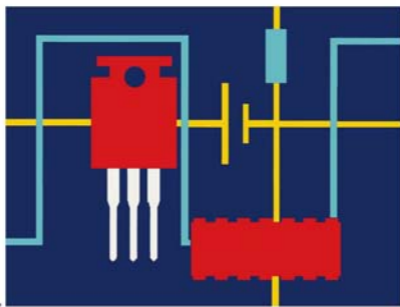


Vogel Fachbuch

Klaus Beuth/Olaf Beuth

Elementare Elektronik



Klaus Beuth/Olaf Beuth

Elementare Elektronik

Klaus Beuth/Olaf Beuth

Elementare Elektronik

mit Grundlagen der Elektrotechnik

8., überarbeitete Auflage

Vogel Buchverlag

Zur Fachbuchgruppe «Elektronik» gehören die Bände:

Klaus Beuth/Olaf Beuth: Elementare Elektronik

Heinz Meister: Elektrotechnische Grundlagen (Elektronik 1)

Klaus Beuth: Bauelemente (Elektronik 2)

Klaus Beuth/Wolfgang Schmusch: Grundsaltungen (Elektronik 3)

Klaus Beuth: Digitaltechnik (Elektronik 4)

Helmut Müller/Lothar Walz: Mikroprozessortechnik (Elektronik 5)

Wolfgang Schmusch: Meßtechnik (Elektronik 6)

Klaus Beuth/Richard Hanebuth/Günther Kurz: Nachrichtentechnik (Elektronik 7)

Wolf-Dieter Schmidt: Sensorschaltungstechnik (Elektronik 8)

Olaf Beuth/Klaus Beuth: Leistungselektronik (Elektronik 9)

Weitere Informationen:

www.vogel-buchverlag.de



<http://twitter.com/>



www.facebook.com/vogel.buchverlag



www.vogel-buchverlag.de/rss/buch.rss

ISBN 978-3-8343-3280-6

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 Germany

Copyright 1987 by

Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg
Umschlaggestaltung: Michael M. Kappenstein,
Frankfurt/M.

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 | Sperrschicht-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 | Verschichtdioden (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 | Zweirichtungen-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 | Adressdecoder | 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 |

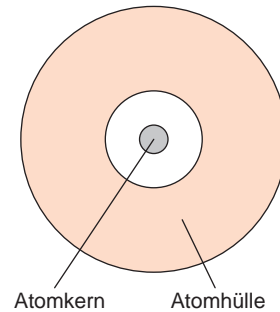
| | | |
|-----------|---|-----|
| 38 | Rechenschaltungen | 437 |
| 38.1 | Halbaddierer | 437 |
| 38.2 | Volladdierer | 438 |
| 38.3 | Paralleladdierschaltung | 439 |
| 38.4 | Addier-Subtrahier-Werk | 440 |
| | | |
| 39 | Mikroprozessoren und Mikrocomputer | 443 |
| 39.1 | Der Mikroprozessor als Universalschaltung | 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.

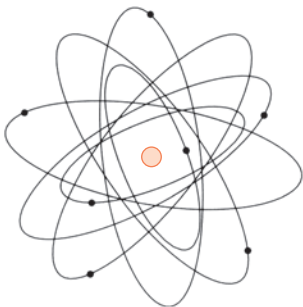


Bild 1.1b Atomkern mit Elektronenbahnen

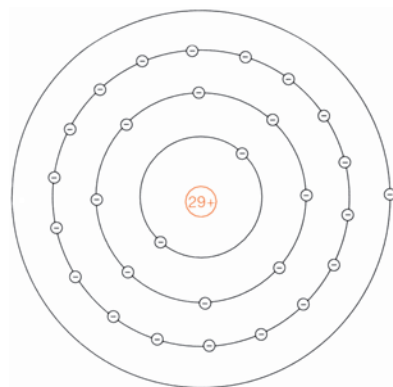


Bild 1.1c Kupferatom, Aufbauschema. Ein Kupferatom enthält 29 Protonen im Kern und 29 Elektronen in der Hülle.

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.

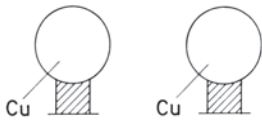


Bild 1.2a Ungeladene Metallkugeln (elektrisch neutral)

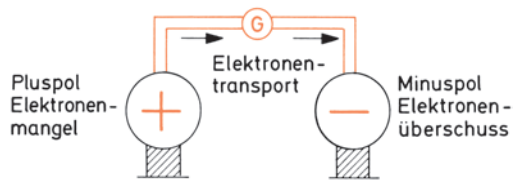


Bild 1.2b Positiv und negativ geladene Metallkugeln

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 V = 1 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.

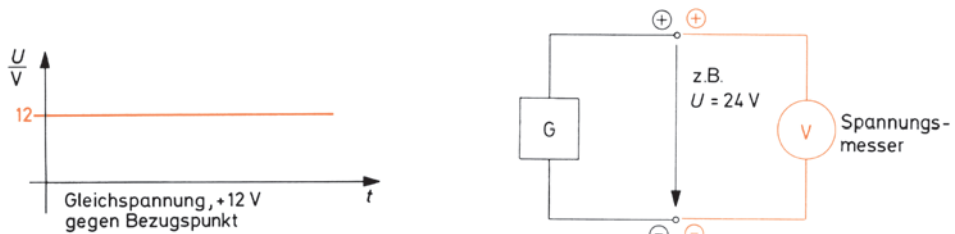


Bild 1.3 Messung und Spannungen

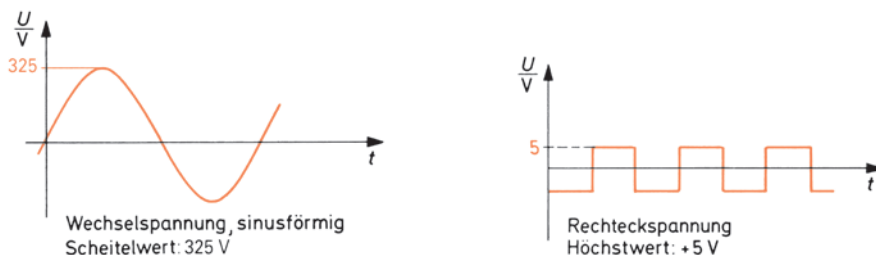


Bild 1.4 (oben und rechts) Spannungsarten

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.

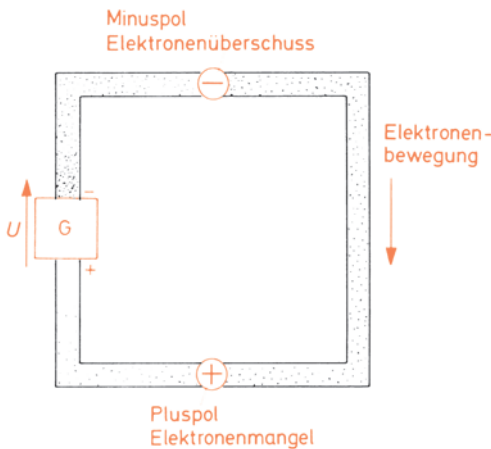


Bild 1.5
Kurzgeschlossene Spannungsquelle

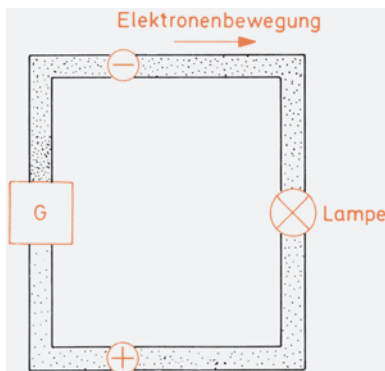


Bild 1.6
Stromkreis mit Lampe

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.

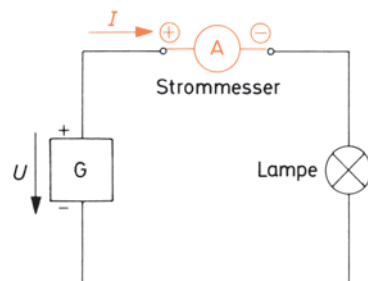


Bild 1.7
Stromkreis mit Strommesser

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 Leiterwerkstoff setzt dem Strom einen Widerstand entgegen (Bild 1.8). Diese Widerstandswirkung wird *elektrischer Widerstand* genannt. Das Schaltzeichen des elektrischen Widerstandes zeigt Bild 1.9.

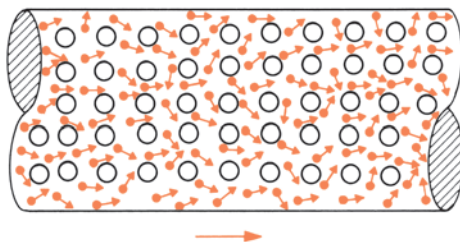


Bild 1.8
Widerstandswirkung durch
Behinderung der Elektronenströmung

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:

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

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

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

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

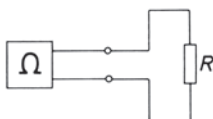
$$1 \text{ G}\Omega \text{ (Gigaohm)} = 1000000000 = 10^9$$

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

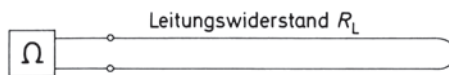


Bild 1.10 Widerstandsmessung

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).

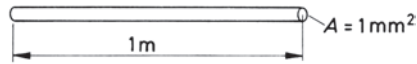
Grundsatz

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 | $-0,8 \cdot 10^{-3}$ |

