel, das Wesentliche herauszuarbeiten und zu erläutern. Hierbei wurde berücksichtigt, dass die Grundkenntnisse der Elektrotechnik für das Verständnis elektronischer Bauelemente und Schaltungen unbedingt notwendig sind. «Von den Grundgrößen Strom, Spannung und Widerstand bis zur Mikrocomputerschaltung», so könnte der Untertitel lauten.

Erfahrungen aus der Erstellung und aus der Überarbeitung langjährig erfolgreicher Fachbücher über Gebiete der Elektronik wurden eingebracht. Bei der Darstellung des Stoffes konnten Erkenntnisse aus der Praxis und aus vielfältiger Lehrtätigkeit mitverwendet werden. Wichtige Merksätze stehen in roten Kästen und sind so leicht auffindbar. Die Formeln sind nach ihrer Bedeutung rot unterlegt herausgehoben. Der Aufbau des Buches ist so, dass ein Selbststudium leicht möglich sein dürfte.

Die Autoren wünschen den Benutzern des Buches guten Arbeitserfolg. Für Anregungen und Verbesserungsvorschläge sind sie stets dankbar.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Elektrische Grundgrößen	17
1.1 Elektrische Ladung	17
1.2 Elektrische Spannung	19
1.3 Elektrischer Strom	22
1.4 Elektrischer Widerstand	24
1.5 Elektrischer Leitwert	26
1.6 Leiter und Nichtleiter	26
1.6.1 Spezifischer Widerstand	26
1.6.2 Leitfähigkeit	28
1.7 Widerstand und Temperatur	28
2 Elektrische Stromkreise	31
2.1 Ohmsches Gesetz	31
2.2 Unverzweigte Stromkreise, Reihenschaltung	32
2.3 Verzweigte Stromkreise, Parallelschaltung	34
2.4 Widerstandsnetzwerke	36
2.5 Vorwiderstände	37
2.6 Spannungsteiler	38
2.6.1 Unbelasteter Spannungsteiler	38
2.6.2 Belasteter Spannungsteiler	38
2.7 Brückenschaltung	40
3 Arbeit und Leistung bei Gleichstrom	43
3.1 Elektrische Arbeit	43
3.2 Elektrische Leistung	44
3.3 Wirkungsgrade	45
4 Spannungserzeuger	47
4.1 Urspannung und Innenwiderstand	47
4.2 Ersatzspannungsquelle	48
4.3 Reihenschaltung von Spannungserzeugern	49
4.4 Parallelschaltung von Spannungserzeugern	51
5 Elektrisches Feld	53
5.1 Grundlagen	53
5.2 Kapazität, Ladung und Energie	55
5.3 Kondensatoren an Gleichspannung	57
6 Magnetisches Feld	63
6.1 Grundlagen	63
6.2 Dauermagnetismus	64
6.3 Magnetische Kreise	66
6.4 Kraftwirkung magnetischer Felder	67

6.5	Induktion und Selbstinduktion	69
6.6	Abschirmung magnetischer Felder	73
6.7	Spulen an Gleichspannung	73
7	Wechselspannung und Wechselstrom	77
7.1	Sinusförmige Wechselspannungen	77
7.2	Sinusförmige Wechselströme	80
7.3	Liniendiagramm und Phasenverschiebung	81
7.4	Zeigerdiagramme	82
7.5	Nichtsinusförmige Wechselgrößen	83
8	Blindwiderstände und Scheinwiderstand	87
8.1	Induktiver Blindwiderstand und Blindleitwert	87
8.2	Kapazitiver Blindwiderstand und Blindleitwert	89
8.3	Scheinwiderstand und Scheinleitwert	92
9	Arbeit und Leistung bei Wechselstrom	95
9.1	Elektrische Leistung	95
9.2	Elektrische Arbeit	97
10	Mehrphasenwechselstrom (Drehstrom)	99
10.1	Drehstromsysteme	99
10.2	Anwendungen	100
10.3	Sternschaltung	100
10.4	Dreieckschaltung	101
10.5	Leistung und Arbeit bei Drehstrom	102
11	Lineare und nichtlineare Widerstände	105
11.1	Allgemeine Eigenschaften	105
11.2	Festwiderstände	107
11.2.1	Eigenschaften von Festwiderständen	107
11.2.2	Bauarten von Festwiderständen	110
11.3	Einstellbare Widerstände	113
11.4	Heißleiterwiderstände (NTC-Widerstände)	117
11.5	Kaltleiterwiderstände (PTC-Widerstände)	119
11.6	Spannungsabhängige Widerstände (VDR)	122
12	Kondensatoren und Spulen	127
12.1	Kondensatoren	127
12.1.1	Eigenschaften von Kondensatoren	127
12.1.2	Bauarten von Kondensatoren	130
12.2	Spulen	137
12.2.1	Eigenschaften von Spulen	137
12.2.2	Bauarten von Spulen	138
13	Frequenzabhängige Zwei- und Vierpole	141
13.1	Allgemeines	141
13.2	Reihenschaltung von R und C	141

13.3	Reihenschaltung von R und L	143
13.4	RC-Glied	143
13.5	CR-Glied	145
13.6	RL-Glied	147
13.7	LR-Glied	149
13.8	RC-Glied als Integrierglied	150
13.8.1	Arbeitsweise	150
13.8.2	Integrationsvorgang	151
13.9	CR-Glied als Differenzierglied	153
13.9.1	Arbeitsweise	153
13.9.2	Differentiationsvorgang	154
14	Halbleiterdioden	157
14.1	Arbeitsweise von Halbleiterdioden	157
14.2	Bauarten von Halbleiterdioden	160
14.2.1	Flächendioden	160
14.2.2	Spitzendioden	161
14.2.3	Leistungsdioden (Gleichrichter)	162
14.3	Kennwerte und Grenzwerte	163
14.4	Prüfen von Halbleiterdioden	164
14.5	Halbleiterdioden als Gleichrichter	165
14.5.1	Einweg-Gleichrichterschaltung (Einpuls-Mittelpunktschaltung M 1)	165
14.5.2	Siebketten	166
14.5.3	Mittelpunkt-Zweiweg-Gleichrichterschaltung (Zweipuls-Mittelpunktschaltung M 2)	168
14.5.4	Brücken-Zweiweg-Gleichrichterschaltung (Zweipuls-Brückenschaltung B 2)	169
14.5.5	Mehrphasen-Gleichrichterschaltungen	170
15	Halbleiterdioden mit speziellen Eigenschaften	173
15.1	Z-Dioden	173
15.1.1	Arbeitsweise	173
15.1.2	Kennlinien, Kennwerte, Grenzwerte	174
15.1.3	Anwendungen	178
15.2	Kapazitätsdioden	180
15.2.1	Aufbau und Arbeitsweise	180
15.2.2	Kennlinien, Kennwerte, Grenzwerte	181
16	Bipolare Transistoren	185
16.1	Bauarten bipolarer Transistoren	186
16.2	nnp-Transistoren	187
16.3	pnp-Transistor	189
16.4	Kennlinien, Kennwerte, Grenzwerte	190
16.4.1	Kennlinien	190
16.4.2	Kennwerte	194
16.4.3	Grenzwerte	196
16.4.4	Datenblätter	197

16.5	Transistorkühlung	197
16.6	Verstärker-Grundsaltungen	199
16.6.1	Verstärkerstufe in Emitterschaltung	199
16.6.2	Verstärkerstufe in Basisschaltung	202
16.6.3	Verstärkerstufe in Kollektorschaltung	203
16.7	Transistor als Schalter	204
16.7.1	Übersteuerungszustand und Sättigungsspannungen	204
16.7.2	Transistor-Schalterstufen	205
17	Unipolare Transistoren	207
17.1	Sperschicht-Feldeffekttransistoren	207
17.1.1	Aufbau und Arbeitsweise	207
17.1.2	Kennlinien, Kennwerte, Grenzwerte	211
17.1.3	Anwendungen	213
17.2	MOS-Feldeffekttransistoren	213
17.2.1	Aufbau und Arbeitsweise	214
17.2.2	Kennlinien, Kennwerte, Grenzwerte	217
17.2.3	Anwendungen	220
17.3	Dual-Gate-MOS-FET	222
18	Verstärkerschaltungen	225
18.1	Wechselspannungsverstärker	225
18.1.1	Anforderungen	225
18.1.2	Mehrstufige Verstärker	227
18.1.3	Leistungsverstärker	228
18.2	Gleichspannungsverstärker	228
18.3	Differenzverstärker	229
18.4	Operationsverstärker	230
18.4.1	Einführung	230
18.4.2	Aufbau und Arbeitsweise	231
18.4.3	Idealer Operationsverstärker	234
18.4.4	Realer Operationsverstärker	235
18.4.5	Anwendungsbeispiele	236
19	Kippschaltungen	239
19.1	Bistabile Kippstufe	239
19.1.1	Schaltung und Arbeitsweise	239
19.1.2	Anwendungsbeispiele	242
19.2	Monostabile Kippstufe	243
19.2.1	Schaltung und Arbeitsweise	243
19.2.2	Anwendungsbeispiele	246
19.3	Astabile Kippschaltung (Multivibrator)	248
19.3.1	Schaltung und Arbeitsweise	248
19.3.2	Anwendungsbeispiele	252
19.4	Schmitt-Trigger	253
19.4.1	Schaltung und Arbeitsweise	253
19.4.2	Anwendungsbeispiele	255

20	Oszillatorschaltungen	259
20.1	Prinzip einer Oszillatorschaltung	259
20.2	Meißner-Oszillator	260
20.3	Hartley-Oszillator (Induktiver Dreipunktoszillator)	261
20.4	Colpitts-Oszillator (Kapazitiver Dreipunktoszillator)	262
20.5	Quarzoszillatoren	262
21	Stabilisierungsschaltungen	263
21.1	Schaltungen zur Spannungsstabilisierung	263
21.2	Schaltungen zur Stromstabilisierung	265
22	Integrierte Schaltungen	267
22.1	Allgemeines	267
22.2	Integrationstechniken	268
22.2.1	Monolithtechnik (Halbleiterblocktechnik)	268
22.2.2	Hybridtechnik	272
22.3	Analoge und digitale integrierte Schaltungen	274
22.3.1	Digitale IC	274
22.3.2	Analoge IC	275
22.4	Integrationsgrad und Packungsdichte	275
22.5	Vor- und Nachteile integrierter Schaltungen	276
22.6	Programmierbare integrierte Schaltungen	277
23	Thyristoren	281
23.1	Vierschichtdioden (Thyristordioden)	281
23.1.1	Aufbau und Arbeitsweise	281
23.1.2	Kennwerte und Grenzwerte	283
23.1.3	Anwendungen	284
23.2	Thyristoren (Rückwärtssperrende Thyristortrioden)	284
23.2.1	Aufbau und Arbeitsweise	284
23.2.2	Kennwerte und Grenzwerte	288
23.2.3	Anwendungsbeispiele	290
23.3	Thyristortetroden	294
23.3.1	Aufbau und Arbeitsweise	294
23.3.2	Kennwerte und Grenzwerte	295
23.3.3	Anwendungen	295
24	Diac und Triac	297
24.1	Diac	297
24.1.1	Zweirichtungsdioden	297
24.1.2	Zweirichtungs-Thyristordioden	299
24.1.3	Anwendungen von Diac	300
24.2	Triac	301
24.2.1	Aufbau und Arbeitsweise	301
24.2.2	Kennwerte und Grenzwerte	304
24.3	Steuerungen mit Diac und Triac	306

25	Optoelektronik	309
25.1	Innerer fotoelektrischer Effekt	309
25.2	Fotowiderstände	310
25.2.1	Aufbau und Arbeitsweise	310
25.2.2	Kennwerte und Grenzwerte	311
25.2.3	Anwendungen	312
25.3	Solarzellen	312
25.3.1	Aufbau und Arbeitsweise	312
25.3.2	Solarzelltypen	315
25.4	Fotodioden	317
25.4.1	Aufbau und Arbeitsweise	317
25.4.2	Kennwerte und Grenzwerte	318
25.4.3	Anwendungen	319
25.5	Fototransistoren	319
25.5.1	Aufbau und Arbeitsweise	319
25.5.2	Kennwerte und Grenzwerte	320
25.5.3	Anwendungen	320
25.6	Leuchtdioden (LED)	321
25.6.1	Grundlagen	321
25.6.2	Aufbau und Arbeitsweise	322
25.6.3	Technologie der LED	324
25.6.4	Bauformen	324
25.6.5	Versorgungsschaltungen	325
25.6.6	LED-Farben	328
25.6.7	Anwendungen	329
25.6.8	Wirkungsgrad	329
25.6.9	Lebensdauer, Temperatureinflüsse	330
25.6.10	Vorteile/Nachteile zu konventionellen Leuchtmitteln	330
25.6.11	Kennwerte und Grenzwerte	330
25.7	Opto-Koppler	331
25.7.1	Aufbau und Arbeitsweise	331
25.7.2	Kennwerte und Grenzwerte	332
25.7.3	Anwendungen	332
26	Halbleiterbauelemente mit speziellen Eigenschaften	333
26.1	Hallgeneratoren	333
26.1.1	Halleffekt	333
26.1.2	Hallspannung	334
26.1.3	Aufbau	335
26.1.4	Kennwerte und Grenzwerte	335
26.1.5	Anwendungen	336
26.2	Feldplatten	337
26.2.1	Aufbau	337
26.2.2	Arbeitsweise	338
26.2.3	Kennwerte und Grenzwerte	339
26.2.4	Anwendungen	340
26.3	Magnetdioden	340
26.3.1	Aufbau	341

26.3.2	Arbeitsweise	341
26.3.3	Kennwerte und Grenzwerte	342
26.3.4	Anwendungen	342
26.4	Druckabhängige Halbleiterbauelemente	343
26.4.1	Piezoeffekt	343
26.4.2	Piezohalbleiter	343
26.5	Flüssigkristall-Bauteile	344
26.5.1	Flüssige Kristalle	344
26.5.2	Aufbau von Anzeigebauteilen	344
26.5.3	Anwendungen	346
27	Digitale Grundschaltungen	347
27.1	Grundbegriffe	347
27.1.1	Analoge und digitale Signale	347
27.1.2	Logische Zustände «0» und «1»	349
27.2	Logische Verknüpfungen	350
27.2.1	UND-Verknüpfung	350
27.2.2	ODER-Verknüpfung	353
27.2.3	Verneinung	354
27.2.4	NAND-Verknüpfung	355
27.2.5	NOR-Verknüpfung	356
27.2.6	EXKLUSIV-ODER-Glied (XOR)	357
28	Digitale Codes	359
28.1	Darstellung von Ziffern und Zahlen	359
28.1.1	Duales Zahlensystem	359
28.1.2	BCD-Code (8-4-2-1-Code)	361
28.2	Weitere Binärcodes	362
28.3	Binäre Speicher	362
29	Schaltungsanalyse	365
29.1	Allgemeines	365
29.2	Soll-Verknüpfung	365
29.3	Ist-Verknüpfung	367
30	Schaltalgebra	371
30.1	Grundlagen	371
30.2	Bestimmung der Funktionsgleichung einer Schaltung	372
30.3	Darstellung der Schaltung nach der Funktionsgleichung	373
30.4	Funktionsgleichung und Kontaktschema	374
30.5	Nutzungsmöglichkeiten der Schaltalgebra	375
31	Schaltungssynthese	377
32	Schaltkreisfamilien	381
32.1	Schaltungen in Relais-Technik	381
32.2	DTL-Technik	381
32.3	TTL-Technik	383

32.4	MOS-Technik	384
32.5	ECL-Technik	386
32.6	Pegelangaben «Low» und «High»	387
32.7	Positive und negative Logik	388
33	Flipflops	391
33.1	Eigenschaften von Flipflops	391
33.2	SR-Flipflops	394
33.3	T-Flipflops	395
33.4	JK-Flipflops	395
33.5	Master-Slave-Flipflops	396
33.6	Anwendungen	397
34	Digitale Auswahl- und Verbindungsschaltungen	399
34.1	Datenselektor, Multiplexer, Demultiplexer	399
34.1.1	4-Bit-zu-1-Bit-Datenselektor	399
34.1.2	2 × 4-Bit-zu-4-Bit-Datenselektor	400
34.1.3	4 × 8-Bit-zu-8-Bit-Datenselektor	400
34.1.4	1-Bit-zu-4-Bit-Demultiplexer	401
34.2	Adressdecodierer	402
34.3	Busschaltungen	403
35	Register- und Speicherschaltungen	407
35.1	Schieberegister	407
35.2	Flipflop-Speicher	411
35.3	Schreib-Lese-Speicher (RAM)	413
35.3.1	Speicheraufbau	414
35.3.2	Speicherkenngößen	416
35.4	Festwertspeicher (ROM)	417
35.5	Programmierbarer Festwertspeicher (PROM)	418
35.6	Löschbare programmierbare Festwertspeicher	419
35.7	Magnetkernspeicher	421
36	Zählerschaltungen	425
36.1	Frequenzteiler	425
36.2	Vorwärtszähler	427
36.3	Rückwärtszähler	428
36.4	Zähldekaden	428
37	D/A-Umsetzer, A/D-Umsetzer	431
37.1	Digital-Analog-Umsetzer (D/A-Umsetzer)	431
37.1.1	Prinzip der Digital-Analog-Umsetzer	431
37.1.2	D/A-Umsetzer mit gestuften Widerständen	433
37.2	Analog-Digital-Umsetzer (A/D-Umsetzer)	433
37.2.1	Prinzip der Analog-Digital-Umsetzung	434
37.2.2	Eigenschaften von A/D-Umsetzern	434

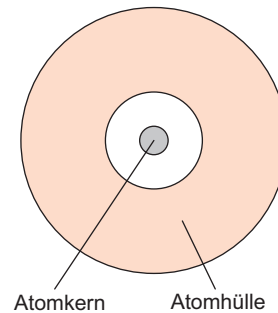
38	Rechenschaltungen	437
	38.1 Halbaddierer	437
	38.2 Volladdierer	438
	38.3 Paralleladdierschaltung	439
	38.4 Addier-Subtrahier-Werk	440
39	Mikroprozessoren und Mikrocomputer	443
	39.1 Der Mikroprozessor als Universalschaltung	443
	39.2 Arithmetisch-logische Einheit (ALU)	443
	39.3 Von der ALU zum Mikroprozessor	446
	39.4 Mikroprozessorbausteine	447
	39.4.1 Mikroprozessortypen	447
	39.4.2 Mikroprozessor SAB 8080 A	448
	39.5 Zusatzbausteine für Mikroprozessoren	452
	39.6 Mikrocomputer (Mikrocontroller)	453
	Stichwortverzeichnis	455

1 Elektrische Grundgrößen

1.1 Elektrische Ladung

Alle Materie ist aus Atomen aufgebaut. Es gibt etwa 100 verschiedene Atomarten. Jede Atomart gehört zu einem bestimmten chemischen Grundstoff, einem sogenannten chemischen Element. Ein Atom besteht aus einem Atomkern und einer Atomhülle (Bild 1.1a).

Bild 1.1a
Prinzipieller Atomaufbau



Die verschiedenen Atomarten unterscheiden sich durch den Aufbau ihres Atomkerns und ihrer Atomhülle. Die Atomhülle wird durch Elektronen gebildet, die den Atomkern auf verschiedenen Bahnen umkreisen (Bild 1.1b). Das einfachste Atom ist das Wasserstoff-Atom. Sein Kern besteht aus einem Teilchen, das Proton genannt wird. Um dieses Proton kreist ein Elektron. Das Kupferatom hat im Kern 29 Protonen und 35 Teilchen, die Neutronen genannt werden. Die Hülle wird durch 29 Elektronen gebildet. Das Aufbauschema zeigt Bild 1.1c.

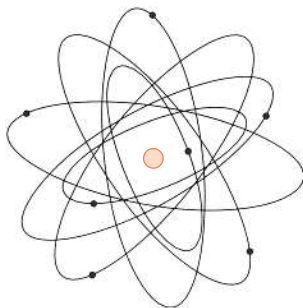


Bild 1.1b Atomkern mit Elektronenbahnen

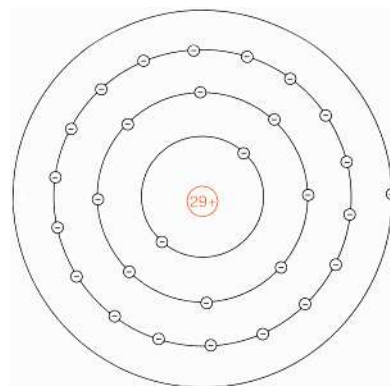


Bild 1.1c Kupferatom, Aufbauschema. Ein Kupferatom enthält 29 Protonen im Kern und 29 Elektronen in der Hülle.

Die Atome haben in ihrem Inneren Elektrizitätsteilchen, sogenannte elektrische Elementarladungen. Es gibt zwei verschiedene Arten von elektrischen Elementarladungen. Sie werden als positive und als negative Elementarladungen oder auch als positive und negative Elektrizitätsteilchen bezeichnet.

**Merksatz**

Jedes Proton enthält ein positives Elektrizitätsteilchen.

**Merksatz**

Jedes Elektron enthält ein negatives Elektrizitätsteilchen.

Neutronen sind elektrisch neutral. Eine positive elektrische Elementarladung und eine negative elektrische Elementarladung heben sich in ihrer Wirkung nach außen hin auf. Vollständige Atome haben gleich viele Elektronen wie Protonen, also gleich viele positive wie negative Elektrizitätsteilchen. Sie sind elektrisch neutral, also ungeladen.

Die Protonen sind in den Atomkernen fest eingebaut. Die Elektronen der Hüllen können zum Teil wegwandern. Es können auch zusätzliche Elektronen in die Hüllen aufgenommen werden. Atome, die mehr Elektronen als Protonen haben, sind negativ geladen. Sie werden als negative Ionen bezeichnet. Hat ein Atom weniger Elektronen als Protonen, so ist es positiv geladen, also ein positives Ion.

**Definition**

Elektrisch geladene Atome werden Ionen genannt.

Was für einzelne Atome gilt, gilt auch für ganze Körper. Enthält ein Körper mehr positive Elektrizitätsteilchen als negative, so ist er positiv geladen. Enthält er mehr negative Elektrizitätsteilchen als positive, so ist er negativ geladen.

**Merksatz**

Die Menge der überzählig vorhandenen Elektrizitätsteilchen ist die elektrische Ladung.

Zum einfachen Schreiben von Formeln verwendet man international für die elektrische Ladung den Buchstaben Q . Q ist das Formelzeichen für elektrische Ladung. Zum Messen der Größe einer Ladung wird eine Einheit benötigt. Diese Einheit heißt Coulomb. Die Abkürzung ist C. Ein Coulomb besteht aus einer sehr großen Zahl von Elektrizitätsteilchen.

**Definition**

$1 \text{ Coulomb} = 6,24 \cdot 10^{18} \text{ Elektrizitätsteilchen}$

Neben Coulomb wird auch die Einheit Amperesekunde verwendet ($1 \text{ C} = 1 \text{ As}$).

1.2 Elektrische Spannung

Merksatz

Zwischen zwei Körpern mit unterschiedlicher Ladung besteht eine elektrische Spannung.



Betrachten wir zwei isoliert aufgestellte Metallkugeln, z.B. aus Kupfer (Bild 1.2a). Die Kugeln sind zunächst elektrisch neutral, d.h., sie enthalten gleich viele positive und negative Elektrizitätsteilchen. Da jedes positive Elektrizitätsteilchen fest in einem Proton sitzt und jedes negative Elektrizitätsteilchen fest in einem Elektron, so kann man auch sagen, die Kugeln enthalten gleich viel Protonen und Elektronen. Die Elektronen der äußeren Bahn können in Metallen frei wandern, die Protonen nicht.

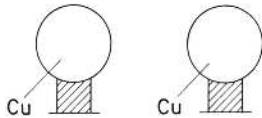


Bild 1.2a Ungeladene Metallkugeln (elektrisch neutral)

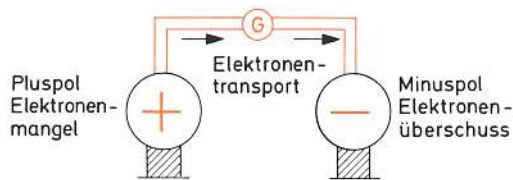


Bild 1.2b Positiv und negativ geladene Metallkugeln

Mit einem später noch näher zu beschreibenden Gerät werden nun Elektronen von der linken Kugel auf die rechte Kugel gepumpt. Die rechte Kugel bekommt so einen Elektronenüberschuss. Die linke Kugel hat Elektronenmangel (Bild 1.2b). Die positiven und die negativen Ladungsträger werden getrennt. Hierzu ist eine Arbeit erforderlich.

Die rechte Kugel mit dem Elektronenüberschuss ist negativ geladen. Sie bildet den *Minuspol*.

Die linke Kugel ist positiv geladen. Hier fehlen Elektronen. Die positiven Protonen sind in der Überzahl. Dieser Pol wird *Pluspol* genannt.

Definition

Minuspol: Pol mit Elektronenüberschuss

Pluspol: Pol mit Elektronenmangel



Eine elektrische Spannung, auch kurz Spannung genannt, kann nur zwischen zwei Polen bestehen. Ein einziger Pol kann keine Spannung haben. Das Gerät, mit dem die Elektronen von dem positiven Pol zum negativen Pol gepumpt werden, heißt *Spannungsquelle* oder Generator (Spannungserzeuger).

Merksatz

Elektrische Spannung entsteht durch Trennung von positiven und negativen Ladungsträgern.



Für die Spannungserzeugung können sehr unterschiedliche Generatoren verwendet werden (Tabelle 1.1):

Tabelle 1.1 Generatoren für die Spannungserzeugung

Generator-Art	Ladungstrennung durch
Elektrochemische Elemente (Batterien, Akkus)	chemische Reaktionen
Fotoelemente	Lichteinwirkung
Piezoelemente	Druckänderungseinwirkung
Thermoelemente	Wärmeeinwirkung
Bandgenerator	Reibungskraft
Induktionsgeneratoren	magnetische Felder

International verwendet man für den Begriff «elektrische Spannung» das *Formelzeichen* U .



Grundsatz

Die Einheit der Spannung ist das Volt (V).

$$1 \text{ V} = 1 \text{ Volt}$$

Die Einheit *Volt* hat folgende Untereinheiten:

$$1 \mu\text{V (Mikrovolt)} = \frac{1}{1\,000\,000} \text{ V} = 10^{-6} \text{ V}$$

$$1 \text{ mV (Millivolt)} = \frac{1}{1\,000} \text{ V} = 10^{-3} \text{ V}$$

$$1 \text{ kV (Kilovolt)} = 1\,000 \text{ V} = 10^3 \text{ V}$$

$$1 \text{ MV (Megavolt)} = 1\,000\,000 \text{ V} = 10^6 \text{ V}$$

Übliche Spannungen:

- | | |
|--|----------------------------|
| <input type="checkbox"/> Rundfunkantennen-Spannung | 0,1 μV ... 3 mV |
| <input type="checkbox"/> Telefon-Sprechspannung | 1 mV ... 1 V |
| <input type="checkbox"/> Kohle-Zink-Batterie, 1 Zelle | 1,5 V |
| <input type="checkbox"/> größte für den Menschen
ungefährliche Spannung | 50 V ... 65 V |
| <input type="checkbox"/> Spannung in Versorgungsnetzen | 230 V ... 400 V |
| <input type="checkbox"/> Spannung von Überlandleitungen | 6 kV ... 400 kV |
| <input type="checkbox"/> Hochspannungstechnik, Blitze | einige MV |

Messung von Spannungen

Man verwendet sogenannte *Spannungsmesser*. Es gibt verschiedene Bauarten von Spannungsmessern. Einige haben wählbare Messbereiche. Will man eine unbekanntes Spannung messen, so wählt man zunächst einen großen Messbereich, z. B. einen Messbereich bis 250 V. Wird dann nur eine geringe Spannung angezeigt, so wählt man zur genaueren Messung einen kleineren Messbereich.

Merksatz

Bei der Spannungsmessung werden die Pole des Spannungsmessers mit den Polen der Spannungsquelle verbunden.



Auf richtige Polung achten (Bild 1.3).

Vorsicht! Spannungsmesser nicht durch zu kleinen Messbereich überlasten!

Spannungsarten

Spannungen können zeitlich konstant bleiben oder sich während eines Zeitraumes in bestimmter Weise ändern.

Merksatz

Gleichspannungen sind Spannungen, die über einen längeren Zeitraum konstant bleiben.



Die in Versorgungsnetzen herrschende Spannung ist eine sinusförmige Wechselspannung (Bild 1.4). Die Spannungswerte haben einen festgelegten zeitlichen Verlauf, die Sinusform. Die in Bild 1.4 dargestellte Rechteckspannung ist ebenfalls eine Wechselspannung. Die Spannungswerte ändern sich rechteckförmig. Es gibt Wechselspannungen in vielen anderen Formen, z. B. Dreiecksform, Treppenform und Sägezahnform.

Merksatz

Wechselspannungen ändern ihre Spannungsgröße und ihre Spannungsrichtung nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten.



Drehspannung ist keine besondere Spannungsart. Hier wirken meist drei, manchmal auch mehr sinusförmige Wechselspannungen zusammen.

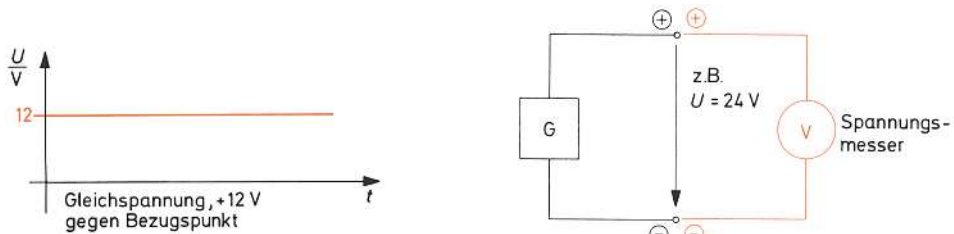


Bild 1.3 Messung und Spannungen

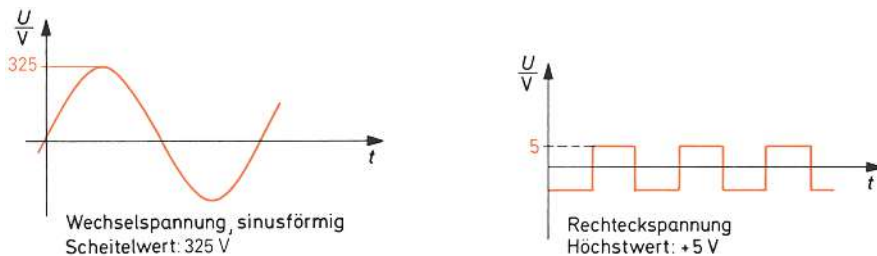


Bild 1.4 (oben und rechts) Spannungsarten

1.3 Elektrischer Strom



Definition

Strom ist eine gerichtete Bewegung von elektrischen Ladungsträgern.

Verbindet man Minuspol und Pluspol einer Spannungsquelle (Generator) durch einen Draht miteinander, so fließen die Elektronen vom Minuspol zum Pluspol (Bild 1.5). Es entsteht ein Strom. Wir haben die Spannungsquelle *kurzgeschlossen*. Nicht jede Spannungsquelle verträgt einen Kurzschluss. Vorsicht!

Es ist besser, in die Verbindung eine Lampe zu legen. Der Strom fließt dann durch die Lampe und bringt sie zum Leuchten (Bild 1.6).

Die Elektronen strömen vom Minuspol zum Pluspol. Das ist die Elektronenstromrichtung (physikalische Stromrichtung). Als *Stromrichtung* wurde jedoch die Richtung vom Pluspol zum Minuspol festgelegt. Diese Festlegung hängt mit Strömen in Flüssigkeiten zusammen. Allgemein gilt:



Merksatz

Elektrischer Strom fließt vom Pluspol der Spannungsquelle zum Minuspol.

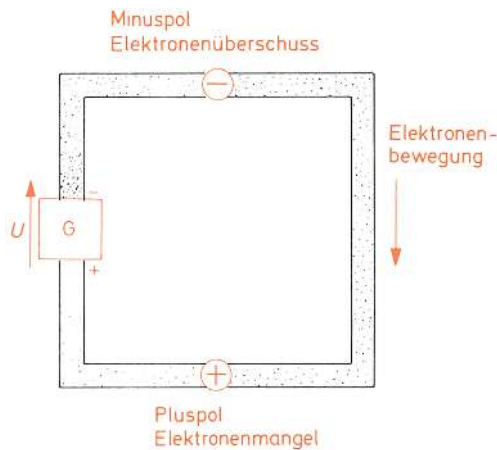


Bild 1.5
Kurzgeschlossene Spannungsquelle

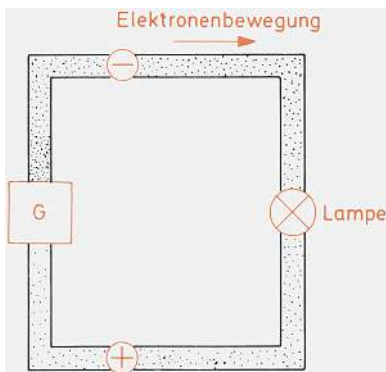


Bild 1.6
Stromkreis mit Lampe

Für den Begriff «elektrischer Strom» wird das Formelzeichen I verwendet. Die Stromstärke wird in Ampere (A) gemessen.

Grundsatz

Die Einheit der Stromstärke ist das Ampere (A).



Merksatz

Die Stromstärke beträgt 1 A, wenn in jeder Sekunde $6,24 \cdot 10^{18}$ Elektronen durch den Leiterquerschnitt fließen.



Die Einheit *Ampere* hat folgende Untereinheiten:

$$1 \text{ nA (Nanoampere)} = \frac{1}{1000000000} \text{ A} = 10^{-9} \text{ A}$$

$$1 \text{ }\mu\text{A (Mikroampere)} = \frac{1}{1000000} \text{ A} = 10^{-6} \text{ A}$$

$$1 \text{ mA (Milliampere)} = \frac{1}{1000} \text{ A} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1 \text{ kA (Kiloampere)} = 1000 \text{ A} = 10^3 \text{ A}$$

$$1 \text{ MA (Megaampere)} = 1000000 \text{ A} = 10^6 \text{ A}$$

Messung der elektrischen Stromstärke

Die elektrische Stromstärke wird mit *Strommessern* gemessen. Auch diese Geräte haben oft wählbare Messbereiche. Man wählt zur Sicherheit zunächst einen großen Messbereich (z. B. bis 10 A), dann nach Bedarf kleinere Messbereiche. Strommesser nicht überlasten!

Merksatz

Bei der Strommessung wird der Stromkreis aufgetrennt. Der Strommesser wird in den Stromkreis geschaltet.



Auf richtige Polung ist zu achten (Bild 1.7). Es gibt Strommesser, bei denen man die Polung nicht zu beachten braucht.

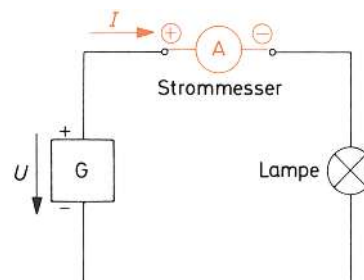


Bild 1.7
Stromkreis mit Strommesser

Übliche Stromstärken:

<input type="checkbox"/> Elektronik, Fernmeldetechnik	1 nA ... 10 A
<input type="checkbox"/> Haushaltsgeräte, Werkzeuge	100 mA ... 50 A
<input type="checkbox"/> Autoelektrik	100 mA ... 200 A
<input type="checkbox"/> Energieübertragung	100 A ... 100 kA
<input type="checkbox"/> Elektrochemie	10 kA ... 1 MA
<input type="checkbox"/> Blitze	ca. 200 kA
<input type="checkbox"/> Kerntechnik	bis ca. 100 MA

Stromarten

Man unterscheidet Gleichstrom und Wechselströme.



Definition

Gleichströme sind Ströme, die über einen längeren Zeitraum konstant bleiben. Die Elektronen strömen stets in einer Richtung.



Definition

Wechselströme ändern wie Wechselspannungen ihre Größe und Richtung nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten.

Es gibt sinusförmige Wechselströme, rechteckförmige Wechselströme und Wechselströme vieler anderer Formen.

Ausbreitungsgeschwindigkeit

Elektrischer Strom breitet sich auf Leitungen fast mit Lichtgeschwindigkeit aus. Die Ladungsträger (Elektronen) bewegen sich jedoch wesentlich langsamer. Ihre Geschwindigkeit hängt vom Leiterwerkstoff, vom Leiterquerschnitt, von der Stromstärke und von der Temperatur ab und beträgt in etwa wenige Millimeter pro Sekunde.

1.4 Elektrischer Widerstand

Die Elektronen müssen sich in einem Leitungsdraht zwischen den Metallatomen hindurchdrängen. Das Strömen wird behindert. Der Leitungswerkstoff setzt dem Strom einen Widerstand entgegen (Bild 1.8). Diese Widerstandswirkung wird *elektrischer Widerstand* genannt. Das Schaltzeichen des elektrischen Widerstandes zeigt Bild 1.9.

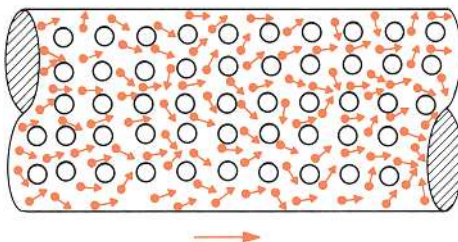
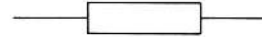


Bild 1.8
Widerstandswirkung durch
Behinderung der Elektronenströmung

Bild 1.9
Schaltzeichen des elektrischen Widerstandes

○ Atome
→ Elektronen



Für den elektrischen Widerstand verwendet man das Formelzeichen R .

Grundsatz



Die Einheit des Widerstandes ist das Ohm (Ω).

Die Einheit *Ohm* hat folgende Untereinheiten:

$$1 \mu\Omega \text{ (Mikroohm)} = \frac{1}{1000000} \Omega = 10^{-6} \Omega$$

$$1 \text{ m}\Omega \text{ (Milliohm)} = \frac{1}{1000} \Omega = 10^{-3} \Omega$$

$$1 \text{ k}\Omega \text{ (Kiloohm)} = 1000 = 10^3$$

$$1 \text{ M}\Omega \text{ (Megaohm)} = 1000000 = 10^6$$

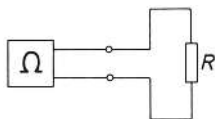
$$1 \text{ G}\Omega \text{ (Gigaohm)} = 1000000000 = 10^9$$

Übliche Widerstände:

<input type="checkbox"/> Kurze elektrische Leitungen	0,1 $\mu\Omega$ bis 100 $\text{m}\Omega$
<input type="checkbox"/> Leitungen im Haushalt	0,1 Ω bis 10 Ω
<input type="checkbox"/> Leitungen im Kraftfahrzeug	1 $\text{m}\Omega$ bis 1 Ω
<input type="checkbox"/> Lampen, Haushaltsgeräte	10 Ω bis 1 $\text{k}\Omega$
<input type="checkbox"/> Elektronikwiderstände	0,1 Ω bis 100 $\text{M}\Omega$
<input type="checkbox"/> Isolierwiderstände	50 $\text{M}\Omega$ bis 1000 $\text{G}\Omega$

Messung von Widerständen

Man unterscheidet vor allem Leitungswiderstände, Gerätewiderstände und Widerstände als Bauelemente. Sie alle haben zwischen ihren beiden Anschlusspunkten bestimmte Widerstandswerte. Diese misst man mit *Widerstandsmessgeräten*. Die Anschlusspunkte des Widerstandes werden mit den Anschlusspunkten des Widerstandsmessgerätes verbunden (Bild 1.10). Der Widerstandswert kann nach Einstellung des richtigen Messbereiches auf einer Skala oder als Ziffernwert abgelesen werden.



Widerstandsmessgerät

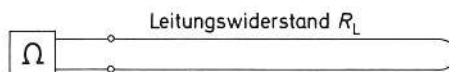


Bild 1.10 Widerstandsmessung

1.5 Elektrischer Leitwert

Statt des Widerstandes R kann man auch den Leitwert G verwenden.

$$G = \frac{1}{R}$$

G Leitwert in S
 R Widerstand in Ω



Grundsatz

Der Leitwert ist der Kehrwert des Widerstandes.



Grundsatz

Die Einheit des Leitwertes ist $\frac{1}{\Omega} = \text{Siemens (S)}$.

$$1 \text{ S} = 1 \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

1.6 Leiter und Nichtleiter

Man hat versucht, alle Stoffe in Leiter und Nichtleiter einzuteilen. Leiter sind Stoffe, die den elektrischen Strom gut leiten. Nichtleiter leiten den Strom schlecht, fast gar nicht. Nichtleiter werden auch als Isolierstoffe verwendet. Es gibt aber auch Stoffe, die sich nicht als Leiter oder Nichtleiter einordnen lassen, z. B. die Halbleiterwerkstoffe.



Merksatz

Leiter enthalten viele frei bewegliche Elektronen, die einen elektrischen Strom bilden können.

Oft verwendete Leiterwerkstoffe sind Kupfer, Aluminium, Silber, Gold, Eisen.



Merksatz

Nichtleiter enthalten fast keine frei beweglichen Elektronen. In ihnen können sich nur winzige, meist vernachlässigbare Ströme bilden. Sie leiten den Strom praktisch nicht.

Übliche Nichtleiter, die auch als Isolierstoffe verwendet werden, sind Gummi, die meisten Kunststoffe, Glas, Keramiken, Glimmer.

1.6.1 Spezifischer Widerstand

Für jeden Leiterwerkstoff ist ein spezifischer (d. h. arteigener) Widerstand ermittelt worden.

Definition

Der spezifische Widerstand ist der Widerstandswert, den ein Stab von 1 m Länge, 1 mm² Querschnitt bei 20 °C hat.

Die spezifischen Widerstände wichtiger Leiterwerkstoffe zeigt Bild 1.11. Für den spezifischen Widerstand verwendet man das Formelzeichen ρ (griechischer Kleinbuchstabe Rho).

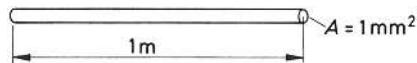
Grundsatz

Die Einheit des spezifischen Widerstandes ist $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$.

Spezifische Widerstände von Metallen:

Werkstoff ρ in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ bei 20 °C	
Kupfer	0,0178
Aluminium	0,028
Eisen	0,12
Silber	0,016
Gold	0,023

Bild 1.11
Spezifische Widerstände wichtiger
Leiterwerkstoffe



Abmessung eines Leiters, auf die der spezifische Widerstand bezogen ist.

Leitungswiderstände werden mit folgender Formel berechnet:

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

R Widerstandswert in Ω

l Leiterlänge in m

A Leiterquerschnitt in mm²

ρ spez. Widerstand in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$

Beispiel

Wie groß ist der Widerstandswert eines Kupferdrahtes von 50 m Länge und 1,5 mm² Querschnitt?

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

$$R = \frac{0,01786 \cdot \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 50 \text{ m}}{1,5 \text{ mm}^2}$$

$$R = \frac{0,01786 \cdot 50 \Omega}{1,5}$$

$$R = 0,595 \Omega$$

1.6.2 Leitfähigkeit

Für die Leitfähigkeit wird das Formelzeichen κ (griechischer Kleinbuchstabe Kappa) verwendet.



Grundsatz

Die Leitfähigkeit κ ist der Kehrwert des spezifischen Widerstandes ϱ .

$$\kappa = \frac{1}{\varrho}$$



Grundsatz

Die Einheit der Leitfähigkeit ist $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$.

Leitungswiderstände können auch mit der Leitfähigkeit κ berechnet werden.

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

1.7 Widerstand und Temperatur

Der spezifische Widerstand ϱ und die Leitfähigkeit κ werden für eine Temperatur von 20 °C angegeben. Die mit ihnen errechneten Widerstandswerte gelten daher ebenfalls für 20 °C. Erhöht oder erniedrigt man die Temperatur, so ändern sich die Widerstandswerte. Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes wird durch den Temperaturbeiwert α angegeben.



Grundsatz

Der Temperaturbeiwert α gibt die Widerstandsänderung für einen Widerstand von 1 Ω bei einer Temperaturerhöhung um 1 Kelvin an.

Eine Temperaturerhöhung um 1 Kelvin (K) entspricht einer Temperaturerhöhung um 1 °C. In Tabelle 1.2 sind die Temperaturbeiwerte für wichtige Werkstoffe angegeben.

$$\Delta R = R_K \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta$$

$$R_W = R_K + \Delta R$$

ΔR Widerstandsänderung in Ω

R_K Kaltwiderstand bei 20 °C in Ω

α Temperaturbeiwert in $\frac{1}{\text{K}}$

$\Delta \vartheta$ Temperaturerhöhung in K

R_W Warmwiderstand in Ω

$$R_W = R_K + R_K \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta$$

$$R_W = R_K \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)$$

$$R_K = \frac{R_W}{1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta}$$

Tabelle 1.2 Temperaturbeiwerte wichtiger Werkstoffe

Werkstoff	Temperaturbeiwert α in $\frac{1}{\text{K}}$
Aluminium	$3,77 \cdot 10^{-3}$
Blei	$4,2 \cdot 10^{-3}$
Eisen	$4,5 - 6,2 \cdot 10^{-3}$
Gold	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Kupfer	$3,93 \cdot 10^{-3}$
Silber	$3,8 \cdot 10^{-3}$
Wolfram	$4,1 \cdot 10^{-3}$
Kohle	$-0,8 \cdot 10^{-3}$