



Leonhard Stiny

# Passive elektronische Bauelemente

Aufbau, Funktion, Eigenschaften,  
Dimensionierung und Anwendung

*2. Auflage*

 Springer Vieweg

---

# Passive elektronische Bauelemente

---

Leonhard Stiny

# Passive elektronische Bauelemente

Aufbau, Funktion, Eigenschaften,  
Dimensionierung und Anwendung

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 344 Abbildungen und 74 Tabellen

 Springer Vieweg

Leonhard Stiny  
Haag a. d. Amper, Deutschland

Die erste Auflage erschien unter dem Titel „Handbuch passiver elektronischer Bauelemente“ im Franzis Verlag, 2009.

ISBN 978-3-658-08651-0  
DOI 10.1007/978-3-658-08652-7

ISBN 978-3-658-08652-7 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media ([www.springer.com](http://www.springer.com))

---

# Vorwort

Dieses Buch richtet sich an alle, die in Ausbildung oder Beruf gründliches und umfassendes Wissen über passive elektronische Bauelemente benötigen. Das Werk vermittelt detaillierte Kenntnisse über Aufbau, Eigenschaften, Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten dieser Bauelemente. Als praxisgerechtes Handbuch kann es als Lehrbuch begleitend zu Unterricht oder Vorlesung, zum Selbststudium und als Nachschlagewerk verwendet werden.

Es werden die theoretischen und physikalischen Grundlagen der behandelten Elemente erläutert und für die Praxis wichtige Angaben für Auswahl, Dimensionierung und Anwendung passiver elektronischer Bauelemente bereitgestellt. Dabei werden Berechnungsgrundlagen anwendungsorientiert und kompakt dargeboten. Spezifische Daten, Kenngrößen und Charakteristiken werden angegeben und ihre Bedeutung erläutert. Anleitungen zur Auslegung von Bauteilwerten ermöglichen eine anwendungsbezogene Betrachtung der Bauelemente. Auch der Anwendungszweck der Bauelemente wird anhand von Einsatzbeispielen aufgezeigt. Tabellarische Übersichten und viele Beispiele mit Berechnungen erleichtern das Verständnis des Stoffes. Zahlreiche Abbildungen geben eine Vorstellung, wie die Bauelemente aufgebaut sind oder aussehen.

Bei der Auswahl von Art und Anzahl der passiven elektronischen Bauelemente wurde auf eine möglichst vollständige Behandlung Wert gelegt. Es sind sehr häufig verwendete Bauelemente enthalten, die in allen technischen Aspekten von der Herstellung bis zur Anwendung betrachtet werden. Die Eigenschaften und Besonderheiten der Bauelemente bei hohen Frequenzen werden ebenfalls beachtet. So sind auch die Berechnungsgrundlagen der Streifenleitungen mit Anwendungen in der Hochfrequenztechnik aufgenommen.

Nach einer ersten Auflage bei einem anderen Verlag erscheint dieses Werk beim Springer-Verlag in zweiter, überarbeiteter und erweiterter Auflage.

Haag a. d. Amper, Dezember 2014

Leonhard Stiny

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Begriffsdefinitionen</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Material: Eigenschaften und Klassifizierung</b> . . . . .	<b>7</b>
2.1	Metalle . . . . .	7
2.1.1	Elektrische Eigenschaften der Metalle . . . . .	8
2.1.2	Metallische Leiter bei hohen Frequenzen . . . . .	11
2.1.3	Thermische Eigenschaften der Metalle . . . . .	13
2.2	Flüssigkeiten . . . . .	15
2.3	Gase . . . . .	16
2.4	Halbleiter . . . . .	16
2.5	Nichtleiter (Isolatoren) . . . . .	17
2.6	Zusammenfassung . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Festwiderstände</b> . . . . .	<b>19</b>
3.1	Klassifizierung von Widerständen . . . . .	19
3.2	Eigenschaften von Widerständen . . . . .	20
3.2.1	Begriffsdefinitionen . . . . .	21
3.2.2	Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen . . . . .	27
3.3	Widerstandswerte . . . . .	28
3.4	Wertekennzeichnung von Widerständen . . . . .	31
3.4.1	Kennzeichnung von Widerständen durch Farbcode . . . . .	31
3.4.2	Kennzeichnung von Widerständen durch Klartext . . . . .	33
3.4.3	Kennzeichnung von SMD-Widerständen . . . . .	34
3.5	Bauformen von Festwiderständen . . . . .	38
3.5.1	Drahtwiderstände . . . . .	38
3.5.1.1	Aufbau und Eigenschaften von Drahtwiderständen . . . . .	38
3.5.1.2	Ausführungen von Drahtwiderständen . . . . .	39
3.5.1.3	Temperaturabhängigkeit des Widerstandswertes . . . . .	41
3.5.1.4	Frequenzabhängigkeit von Drahtwiderständen . . . . .	42
3.5.2	Massewiderstände . . . . .	44

3.5.3	Kohleschichtwiderstände . . . . .	45
3.5.3.1	Einsatzbereiche und allgemeine Daten . . . . .	45
3.5.3.2	Allgemeines zur Herstellung . . . . .	46
3.5.3.3	Spezielle Herstellverfahren . . . . .	47
3.5.4	Metallschichtwiderstände (Metallfilmwiderstände) . . . . .	48
3.5.4.1	Metalloxid-Schichtwiderstände . . . . .	48
3.5.4.2	Edelmetall-Schichtwiderstände . . . . .	48
3.5.4.3	Metallschichtwiderstände mit Metall-Legierungen . . . . .	48
3.5.4.4	Metallglasur-Widerstände . . . . .	49
3.5.5	SMD-Widerstände . . . . .	50
3.5.5.1	Aufbauformen von SMD-Widerständen . . . . .	50
3.5.5.2	HF-Eigenschaften von SMD-Widerständen . . . . .	54
3.5.5.3	Impulsbelastung bei SMD-Widerständen . . . . .	58
3.6	Widerstandsnetzwerke . . . . .	60
3.6.1	Einsatzbereiche . . . . .	60
3.6.2	Ausführungsformen . . . . .	61
3.6.3	Eigenschaften und Aufbau . . . . .	62
3.7	Zusammenfassung . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Veränderbare Widerstände, Potenziometer . . . . .</b>	<b>67</b>
4.1	Veränderbarer Widerstand . . . . .	67
4.2	Grundprinzip des Potenziometers . . . . .	68
4.3	Industrieller Einsatz von Potenziometern . . . . .	72
4.3.1	Einsatzbereiche . . . . .	72
4.3.2	Widerstandselemente . . . . .	72
4.3.2.1	Draht als Widerstandselement . . . . .	72
4.3.2.2	Widerstandselement in Hybridtechnik . . . . .	73
4.3.2.3	Leitender Kunststoff als Widerstandselement . . . . .	73
4.3.3	Mechanische Drehwinkel . . . . .	73
4.3.3.1	Mehrwendelpotenziometer . . . . .	73
4.3.3.2	Präzisionspotenziometer mit einer mechanischen Umdrehung (360° Drehwinkel) . . . . .	74
4.3.4	Mechanische Bauformen . . . . .	74
4.3.4.1	Einlochbefestigung . . . . .	74
4.3.4.2	Präzisionspotenziometer mit Synchroflansch (Servoflansch- und Kugellager) . . . . .	75
4.4	Begriffsdefinitionen zum Potenziometer . . . . .	76
4.4.1	Allgemeine Begriffe . . . . .	76
4.4.2	Potenziometer-Betätigung . . . . .	77
4.4.3	Klimatische Prüfklasse . . . . .	78
4.4.4	Nennwerte und Eigenschaften . . . . .	79

4.4.5	Zusammenhang zwischen Widerstandswert und Einstellbewegung	82
4.4.6	Spannungsverhältnisse	84
4.4.7	Funktionsverlauf (Widerstandswertverlauf)	85
4.4.8	Weitere Eigenschaften	87
4.4.9	Wellenenden, Befestigungsmittel und Anschlüsse	88
4.4.10	Vorzugswerte für den Gesamtwiderstand	89
4.4.11	Kennzeichnung der Potenziometer	89
4.5	Zusammenfassung	89
<b>5</b>	<b>Veränderliche, nichtlineare Widerstände</b>	<b>91</b>
5.1	NTC-Widerstand, Heißleiter	92
5.1.1	Einsatzbereiche des Heißleiters	92
5.1.2	Herstellung von Heißleitern, Leitungsmechanismus	94
5.1.3	Widerstandskennlinie	95
5.1.4	Temperaturkoeffizient	101
5.1.5	Spannungs-Stromkennlinie	102
5.1.6	Zeitkonstante	105
5.1.7	Datenblattangaben	106
5.1.8	Wichtiger Hinweis zur Anwendung von NTCs	107
5.1.9	Anwendung: Temperaturmessung	108
5.1.10	Anwendung: Linearisierung der NTC-Widerstandskennlinie	109
5.1.11	Anwendung: Einschaltstrombegrenzung	110
5.1.12	Anwendung: Flüssigkeits-Niveaufühler	111
5.1.13	Anwendung: Ansprechverzögerung	111
5.2	PTC-Widerstand, Kaltleiter	112
5.2.1	Einsatzbereiche des Kaltleiters	113
5.2.2	Herstellung von Kaltleitern, Leitungsmechanismus	114
5.2.3	Widerstandskennlinie	115
5.2.4	Temperaturkoeffizient	116
5.2.5	Strom-Spannungs-Kennlinie	117
5.2.6	Spannungs- und Frequenzabhängigkeit des PTC-Widerstand	119
5.2.7	Anwendung: Temperaturfühler	119
5.2.8	Anwendung: Flüssigkeits-Niveaufühler und Strömungsmesser	120
5.2.9	Anwendung: Selbstregelnder Thermostat	120
5.2.10	Anwendung: Überstromsicherung	121
5.3	VDR-Widerstand, Varistor	121
5.3.1	Einsatzbereiche des Varistors	122
5.3.2	Herstellung von Varistoren, Leitungsmechanismus	122
5.3.3	Strom-Spannungs-Kennlinie	124



5.3.4	Begriffsdefinitionen und Datenblattangaben	127
5.3.5	Hinweis zur Anwendung von Varistoren	129
5.3.6	Anwendung: Überspannungsschutz	129
5.4	LDR-Widerstand, Fotowiderstand	130
5.4.1	Einsatzbereiche des Fotowiderstandes	131
5.4.2	Herstellung von Fotowiderständen, Leitungsmechanismus	132
5.4.3	Widerstandskennlinie	136
5.4.4	Dynamische Eigenschaften	138
5.4.5	Kennwerte, Datenblattangaben	138
5.4.6	Anwendung, Prinzipschaltung	140
5.4.7	Zusammenfassung	141
<b>6</b>	<b>Durch Dehnung veränderbarer Widerstand</b>	<b>143</b>
6.1	Dehnungsmessstreifen, allgemeines	143
6.2	Einsatzbereiche des Dehnungsmessstreifens	144
6.3	DMS Aufbau	146
6.3.1	Grundkonstruktion	146
6.3.2	Draht-DMS	148
6.3.3	Folien-DMS	148
6.3.4	Halbleiter-DMS	150
6.3.5	Röhrchen-DMS	150
6.4	DMS Funktionsprinzip	151
6.5	Kenndaten	151
6.6	Messverfahren, Brückenschaltungen	154
6.6.1	Viertelbrücke	157
6.6.2	Halbbrücke	158
6.6.3	Vollbrücke	159
6.7	Zusammenfassung	161
<b>7</b>	<b>Magnetfeldabhängiger Widerstand</b>	<b>163</b>
7.1	Feldplatte	163
7.2	Kennlinien	164
7.3	Einsatzbereiche der Feldplatte	165
7.4	Aufbau, Wirkungsweise	165
7.5	Ausführungsformen	167
7.6	Permalloy-Sensoren	168
7.7	Zusammenfassung	169
<b>8</b>	<b>Kondensatoren</b>	<b>171</b>
8.1	Wirkungsweise und Eigenschaften von Kondensatoren	171
8.1.1	Allgemeines	171
8.1.2	Kondensator im Gleichstromkreis	172

8.1.3	Kondensator laden und entladen	173
8.1.4	Kondensator im Wechselstromkreis	175
8.1.5	Reihen- und Parallelschaltung von Kondensatoren	176
8.2	Dielektrische Stoffe	177
8.2.1	Allgemeine Eigenschaften der Dielektrika	177
8.2.2	Dielektrische Polarisierung	178
8.2.2.1	Elektronenpolarisation	179
8.2.2.2	Ionenpolarisation	179
8.2.2.3	Orientierungspolarisation	180
8.2.2.4	Frequenzabhängigkeit von $\epsilon_r$	180
8.2.2.5	Temperaturabhängigkeit von $\epsilon_r$	180
8.2.3	Einteilung der Dielektrika	181
8.2.3.1	Unpolare Stoffe	181
8.2.3.2	Polare Stoffe	181
8.2.3.3	Ferroelektrika	182
8.2.3.4	Piezoelektrische Werkstoffe	183
8.2.3.5	Kunststoffe	183
8.3	Elektrische Leitfähigkeit	185
8.3.1	Volumenleitfähigkeit	186
8.3.2	Oberflächenleitfähigkeit	186
8.4	Dielektrischer Durchschlag	187
8.5	Dielektrika im elektrischen Wechselfeld	188
8.6	Spezielle Eigenschaften dielektrischer Stoffe	192
8.7	Allgemeine Eigenschaften des technischen Kondensators	194
8.8	Wichtige Kenngrößen eines Kondensators	198
8.9	Zusammenfassung	200
8.10	Kennzeichnung von Kondensatoren	202
8.10.1	Angabe der Nennkapazität	202
8.10.2	Angabe der Toleranz	205
8.10.3	Angabe der Nennspannung	205
8.10.4	Temperatur- und Toleranzangaben	206
8.10.5	Kennzeichnung des Außenbelages	206
8.11	Bauarten und Bauformen von Kondensatoren	206
8.11.1	Folienkondensatoren (Wickelkondensatoren)	208
8.11.1.1	Herstellung von Folienkondensatoren	209
8.11.1.2	Aufbau von Folienkondensatoren	210
8.11.1.3	Papierkondensator	211
8.11.1.4	Metallpapier-Kondensator (MP-Kondensator)	212
8.11.1.5	Kunststofffolienkondensator	214
8.11.1.6	Eigenschaften der Kunststofffolien, Anwendungsgebiete der Kondensatoren	216
8.11.1.7	KS- und KP-Kondensatoren im Detail	218

	8.11.1.8	MK-Kondensatoren im Detail	221
	8.11.1.9	Eigenschaften und Anwendungsgebiete von MK-Kondensatoren im Überblick	226
8.11.2		Elektrolytkondensator	227
	8.11.2.1	Allgemeines zu Elektrolytkondensatoren	227
	8.11.2.2	Aluminium-Elektrolytkondensatoren	229
	8.11.2.3	Tantal-Folien-Elektrolytkondensatoren	241
8.11.3		Massekondensatoren	242
	8.11.3.1	Keramikkondensatoren	242
	8.11.3.2	Tantal-Sinter-Elektrolytkondensatoren	249
	8.11.3.3	Niob-Elektrolytkondensatoren	251
	8.11.3.4	Glaskondensatoren	252
8.11.4		Schichtkondensatoren	253
	8.11.4.1	Keramik-Vielschicht-Kondensatoren	253
	8.11.4.2	Dick- und Dünnschicht-Kondensatoren	253
	8.11.4.3	Glimmerkondensatoren	253
8.11.5		Doppelschicht-Kondensatoren	254
8.11.6		Veränderbare Kondensatoren	256
8.12		Zusammenfassung	257
8.13		Kapazitäten von Leitern und Aufbauten	260
	8.13.1	Kugel über einer unendlichen, leitenden und geerdeten Ebene	260
	8.13.2	Gerader Draht parallel zur Erde	260
	8.13.3	Zwei koaxiale Zylinder, konzentrische Rohrleitung	261
	8.13.4	Paralleldrahtleitung	261
	8.13.5	Durchführung	262
	8.13.6	Kapazität einer Kugel	262
	8.13.7	Kapazität von zwei Kugeln mit gleichem Radius	262
	8.13.8	Kugelkondensator	263
<b>9</b>		<b>Induktivitäten</b>	265
9.1		Wirkungsweise und Eigenschaften von Induktivitäten	265
	9.1.1	Allgemeines	265
	9.1.2	Grundlagen des Magnetismus	266
	9.1.3	Elektromagnetismus	268
	9.1.4	Wirkungsweise der Spule	269
	9.1.4.1	Magnetwirkung des Stromes	269
	9.1.4.2	Durchflutung	270
	9.1.4.3	Magnetische Feldstärke	270
	9.1.4.4	Magnetische Flussdichte	270
	9.1.4.5	Magnetischer Fluss	273
	9.1.4.6	Induktion	274

9.1.4.7	Kraft auf stromdurchflossene Leiter . . . . .	276
9.1.4.8	Selbstinduktion . . . . .	278
9.1.4.9	Induktivität . . . . .	278
9.1.4.10	Induktive Kopplung . . . . .	278
9.1.4.11	Induktiver Widerstand . . . . .	279
9.1.5	Aufbau der Spule . . . . .	280
9.1.5.1	Luftspule . . . . .	280
9.1.5.2	Spule mit Kern . . . . .	280
9.1.6	Kenngrößen von Spulen . . . . .	284
9.1.7	Eigenkapazität der Spule . . . . .	286
9.1.8	Elektrisches Verhalten von Induktivitäten . . . . .	287
9.1.8.1	Selbstinduktion . . . . .	288
9.1.8.2	Ein- und Ausschalten von Gleichspannung an einer Spule . . . . .	288
9.1.8.3	Spule im Wechselstromkreis . . . . .	290
9.1.9	Reihen- und Parallelschaltung von Spulen . . . . .	291
9.2	Zusammenfassung . . . . .	292
9.3	Dimensionierung von Spulen, Induktivitätswerte . . . . .	293
9.3.1	$A_L$ -Wert . . . . .	293
9.3.2	Zylinderspule, einlagig, mit und ohne Kern . . . . .	294
9.3.3	Zylinderspule, einlagig, ohne Kern . . . . .	294
9.3.4	Zylinderspule, mehrlagig, ohne Kern . . . . .	296
9.3.5	Spiralförmige, ebene Spule . . . . .	299
9.3.6	Toroidspule . . . . .	299
9.3.7	Drahtring (ohne Kern) . . . . .	301
9.3.8	Rechteckige, planare Leiterschleife auf Leiterplatte . . . . .	301
9.3.9	Quadratische Spule auf Leiterplatte . . . . .	302
9.3.10	Gerader Leiter . . . . .	303
9.3.11	Gerader Leiter über Massefläche . . . . .	304
9.3.12	Gerader Leiter über Massefläche, ein Ende an Masse . . . . .	305
9.3.13	Gerader Bandleiter . . . . .	305
9.3.14	Paralleldrahtleitung (Zweidrahtleitung, Doppelleitung) . . . . .	306
9.3.15	Hohlzylinder . . . . .	307
9.3.16	Koaxialleitung . . . . .	307
9.4	Verwendungszweck, Beispiele zur Anwendung von Spulen . . . . .	308
9.4.1	Verwendung von Spulen im Gleichstromkreis . . . . .	308
9.4.2	Verwendung von Spulen im Wechselstromkreis . . . . .	308
<b>10</b>	<b>Transformatoren und Übertrager . . . . .</b>	<b>311</b>
10.1	Aufgaben und Einsatzbereiche . . . . .	311
10.2	Magnetische Kopplung von Spulen . . . . .	311

10.3	Gegeninduktion . . . . .	312
10.3.1	Kopplungsfaktor, Streufaktor, Streuinduktivität . . . . .	312
10.3.1.1	Kopplungsfaktor . . . . .	312
10.3.1.2	Streufaktor . . . . .	313
10.3.1.3	Streuinduktivität . . . . .	314
10.3.1.4	Zusammenhang zwischen Kopplungsfaktor und Streufaktor . . . . .	315
10.3.2	Gegeninduktionsspannungen . . . . .	316
10.4	Der verlustlose, streufreie Transformator . . . . .	318
10.4.1	Sekundärseite unbelastet . . . . .	319
10.4.1.1	Transformatorenhauptgleichung . . . . .	319
10.4.1.2	Spannungs- und Stromtransformation . . . . .	320
10.4.2	Sekundärseite belastet . . . . .	321
10.4.2.1	Impedanztransformation . . . . .	321
10.4.2.2	Übertrager zwischen ohmschen Widerständen . . . . .	322
10.5	Realer (technischer) Transformator . . . . .	323
10.5.1	Verlustarten . . . . .	323
10.5.2	Verlustloser Transformator mit Streuung . . . . .	324
10.5.3	Transformator mit Wicklungs- und Kernverlusten . . . . .	325
10.5.4	Verbesserte M-Ersatzschaltung . . . . .	328
10.6	Aufbau und Bauformen . . . . .	329
10.6.1	Aufbau . . . . .	329
10.6.2	Wicklungen . . . . .	330
10.6.3	Transformatorkern . . . . .	330
10.6.3.1	Material . . . . .	330
10.6.3.2	Bauformen . . . . .	331
10.7	Drehstromtransformator . . . . .	332
10.8	Zusammenfassung . . . . .	332
<b>11</b>	<b>Elektrische Leitungen</b> . . . . .	<b>335</b>
11.1	Übersicht der Übertragungsmedien . . . . .	335
11.2	Grundlagen zu elektrischen Leitungen . . . . .	336
11.2.1	Wellenwiderstand . . . . .	337
11.2.2	Ausbreitungskoeffizient . . . . .	339
11.2.3	Ausbreitungsgeschwindigkeit (Phasengeschwindigkeit) . . . . .	340
11.2.4	Phasenlaufzeit . . . . .	341
11.2.5	Gruppenlaufzeit . . . . .	341
11.2.6	Messung von Kurzschluss- und Leerlaufwiderstand . . . . .	342
11.2.7	Eingangsimpedanz . . . . .	343
11.2.8	Resonanz . . . . .	343
11.2.9	Gekoppelte Leitungen . . . . .	344
11.3	Zusammenfassung . . . . .	345

11.4	Eindrahtleitung	346
11.4.1	Rundleiter nahe einer Massefläche	347
11.4.2	Rundleiter im rechten Winkel einer Massefläche	347
11.4.3	Rundleiter zwischen zwei parallelen Masseflächen (Slab Line)	348
11.4.4	Rundleiter mit U-Schirm (Trough Line, Channel Line)	348
11.4.5	Rundleiter auf einem Substrat mit rückwärtiger Massefläche	349
11.4.6	Rundleiter oberhalb eines Substrats mit rückwärtiger Massefläche	349
11.5	Zweidrahtleitungen	350
11.5.1	Paralleldrahtleitung	350
11.5.2	Zweidrahtleitung über Massefläche	354
11.5.3	Zweidrahtleitung mit unterschiedlichen Leiterdurchmessern	354
11.5.4	Zweidrahtleitung in runder Abschirmung	354
11.5.5	Twisted Pair	355
11.6	Koaxialleitung	358
11.6.1	Aufbau und Anwendungen der runden Koaxialleitung	358
11.6.2	Eigenschaften von Koaxialkabeln	359
11.6.3	Leitungsbeläge von Koaxialleitungen bei hohen Frequenzen	363
11.6.4	Koaxialkabel mit geschichtetem Dielektrikum	364
11.6.5	Rundes, exzentrisches Koaxkabel	365
11.6.6	Koaxialleitung mit quadratischer Schirmung	366
11.6.7	Koaxiale Bandleitung mit Rechteckform von Schirm und Innenleiter	366
11.6.8	Koaxiale Bandleitung mit rundem Schirm	367
11.7	Streifenleitung	367
11.7.1	Vor- und Nachteile, Grundformen und Anwendungen der Streifenleitung	367
11.7.2	Materialien und Substrate von Streifenleiterschaltungen	371
11.7.3	Bauformen von Streifenleitungen	372
11.7.4	Einfache Näherungsformeln zur Analyse bestimmter Bauformen von Streifenleitungen	372
11.7.4.1	Doppelbandleitung	373
11.7.4.2	Mikrostreifenleitung (microstrip)	374
11.7.4.3	Eingebettete Mikrostreifenleitung (embedded microstrip)	374
11.7.4.4	Symmetrisch geschirmte Streifenleitung (stripline, centered stripline, triplate)	375
11.7.4.5	Doppelte, geschirmte Streifenleitung (dual stripline)	375
11.7.4.6	Asymmetrische, geschirmte Streifenleitung (asymmetric stripline)	376

11.7.4.7	Gekoppelte Mikrostreifenleitung (differential microstrip) . . . . .	376
11.7.4.8	Gekoppelte, geschirmte Streifenleitung (differential stripline) . . . . .	377
11.7.5	Einfluss einer kapazitiven Last auf $t_{pd}$ und $Z_0$ . . . . .	377
11.7.6	Mikrostreifenleitung (microstrip) . . . . .	378
11.7.6.1	Statische Analyse einer Mikrostreifenleitung . . . . .	381
11.7.6.2	Dynamische Analyse einer Mikrostreifenleitung . . . . .	385
11.7.6.3	Synthese einer Mikrostreifenleitung . . . . .	387
11.7.6.4	Dämpfung der Mikrostreifenleitung . . . . .	388
11.7.6.5	Frequenzgrenzen der Mikrostreifenleitung . . . . .	390
11.7.6.6	Mikrostreifenleitung und weitere Bauelemente . . . . .	390
11.7.7	Koplanare Streifenleitung (CPW = Coplanar Waveguide) . . . . .	391
11.7.8	Symmetrischer Streifenleiter (stripline) . . . . .	392
11.7.9	Abgeschirmter symmetrischer Streifenleiter (shielded stripline) . . . . .	393
11.7.10	Koplanare Zweibandleitung (CPS = Coplanar Strips) . . . . .	393
11.7.11	Asymmetrische koplanare Zweibandleitung . . . . .	398
11.7.12	Koplanare Dreibandleitung . . . . .	398
11.7.13	Koplanare Dreibandleitung mit Massefläche . . . . .	399
11.7.14	Koplanare Streifenleitung (CPW) mit Berücksichtigung der Leiterdicke . . . . .	400
11.7.15	Koplanare Streifenleitung (CPW) mit rückseitiger Massefläche . . . . .	401
11.7.16	Koplanare Streifenleitung mit oberer Masse-Abschirmfläche . . . . .	401
11.7.17	Kantengekoppelter symmetrischer Streifenleiter (narrow side coupled stripline) . . . . .	402
11.8	Bauelemente in Microstrip-Technik und Anwendungsbeispiele . . . . .	403
11.8.1	Rechtwinkliger Leitungsknick . . . . .	404
11.8.2	Leitungsunterbrechung . . . . .	406
11.8.3	Leiterbreitenstufe . . . . .	407
11.8.4	Mikrostreifenleerlauf . . . . .	407
11.8.5	Beispiele für die Realisierung von Bauelementen und elementaren Schaltungen . . . . .	409
<b>12</b>	<b>Lichtwellenleiter</b> . . . . .	<b>411</b>
12.1	Vor- und Nachteile des Lichtwellenleiters . . . . .	411
12.2	Einsatz von Lichtwellenleitern . . . . .	412
12.3	Aufbau und Funktionsprinzip des Lichtwellenleiters . . . . .	413
12.4	Wellenausbreitung im Lichtwellenleiter, Moden, Dispersion . . . . .	416
12.5	Multimode-Faser . . . . .	419
12.6	Gradientenfaser . . . . .	420

---

12.7	Monomode-Faser . . . . .	421
12.8	Sende- und Empfangselemente von Lichtwellenleitern . . . . .	422
	12.8.1 Sender von Lichtwellenleitern . . . . .	422
	12.8.2 Empfänger von Lichtwellenleitern . . . . .	423
12.9	Dämpfung von Lichtwellenleitern . . . . .	424
	12.9.1 Bedeutung der Dämpfung . . . . .	424
	12.9.2 Dämpfung und verwendete Wellenlängen bei Lichtwellenleitern . . . . .	425
12.10	Verstärker in LWL-Strecken . . . . .	426
12.11	Verbindungen von Lichtwellenleitern . . . . .	428
	12.11.1 Spleißverbindungen von Lichtwellenleitern . . . . .	429
	12.11.2 Steckverbindungen für Lichtwellenleiter . . . . .	429
	12.11.3 Einflüsse auf die Einfügungsdämpfung . . . . .	431
	12.11.4 Einige Beispiele von Standard-LWL-Steckern . . . . .	432
12.12	Zusammenfassung . . . . .	436
<b>13</b>	<b>Hohlleiter</b> . . . . .	<b>439</b>
	13.1 Einsatzgebiete, Vor- und Nachteile von Hohlleitern . . . . .	439
	13.2 Grundsätzlicher Aufbau von Hohlleitern . . . . .	440
	13.3 Wellenfortpflanzung und Wellentypen in Hohlleitern . . . . .	441
	13.4 Rechteckhohlleiter . . . . .	442
	13.5 Rundhohlleiter . . . . .	448
	13.6 Einige Daten von Hohlleitern . . . . .	450
	13.7 Hohlleiterbauelemente . . . . .	453
	13.8 Hohlraumresonator mit Rechteckquerschnitt . . . . .	454
	13.9 Zusammenfassung . . . . .	456
	<b>Liste verwendeter Formelzeichen</b> . . . . .	<b>459</b>
	<b>Literatur</b> . . . . .	<b>463</b>
	<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	<b>467</b>



## **Elektronik**

Die Elektronik ist ein Teilbereich der Elektrotechnik und befasst sich mit der Entwicklung und Fertigung von elektronischen Bauelementen sowie deren Anwendung in elektrischen Schaltkreisen und Netzwerken. Zur Elektronik gehören alle Zweige von Wissenschaft und Technik, die sich mit physikalischen Vorgängen und technischen Anwendungen der Elektronenleitung im Vakuum, in Gasen und in Festkörpern beschäftigen. Schwerpunkte der Elektronik sind beispielsweise die Nachrichtentechnik, Leistungselektronik und die elektronische Messtechnik. Die Mikroelektronik behandelt die Entwicklung und Herstellung integrierter Schaltkreise als monolithische Schaltungen auf einem Chip (z. B. Prozessoren, Sensoren) und miniaturisierter Komponenten und Systeme. Wichtige Teilbereiche der Elektronik sind die Analogtechnik, die Digitaltechnik, die Hochfrequenztechnik und die Optoelektronik.

## **Bauelement**

Ein Bauelement ist hinsichtlich der Datenangaben, der Prüfung, dem Vertrieb, der Anwendung und Instandsetzung die kleinste, nicht weiter zerlegbare Einheit (DIN 40150).

## **Bauteil, Baustein**

Unter Bauteil oder Baustein wird eine Zusammenfassung von wenigen Bauelementen verstanden (z. B. Funkentstörereinheit, Leistungsbaustein). In der Praxis wird der Begriff „Bauteil“ meist im Sinne von „Bauelement“ verwendet. Ein ohmscher Widerstand wird z. B. sowohl als Bauelement als auch als Bauteil bezeichnet.

## **Baugruppe**

Mehrere Bauelemente oder Bausteine bilden eine Baugruppe. Diese ist noch nicht selbstständig verwendbar (z. B. Netzgerät eines PC).

**Gerät**

Das Gerät ist eine Zusammenschaltung von Bauelementen, Bauteilen und Baugruppen zu einer selbstständig verwendbaren Einheit (z. B. Fernsehgerät, PC, Messgerät).

**Anlage**

Die Zusammenschaltung mehrerer Geräte und Baugruppen zu einem bestimmten Anwendungszweck wird allgemein als Anlage bezeichnet (z. B. Sendeanlage, Rechenanlage, Stereolanlage).

**Elektronische Bauelemente**

Sie sind die Komponenten einer elektronischen Schaltung.

Elektronische Bauelemente lassen sich in zwei große Gruppen einteilen:

1. *passive* Bauelemente
2. *aktive* Bauelemente.

Bei beiden Gruppen unterscheidet man wiederum zwischen *linearen* und *nichtlinearen* Bauelementen.

**Passive** Bauelemente besitzen keine eingebaute Leistungsquelle, ihre Ausgangsleistung kann also niemals größer als ihre Eingangsleistung sein. Passive Bauelemente verstärken ein Eingangssignal *nicht*, häufig sind sie elektrische Verbraucher. Passive Bauelemente sind stets zweipolig. Zu den linearen passiven Bauelementen gehören Widerstände, Kondensatoren und Spulen. Dioden zählen dagegen zu den nichtlinearen passiven Bauelementen.

Anmerkung: Obwohl Dioden passive Bauelemente sind, werden sie in diesem Werk nicht behandelt. Dioden sind, wie die meisten aktiven Bauelemente, aus Halbleitermaterial aufgebaut. Das nötige Wissen über Halbleiter und den pn-Übergang würde hier für Dioden alleine einen zu großen Raum einnehmen. Dioden werden deshalb in einem extra Werk zusammen mit aktiven elektronischen Bauelementen besprochen.

**Aktive** Bauelemente können meist ein Eingangssignal verstärken, i. Allg. wird hierzu eine Hilfsenergiequelle benötigt. Ein Transistor ist z. B. ein aktives Bauelement, bei kleiner Aussteuerung zeigt er außerdem ein lineares, bei großer Aussteuerung ein nichtlineares Verhalten. Ein aktives Element kann auch eine Quelle elektrischer Energie sein, z. B. eine Spannungs- oder eine Stromquelle.

**Lineare** Bauelemente zeigen zwischen Ausgangs- und Eingangsgröße einen linearen Zusammenhang. Beim ohmschen Widerstand ist dies z. B. die gerade Kennlinie des Stromes als Funktion der Spannung.

**Nichtlineare** Bauelemente weisen dagegen eine gekrümmte Kennlinie als Zusammenhang zwischen Ausgangs- und Eingangsgröße auf. Bei einer Diode z. B. steigt der Strom nichtlinear mit der Spannung an.

Durch elektronische Bauelemente werden elektrische Größen (z. B. Strom, Spannung) verarbeitet. Nichtelektrische Größen (z. B. Druck, Beleuchtungsstärke etc.) können durch so genannte Wandler oder durch Sensoren, sie sind selbst ebenfalls elektronische Bauteile oder aus solchen aufgebaut, in elektrische Signale umgewandelt werden.

Zu den elektronischen Bauteilen werden in diesem Buch auch elektromechanische Bauteile gezählt (obwohl dies oft anders definiert wird). Leiterplatten mit ihren Leiterbahnen, Leitungen oder Relais werden als Bauelement betrachtet, alle rein mechanischen Komponenten wie z. B. Gehäuseteile jedoch nicht. Das Wissen um die Eigenschaften verschiedener Materialien, aus denen Bauelemente bestehen, erleichtert das Verständnis für deren Beschaffenheit, Kennzeichen und Einsatzgebiete.

### **Temperaturbereiche**

Der Einsatz von Bauelementen kann nach Temperaturanforderungen eingeteilt werden. Typische Temperaturbereiche sind:

1. industrieller Bereich mit  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. erweiterter industrieller Bereich mit  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$
3. militärischer Bereich mit  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### **Normreihen**

Die Nennwerte von Widerständen sind nach Normreihen mit den Bezeichnungen E6, E12, E24, E48, E96 und E192 abgestuft. In einer Normreihe hängt die Anzahl der Werte pro Dekade von den Toleranzgrenzen der einzelnen Widerstandswerte ab.

### **Zuverlässigkeit**

Zuverlässigkeit ist ein Maßstab für die Eigenschaft eines Bauelementes, bei einer gegebenen Belastung innerhalb eines bestimmten Zeitraumes voraussichtlich fehlerfrei zu arbeiten. Steigen die Ansprüche an die Zuverlässigkeit, so steigen auch die Bauelementekosten. Die Zuverlässigkeit wird quantifiziert durch eine Fehler- oder eine Ausfallwahrscheinlichkeit.

### **Ausfallrate**

Jedes elektronische Bauelemente unterliegt einem Verschleiß, der zu einem Ausfall des Bauelementes führen kann. Die Ausfallrate  $\lambda$  gibt an, welcher Bruchteil  $\Delta N$  von  $N$  Bauelementen im Mittel während eines Zeitintervalls  $\Delta t$  ausfällt.

$$\lambda = \frac{|\Delta N/N|}{\Delta t} \quad (1.1)$$



**Abb. 1.1** Badewannenkurve

Die Ausfallrate hat die Benennung „pro Zeiteinheit“ und wird in Datenblättern häufig in **fit** (failure in time) angegeben.

$$1 \text{ fit} = \frac{10^{-9}}{\text{h}} \quad (1.2)$$

Der in Datenblättern meist angegebene Kehrwert der Ausfallrate wird als **MTBF** (Mean Time Between Failure) bezeichnet.

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} \quad (1.3)$$

Die Ausfallrate über der Betriebszeit aufgetragen ergibt die so genannte **Badewannenkurve** (Abb. 1.1).

Man unterscheidet Früh-, Zufalls- und Verschleißausfälle.

Die **Frühhausfälle** (ein elektronisches Gerät funktioniert z. B. bereits zwei Tage nach dem Kauf nicht mehr) werden mit dem **Incircuit-Test** (Test aller Bauteile auf Vorhandensein, richtige Werte und Fehlerfreiheit) und dem **Funktionstest** (Test der Baugruppe oder des Gerätes auf Fehlerfreiheit aller Funktionen) beim Gerätehersteller nicht entdeckt. Ursachen für Frühhausfälle einer Baugruppe bzw. von eingebauten Bauteilen können Fehler bei der Herstellung von Bauelementen oder deren Schädigung (thermisch, mechanisch, durch elektrostatische Entladung) beim Einbau sein. Frühhausfälle können durch einen **Burn-In** (Hochtemperaturlagerung) oder einen **Run-In** (Betrieb bei hoher Temperatur) ausgesondert werden. Diese Voralterungsverfahren reduzieren die Zeit bis zum möglichen Frühausfall durch erhöhte Temperatur, der Boden der Badewannenkurve wird in kürzerer Zeit erreicht als bei Betrieb ohne erhöhten Stress.

Die Fehlerhäufigkeit von Baugruppen ist durch die Frühhausfälle von Bauelementen anfänglich relativ hoch und bleibt nach einiger Zeit auf einem wesentlich niedrigeren, konstanten Wert.

Die **Zufallsausfälle** in diesem Bereich sind meist durch Materialveränderung (Diffusion, Migration, Grenzschichtveränderung) bedingt. Da diese Prozesse thermisch aktiviert werden, hängt hier die Ausfallrate stark von der Temperatur ab.

Die **Verschleißausfälle** bedingt durch Alterung treten gegen Ende der Produktlebensdauer auf, die Ausfallrate steigt wieder an.

Durch die Ähnlichkeit mit dem Querschnitt einer Badewanne wird die Anzahl der Fehler als Funktion der Betriebszeit als „Badewannenkurve“ bezeichnet.

$N(t)$  ist die Anzahl von Bauelementen, die von insgesamt  $N(0)$  Bauelementen nach einer Zeit  $t$  noch intakt sind.

$$N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.4)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Element in der Zeit  $t$  intakt bleibt, ist:

$$w = \frac{N(t)}{N(0)} = e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.5)$$

Die **Ausfallwahrscheinlichkeit** (Wahrscheinlichkeit, mit der ein Bauelement ausfällt) ist:

$$f = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.6)$$

Ist  $\lambda \cdot t \ll 1$ , so gilt näherungsweise  $f \approx \lambda \cdot t$ .

Um Ausfälle von Baugruppen oder Geräten zu vermeiden, können folgende Empfehlungen für den Einsatz elektronischer Bauelemente gegeben werden.

1. Das schwächste Glied bestimmt die Zuverlässigkeit einer Schaltung. Bei der Auswahl der Bauelemente müssen daher klimatische und mechanische Beanspruchungen sowie die Anforderungen an die Funktionszuverlässigkeit berücksichtigt werden. Da Bauelemente hoher Qualität sehr viel teurer sind als solche für normale Anwendungen, muss dieser Punkt besonders sorgfältig überlegt werden.
2. Einfache Schaltungen mit möglichst wenigen Bauelementen (mit einem hohen Integrationsgrad) sind zu bevorzugen.
3. Die Schaltungen sind so zu dimensionieren, dass die Bauelemente im Normalbetrieb nur mit einem Teil der Nennlast beansprucht werden. Eine Ausnahme sind Elektrolytkondensatoren, deren durchschnittliche Lebensdauer bei erheblicher Unterspannung abnimmt.

### Datenblätter

Sie geben Auskunft über die mechanischen und elektrischen Eigenschaften von Bauelementen.

Ein Datenblatt enthält z. B. eine Kurzbeschreibung des Bauelementes, Gehäusedaten, mechanische Daten, Nennwerte<sup>1</sup> (Bemessungswerte), typische Werte, Garantiewerte, Grenzwerte, Qualitätsdaten, Schaltungsvorschläge. Eine solche Datenzusammenstellung kann enthalten:

---

<sup>1</sup> Angaben, die sich auf den Normalbetrieb beziehen, wurden früher mit der Vorsilbe „Nenn-“, heute mit „Bemessungs-“ bezeichnet. In der Praxis werden beide Ausdrücke benutzt.

1. Kurzbeschreibung des Bauelementes mit Typenbezeichnung, Hersteller, Technologie (z. B. Material und Herstellungsverfahren), Anwendungsbereich
2. Gehäusedaten mit verwendeten Werkstoffen, Art der Verkapselung, Zeichnung mit Bemäßung, Nummerierung der Anschlüsse, bestimmte Markierungspunkte
3. Mechanische Daten unter Angabe der Anwendungsklassen und Montagebedingungen, Verarbeitungshinweise (z. B. Löttemperaturen)
4. *Grenzwerte* (z. B. Strom-, Spannungs-, Temperatur- und Leistungswerte sowie mechanische Einflussgrößen), die auf keinen Fall überschritten werden dürfen. Damit die Grenzwerte unter allen Umständen eingehalten werden, müssen alle Streuwerte der Schaltung bei der Auslegung berücksichtigt werden.
5. *Kennwerte* beschreiben die Eigenschaften und die Funktion eines Bauelementes unter normalen Betriebsbedingungen. Kennwerte werden als Zahlengrößen angegeben oder als Kennlinien dargestellt. Zu den meisten Kennwerten gehört eine Temperatur, auf die diese Kennwerte bezogen sind.

Die Kennwerte der Bauelemente streuen mehr oder weniger stark. In den Datenblättern werden sie daher als Mittelwerte angegeben oder es werden die unteren und oberen Grenzen genannt. Die Streuung der Kennwerte muss besonders bei der Entwicklung und Dimensionierung von Schaltungen berücksichtigt werden.

Bei Halbleiterbauelementen unterscheidet man statische und dynamische Kennwerte.

*Statische Kennwerte* kennzeichnen alle Funktionen eines Bauelementes, die nicht mit einer auf die Zeit bezogenen Arbeitsweise zusammenhängen. Bei Halbleiterdioden sind dies z. B. die Durchlassspannung und der Sperrstrom.

*Dynamische Kennwerte* geben Auskunft über das Zeitverhalten. Zu den dynamischen Kennwerten gehören bei Transistoren z. B. die Schaltzeiten.

## Felder

Zur Wiederholung des Feldbegriffes, z. B. magnetisches Feld, elektrisches Feld:

- Ein Feld beschreibt einen physikalischen Zustand innerhalb eines Raumes, allgemein in vier Dimensionen (drei Koordinaten der Richtungen  $x$ ,  $y$ ,  $z$  und die Zeit  $t$ ).
- Der Zustand wird durch eine physikalische Feldgröße beschrieben, die jeden Punkt des Raumes zugeordnet ist.
- Die Gesamtheit aller Zustandswerte heißt Feld.
- Zu unterscheiden sind:
  - Skalar-Felder (nicht gerichtet), z. B. Potenzial  $\varphi$
  - Vektor-Felder (gerichtet), z. B. elektrische Feldstärke  $\vec{E}$ .

---

## 2.1 Metalle

Metalle und Metall-Legierungen sind in der Elektrotechnik die wichtigsten elektrisch leitfähigen Materialien. Bei metallischen Leitern kann man (grob und jeweils bei einer Umgebungstemperatur von ca. 20 °C) zwischen sehr gut leitenden Metallen mit einem spezifischen Widerstand kleiner  $0,1 \mu\Omega\text{m}$  und schlecht leitenden Legierungen mit einem spezifischen Widerstand größer  $0,3 \mu\Omega\text{m}$  unterscheiden. Aus sehr gut leitenden Metallen werden z. B. Drähte, Kabel, Steckverbindungen sowie Spulen von Transformatoren und elektrischen Maschinen hergestellt. Legierungen mit hohem Widerstand werden für die Herstellung von Widerstandsbauteilen, Heizdrähten usw. verwendet. Folgende Faktoren sind für die Wahl eines Leitermaterials zur technischen Weiterverarbeitung von Bedeutung:

- Korrosionsverhalten
- Oxidationsverhalten
- Dauerfestigkeit
- Widerstands-Temperaturkoeffizient
- Beständigkeit gegen Chemikalien
- Kosten.

Metalle können somit in gute und schlechte Leiter eingeteilt werden.

Gute Leiter haben einen kleinen elektrischen Widerstand, sie können entsprechende Energie bzw. Leistung führen, ohne dass in ihnen nennenswerte Verluste entstehen (Verlustleistung in Form von unerwünschter Wärme).

Selektionskriterien für Leiter sind:

- elektrischer Widerstand des Materials
- Widerstands-Temperaturkoeffizient

- Beständigkeit gegen Korrosion
- Oxidationscharakteristik
- Verarbeitbarkeit beim Lötten oder Schweißen
- mechanische Eigenschaften und Verarbeitbarkeit
- natürliches Vorkommen (ausreichende Verfügbarkeit)
- Beständigkeit gegen Chemikalien und Umwelt
- Kosten, Recyclbarkeit.

### 2.1.1 Elektrische Eigenschaften der Metalle

Der elektrische Widerstand eines Körpers aus leitendem Material hängt von Art, Form und Abmessungen des Körpers ab. Für einen langen, geraden Leiter kann der Widerstand nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

Hierin sind:

$R$  = Widerstandswert in Ohm für niedrige Frequenzen (kein Skineffekt!)

$\rho$  = *spezifischer Widerstand* des Materials (eine temperaturabhängige Materialkonstante, meist als  $\rho_{20}$  für Raumtemperatur mit 20 °C angegeben)

$l$  = Länge des Leiters

$A$  = Querschnittsfläche des Leiters, konstant über die Länge  $l$ .

Der spezifische Widerstand  $\rho$  wird in  $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$  oder in  $\Omega \text{m}$  (Ohm-Meter) angegeben.

Der spezifische Leitwert  $\sigma$  ist der Kehrwert des spezifischen Widerstandes:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.2)$$

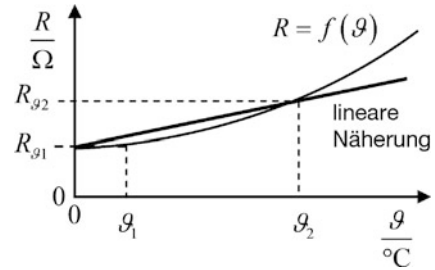
Der elektrische Leitwert  $G$  mit der Einheit S (Siemens) ist der Kehrwert des Widerstandes:

$$G = \frac{1}{R} \quad (2.3)$$

Der Widerstand eines metallischen Leiters ändert sich mit der Temperatur. Mit steigender Temperatur verlassen durch die Zuführung von Energie immer mehr Elektronen die Atomhülle und werden zu freien Elektronen, die Anzahl der freien Ladungsträger und damit die Leitfähigkeit nimmt zu. Diesem Effekt wirkt entgegen, dass mit zunehmender Temperatur die ortsfesten Atomrümpfe im Kristall-Gitterverband der Leiter größere Schwingungen ausführen (Wärmebewegung). Dadurch sinkt die Beweglichkeit der Elektronen, da sich der effektive Querschnitt für ihre Driftbewegung verkleinert, die Leitfähigkeit nimmt ab



**Abb. 2.1** Widerstandsänderung metallischer Leiter in Abhängigkeit der Temperatur



bzw. der Widerstand zu. Weil der zweite Effekt überwiegt, nimmt der Widerstand eines metallischen Leiters mit steigender Temperatur zu.

Diese Widerstandsänderung ist als Funktion der Temperatur  $\vartheta$  nichtlinear, die wahre Kennlinie kann durch ein Polynom angenähert werden.

$$R_{\vartheta_2} = R_{\vartheta_1} \cdot \left[ 1 + \alpha (\vartheta_2 - \vartheta_1) + \beta (\vartheta_2 - \vartheta_1)^2 + \lambda (\vartheta_2 - \vartheta_1)^3 + \dots \right] \quad (2.4)$$

Im Temperaturbereich  $-50\text{ °C} \leq \vartheta \leq 150\text{ °C}$  (die Grenzen sind ungefähre Werte) kann die Widerstandsänderung durch eine Gerade angenähert werden (Abb. 2.1). Oberhalb ca.  $150\text{ °C}$  nimmt der Widerstand wieder stärker (nichtlinear) zu. Innerhalb des genannten Temperaturintervalles braucht also i. Allg. in Gl. 2.4 nur mit dem Koeffizienten  $\alpha$  gerechnet werden. Man erhält den linearen Ausdruck

$$R_{\vartheta_2} = R_{\vartheta_1} \cdot [1 + \alpha (\vartheta_2 - \vartheta_1)] \quad (2.5)$$

Als Bezugstemperatur wird  $\vartheta$  zu  $\vartheta_1 = 20\text{ °C}$  gewählt. Bezogen auf  $\vartheta_1 = 20\text{ °C}$  ist  $\alpha_{20}$  der lineare *Temperaturkoeffizient* (TK) mit der Einheit  $\frac{1}{\text{K}}$  oder  $\frac{1}{\text{°C}}$ , der quadratische TK ist  $\beta_{20}$  mit der Einheit  $\frac{1}{\text{K}^2}$ . K bedeutet Kelvin. Der TK wird auch als *Temperaturbeiwert* bezeichnet.

Bis ca.  $\vartheta_2 = 150\text{ °C}$  gilt somit vereinfacht:

- für den Widerstandswert  $R_{\vartheta_2}$  bei der Temperatur  $\vartheta_2$ :

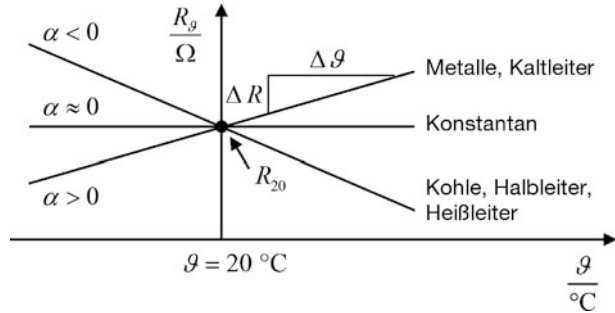
$$R_{\vartheta_2} = R_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} (\vartheta_2 - 20\text{ °C})] \quad (2.6)$$

- für die Widerstandsänderung  $\Delta R$  in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta = \vartheta_2 - 20\text{ °C}$  zu  $20\text{ °C}$ :

$$\Delta R = \alpha_{20} \cdot R_{20} \cdot \Delta\vartheta \quad (2.7)$$

$R_{20}$  ist der Bezugswiderstandswert bei  $20\text{ °C}$ .

**Abb. 2.2** Widerstandsänderung von Materialien je nach Temperaturkoeffizient  $\alpha$



Für Temperaturen  $\vartheta_{\text{hoch}}$  über ca.  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  muss in Gl. 2.4 wegen der nichtlinearen Widerstandsänderung ein zweiter Koeffizient  $\beta = \beta_{20}$  berücksichtigt werden. Der Widerstandswert  $R_{\vartheta_{\text{hoch}}}$  bei der Temperatur  $\vartheta_{\text{hoch}}$  ist dann:

$$R_{\vartheta_{\text{hoch}}} = R_{20} \cdot \left[ 1 + \alpha_{20} (\vartheta_{\text{hoch}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}) + \beta_{20} (\vartheta_{\text{hoch}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C})^2 \right] \quad (2.8)$$

Je nach Materialart ist der lineare Temperaturkoeffizient  $\alpha$  positiv, annähernd Null, oder negativ (Abb. 2.2).

- $\alpha > 0$ : Viele Metalle, Kaltleiter oder PTC-Widerstände (PTC: **p**ositive **t**emperature **c**oefficient). Der Widerstand von Kaltleitern, z. B. von Metallen, nimmt bei Temperaturerhöhung also zu.
- $\alpha \approx 0$ : Z. B. Konstantan (eine Widerstandsdraht-Legierung) oder andere spezielle Legierungen, damit Temperaturunabhängigkeit erreicht wird. Bei einem temperaturstabilen Messwiderstand bedeutet z. B. die Angabe  $\text{TK} = 50\text{ ppm}$ , dass  $\alpha = 50 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$  ist. Die Bezeichnung „ppm“ bedeutet „parts per million“,  $1\text{ ppm} = 10^{-6}$ .
- $\alpha < 0$ : Kohlenstoff, Halbleiter, Heißleiter oder NTC-Widerstände (NTC: **n**egative **t**emperature **c**oefficient). Bei negativem TK überwiegt die stärkere Bereitstellung von Ladungsträgern mit steigender Temperatur gegenüber der Einschränkung der Beweglichkeit der Elektronen.

Der Widerstand von Heißleitern, Kohle und den meisten Halbleitern, nimmt bei Temperaturerhöhung ab.

**Faustregel** Bei vielen Metallen nimmt der Widerstand bei  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  Temperaturerhöhung um etwa 4 % zu.

Der spezifische Widerstand hängt nicht nur von der Temperatur, sondern auch von der Reinheit der Metalle ab. Er kann sich bereits durch geringe Mengen an Fremdatomen im Metall erheblich ändern. Technisch genutzt wird dies bei Metalllegierungen, um Material mit geringem Temperaturkoeffizienten zu erhalten. Beispiele für solche Metalllegierungen sind Manganin und Konstantan, welche für Mess- und Präzisionswiderstände mit sehr geringer Temperaturabhängigkeit verwendet werden (siehe Tab. 2.1).

**Tab. 2.1** Spezifischer Widerstand  $\rho_{20}$  und Temperaturkoeffizienten  $\alpha_{20}$  und  $\beta_{20}$  einiger Materialien

Material	Chem. Symbol	$\frac{\rho_{20}}{\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}}$	$\frac{\alpha_{20}}{10^{-3} \cdot \text{K}^{-1}}$	$\frac{\beta_{20}}{10^{-6} \cdot \text{K}^{-2}}$
Silber	Ag	0,016	3,8	0,7
Kupfer	Cu	0,01786	3,93	0,6
Gold	Au	0,023	4	0,5
Aluminium	Al	0,02857	3,77	1,3
Wolfram	W	0,055	4,1	1
Zink	Zn	0,063	3,7	2
Messing	–	0,07...0,09	1,5	–
Nickel	Ni	0,08...0,11	3,7...6	9
Eisen	Fe	0,10...0,15	4,5...6	6
Zinn	Sn	0,11	4,2	–
Platin	Pt	0,11...0,14	3,92	0,6
Blei	Pb	0,21	4,2	2
Manganin (84Cu, 4Ni, 12Mn)	–	0,43	$\pm 0,01$	–
Konstantan (55Cu, 44Ni, 1Mn)	–	0,50	$\pm 0,04$	–
Chromnickel (80Ni, 20Cr)	–	1,12	0,06	–
Kohle (Grafit)	–	40...100	–0,1	–

## 2.1.2 Metallische Leiter bei hohen Frequenzen

Gleichung 2.1 gilt für den Widerstand eines metallischen Leiters bei Gleichstrom und auch bei Wechselstrom mit niedriger Frequenz, solange keine Stromverdrängung auftritt. Bei höheren Frequenzen wird der Strom durch Induktionseffekte im Leiterinneren zunehmend an die Leiteroberfläche verdrängt (**Skineffekt**). Je nach Frequenz und Querschnitt wird das Innere des Leiters praktisch stromlos. Damit ist der für die Stromleitung zur Verfügung stehende Querschnitt reduziert, dies bewirkt eine Widerstandserhöhung.

Bei einem ausgeprägten Skineffekt nimmt die Stromdichte  $J$  mit zunehmendem Abstand  $x$  von der Leiteroberfläche exponentiell ab.

$$J(x) = J_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (2.9)$$

Bei der so genannten **Eindringtiefe**  $\delta$  (Eindringmaß, Wirtiefe, äquivalente Leitschichtdicke) ist die Stromdichte auf den Bruchteil  $1/e$  ( $= 36,8\%$ ) des Wertes  $J_0$  an der Oberfläche abgesunken. Ab der fünffachen Eindringtiefe beträgt die Stromdichte weniger als 1%.

Die Eindringtiefe  $\delta$  dient zur Beurteilung der wirksamen Leiterschicht. Sie ist von der Frequenz und den Materialeigenschaften abhängig. Für runde Leiter gilt:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (2.10)$$

**Tab. 2.2** Eindringtiefe  $\delta$  in Abhängigkeit der Frequenz bei einem Kupferleiter

$f$	60 Hz	10 kHz	1 MHz	100 MHz	10 GHz
$\delta$	8,6 mm	0,67 mm	67 $\mu\text{m}$	6,7 $\mu\text{m}$	0,67 $\mu\text{m}$

$\delta$  = Eindringtiefe in m (Meter),

$\omega = 2\pi f$  = Kreisfrequenz,

$\sigma$  = spezifische Leitfähigkeit

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$  = Permeabilitätskonstante des Vakuums (magnetische Feldkonstante)

$\mu_r$  = Permeabilitätskonstante des Leitermaterials (relative magnetische Permeabilität, Permeabilitätszahl)

Gleichung 2.10 ist gültig, wenn gilt: Leiterdicke  $\gg$  Eindringtiefe.

Für einen Leiter aus Kupfer gilt:

$$\delta_{\text{Cu}} \approx \frac{0,067}{\sqrt{f}} (\delta_{\text{Cu}} \text{ in mm, } f \text{ in MHz}) \quad (2.11)$$

Einige Zahlenwerte für einen Kupferleiter gibt Tab. 2.2 an.

Da sich die Eindringtiefe umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Frequenz verhält, steigt der Wechselstromwiderstand proportional zu  $\sqrt{f}$ .

Als *spezifischer Oberflächenwiderstand*  $R_F$  wird der Wirkwiderstand eines quadratischen Oberflächenstückes (beliebiger Seitenlänge) eines elektrischen Leiters mit der Eindringtiefe  $\delta$  bezeichnet.

$$R_F = \sqrt{\frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{\sigma} \cdot f} = \sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \rho \cdot f} \quad (2.12)$$

Der Widerstand eines kreisrunden Metalldrahtes in Abhängigkeit der Frequenz ist:

$$R(f) = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot f}{2 \cdot \sigma}} \quad (2.13)$$

$l$  = Drahtlänge,

$r$  = Drahtradius,

$\sigma$  = spezifische Leitfähigkeit.

Zur Beurteilung des Wechselstromwiderstandes eines Leiters bei hohen Frequenzen muss zuerst die Eindringtiefe  $\delta$  berechnet und mit dem Leiterradius  $r$  verglichen werden.

$r < \delta$ : Skineffekt nicht oder kaum wirksam

$r > 5\delta$ : Skineffekt wirksam, Widerstand steigt proportional zu  $\sqrt{f}$

$\delta < r < 5\delta$ : Übergangsgebiet, Skineffekt leicht spürbar.

Maßnahmen gegen den Skinneffekt:

- Leitfähigkeit der stromführenden Schicht verbessern, z. B. durch Versilbern.
- Auf eine gute Oberflächenqualität achten, eine raue Oberfläche erhöht die Leiterlänge und somit auch den Widerstand.
- Bis zu Frequenzen von ca. 10 MHz kann man **HF-Litze** verwenden. HF-Litze besteht aus einzelnen, sehr dünnen ( $\varnothing \leq 0,1$  mm), voneinander isolierten, miteinander verflochtenen Drähten und weist damit für einen bestimmten Querschnitt eine größere Oberfläche auf als ein massiver Draht. Wegen der geringen Drahtstärke wird der Skinneffekt im Einzeldraht erst bei sehr hohen Frequenzen wirksam. Für  $f > 10$  MHz sind die einzelnen Litzen jedoch so stark kapazitiv miteinander gekoppelt, dass keine Verbesserung mehr gegenüber massiven Drähten auftritt. Die Hauptanwendung von HF-Litze liegt in der Realisierung von Spulen und Übertragern im Frequenzbereich von 1 MHz bis 10 MHz.

### 2.1.3 Thermische Eigenschaften der Metalle

Ein Metall dehnt sich bei Erwärmung aus. Der lineare Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  (Werte einiger Materialien siehe Tab. 2.3) ist definiert durch die Beziehung

$$l(T) = l_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2.14)$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta T} \quad (2.15)$$

Näherungsweise ist der Ausdehnungskoeffizient für alle Metalle umgekehrt proportional zur *Schmelztemperatur*  $T_S$  (absolut gemessen).

$$\alpha \sim \frac{1}{T_S} \quad (2.16)$$

Werden zwei verschiedene Materialien miteinander verbunden, so muss in der Elektrotechnik deren thermische Ausdehnung beachtet werden. Durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten der kombinierten Materialien kann es zu großen mechanischen Belastungen der Verbindung kommen. Dieser mechanische Stress kann die elektrischen Eigenschaften der Verbindung verändern oder zu deren Zerstörung führen.

Beispiele für die Verbindung unterschiedlicher Materialien sind

- in Glas oder Keramik eingeschmolzene, metallische Stromdurchführungen
- Metallkontakte oder Lot-Bumps auf Siliziumchips
- durch Lot verbundene Metallteile.

**Tab. 2.3** Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  einiger Materialien

Material	$\alpha$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
Aluminium	24
Zinn	21
Silber (rein)	19,8
Kupfer (rein)	17
Gold	14
Nickel (rein)	13
Eisen	12
Glas, Platin	9
Quarzglas	8
Tantal	6,5
Gold (rein)	4,4
Keramik	4
Grafit	3

Für die Elektrotechnik ist ebenfalls wichtig, dass Metalle eine gute Wärmeleitung haben, die proportional zur elektrischen Leitfähigkeit ist.

**Stoffe mit guter elektrischer Leitung weisen auch eine gute Wärmeleitung auf.**

Die gute Wärmeleitung von Metallen wird zur Abführung von Verlustleistung (Kühlkörper) verwendet. Zahlenwerte einiger Stoffe zeigt Tab. 2.4.

Anmerkung: Die gute Wärmeleitung der Metalle zeigt, dass der Wärmetransport bei den Metallen hauptsächlich durch die Leitungselektronen erfolgt, zusätzlich zu den Gitterschwingungen. Bei Festkörpern mit geringer Leitfähigkeit findet der Wärmetransport nur über Schwingungen der Gitteratome statt.

In der Technik gebräuchliche metallische Leitermaterialien sind:

Kupfer, Aluminium, Silber, Tungsten, Molybdän, Platin, Tantal, Niobium, karbonhaltige Leiter, bleihaltige Leiter, Konstantan, Manganin, Nickel-Chrom, Gold.

Die Wärmeleitfähigkeit ist von der Temperatur abhängig.

**Tab. 2.4** Wärmeleitfähigkeit einiger Stoffe

Stoff	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in $\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ bei $20^{\circ}\text{C}$
Silber	417
Kupfer	394
Gold	297
Aluminium	210
Nickel	92
Platin	70
Stahl	58
Quarz	1,3
Beton	0,75...0,95
Glas	0,58...1,05
Luft	0,0257