



Leonhard Stiny

Passive elektronische Bauelemente

Aufbau, Funktion, Eigenschaften,
Dimensionierung und Anwendung

3. Auflage

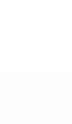
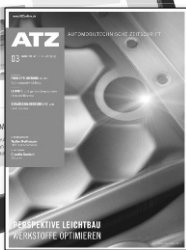
 Springer Vieweg

Passive elektronische Bauelemente

Lizenz zum Wissen.




Sichern Sie sich umfassendes Technikwissen mit Sofortzugriff auf tausende Fachbücher und Fachzeitschriften aus den Bereichen: Automobiltechnik, Maschinenbau, Energie + Umwelt, E-Technik, Informatik + IT und Bauwesen.

Exklusiv für Leser von Springer-Fachbüchern: Testen Sie Springer für Professionals 30 Tage unverbindlich. Nutzen Sie dazu im Bestellverlauf Ihren persönlichen Aktionscode **C0005406** auf www.springerprofessional.de/buchaktion/



**Jetzt
30 Tage
testen!**

Springer für Professionals.
Digitale Fachbibliothek. Themen-Scout. Knowledge-Manager.

-  Zugriff auf tausende von Fachbüchern und Fachzeitschriften
-  Selektion, Komprimierung und Verknüpfung relevanter Themen durch Fachredaktionen
-  Tools zur persönlichen Wissensorganisation und Vernetzung

www.entschieden-intelligenter.de

Springer für Professionals

 Springer

Leonhard Stiny

Passive elektronische Bauelemente

Aufbau, Funktion, Eigenschaften,
Dimensionierung und Anwendung

3., überarbeitete Auflage



Springer Vieweg

Leonhard Stiny
Haag a. d. Amper, Deutschland

ISBN 978-3-658-24732-4

ISBN 978-3-658-24733-1 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-24733-1>

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

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2015, 2019

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

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 2018

Leonhard Stiny

Inhaltsverzeichnis

1	Begriffsdefinitionen	1
2	Material: Eigenschaften und Klassifizierung	7
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
3	Festwiderstände	19
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
4	Veränderbare Widerstände, Potenziometer	67
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
5	Veränderliche, nichtlineare Widerstände	91
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: Strömungsmesser und Flüssigkeits-Niveaufühler	120
5.2.9	Anwendung: Selbstregelnder Thermostat	120
5.2.10	Anwendung: Überstromsicherung	121
5.3	VDR-Widerstand, Varistor	122
5.3.1	Einsatzbereiche des Varistors	122
5.3.2	Herstellung von Varistoren, Leitungsmechanismus	123
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
6	Durch Dehnung veränderbarer Widerstand	143
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
7	Magnetfeldabhängiger Widerstand	163
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
8	Kondensatoren	171
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	179
8.2.2.1	Elektronenpolarisierung	179
8.2.2.2	Ionenpolarisierung	180
8.2.2.3	Orientierungspolarisierung	180
8.2.2.4	Frequenzabhängigkeit von ϵ_r	180
8.2.2.5	Temperaturabhängigkeit von ϵ_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	189
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	203
8.10.1	Angabe der Nennkapazität	203
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	207
8.11	Bauarten und Bauformen von Kondensatoren	207
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	212
8.11.1.4	Metallpapier-Kondensator (MP-Kondensator)	213
8.11.1.5	Kunststofffolienkondensator	214
8.11.1.6	Eigenschaften der Kunststofffolien, Anwendungsgebiete der Kondensatoren	217
8.11.1.7	KS- und KP-Kondensatoren im Detail	219

8.11.1.8	MK-Kondensatoren im Detail	222
8.11.1.9	Eigenschaften und Anwendungsgebiete von MK-Kondensatoren im Überblick	227
8.11.2	Elektrolytkondensator	229
8.11.2.1	Allgemeines zu Elektrolytkondensatoren	229
8.11.2.2	Aluminium-Elektrolytkondensatoren	230
8.11.2.3	Tantal-Folien-Elektrolytkondensatoren	240
8.11.3	Massekondensatoren	243
8.11.3.1	Keramikkondensatoren	243
8.11.3.2	Tantal-Sinter-Elektrolytkondensatoren	251
8.11.3.3	Niob-Elektrolytkondensatoren	252
8.11.3.4	Glaskondensatoren	253
8.11.4	Schichtkondensatoren	254
8.11.4.1	Keramik-Vielschicht-Kondensatoren	254
8.11.4.2	Dick- und Dünnschicht-Kondensatoren	254
8.11.4.3	Glimmerkondensatoren	255
8.11.5	Doppelschicht-Kondensatoren	255
8.11.6	Veränderbare Kondensatoren	257
8.12	Zusammenfassung	259
8.13	Kapazitäten von Leitern und Aufbauten	261
8.13.1	Kugel über einer unendlichen, leitenden und geerdeten Ebene	261
8.13.2	Gerader Draht parallel zur Erde	262
8.13.3	Zwei koaxiale Zylinder, konzentrische Rohrleitung	262
8.13.4	Paralleldrahtleitung	263
8.13.5	Durchführung	263
8.13.6	Kapazität einer Kugel	263
8.13.7	Kapazität von zwei Kugeln mit gleichem Radius	264
8.13.8	Kugelkondensator	264
8.13.9	Via (Durchkontaktierung Leiterplatte)	264
9	Induktivitäten	267
9.1	Wirkungsweise und Eigenschaften von Induktivitäten	267
9.1.1	Allgemeines	267
9.1.2	Grundlagen des Magnetismus	268
9.1.3	Elektromagnetismus	270
9.1.4	Wirkungsweise der Spule	271
9.1.4.1	Magnetwirkung des Stromes	271
9.1.4.2	Durchflutung	272
9.1.4.3	Magnetische Feldstärke	272
9.1.4.4	Magnetische Flussdichte	272
9.1.4.5	Magnetischer Fluss	275

	9.1.4.6	Induktion	276
	9.1.4.7	Kraft auf stromdurchflossene Leiter	278
	9.1.4.8	Selbstinduktion	280
	9.1.4.9	Induktivität	280
	9.1.4.10	Induktive Kopplung	280
	9.1.4.11	Induktiver Widerstand	281
	9.1.5	Aufbau der Spule	282
	9.1.5.1	Luftspule	282
	9.1.5.2	Spule mit Kern	282
	9.1.6	Kenngößen von Spulen	287
	9.1.7	Eigenkapazität der Spule	288
	9.1.8	Elektrisches Verhalten von Induktivitäten	289
	9.1.8.1	Selbstinduktion	289
	9.1.8.2	Ein- und Ausschalten von Gleichspannung an einer Spule	290
	9.1.8.3	Spule im Wechselstromkreis	292
	9.1.9	Reihen- und Parallelschaltung von Spulen	293
9.2		Zusammenfassung	294
9.3		Dimensionierung von Spulen, Induktivitätswerte	295
	9.3.1	A_L -Wert	295
	9.3.2	Zylinderspule, einlagig, mit und ohne Kern	296
	9.3.3	Zylinderspule, einlagig, ohne Kern	296
	9.3.4	Zylinderspule, mehrlagig, ohne Kern	298
	9.3.5	Spiralförmige, ebene Spule	301
	9.3.6	Toroidspule	301
	9.3.7	Drahring (ohne Kern)	303
	9.3.8	Rechteckige, planare Leiterschleife auf Leiterplatte	303
	9.3.9	Induktivitäten auf Leiterplatte	304
	9.3.10	Gerader Leiter	306
	9.3.11	Gerader Leiter über Massefläche	307
	9.3.12	Gerader Leiter über Massefläche, ein Ende an Masse	308
	9.3.13	Gerader Bandleiter	308
	9.3.14	Paralleldrahtleitung (Zweidrahtleitung, Doppelleitung)	309
	9.3.15	Hohlzylinder	309
	9.3.16	Koaxialleitung	310
	9.3.17	Via (Durchkontaktierung Leiterplatte)	310
9.4		Verwendungszweck, Beispiele zur Anwendung von Spulen	311
	9.4.1	Verwendung von Spulen im Gleichstromkreis	311
	9.4.2	Verwendung von Spulen im Wechselstromkreis	312

10	Transformatoren und Übertrager	315
10.1	Aufgaben und Einsatzbereiche	315
10.2	Magnetische Kopplung von Spulen	315
10.3	Gegeninduktion	316
10.3.1	Kopplungsfaktor, Streufaktor, Streuinduktivität	316
10.3.1.1	Kopplungsfaktor	316
10.3.1.2	Streufaktor	317
10.3.1.3	Streuinduktivität	318
10.3.1.4	Zusammenhang zwischen Kopplungsfaktor und Streufaktor	319
10.3.2	Gegeninduktionsspannungen	320
10.4	Der verlustlose, streufreie Transformator	322
10.4.1	Sekundärseite unbelastet	323
10.4.1.1	Transformatorhauptgleichung	323
10.4.1.2	Spannungs- und Stromtransformation	324
10.4.2	Sekundärseite belastet	325
10.4.2.1	Impedanztransformation	325
10.4.2.2	Übertrager zwischen ohmschen Widerständen	326
10.5	Realer (technischer) Transformator	327
10.5.1	Verlustarten	327
10.5.2	Verlustloser Transformator mit Streuung	328
10.5.3	Transformator mit Wicklungs- und Kernverlusten	329
10.5.4	Verbesserte M-Ersatzschaltung	332
10.6	Aufbau und Bauformen	333
10.6.1	Aufbau	333
10.6.2	Wicklungen	334
10.6.3	Transformatorkern	334
10.6.3.1	Material	334
10.6.3.2	Bauformen	335
10.7	Drehstromtransformator	336
10.8	Zusammenfassung	336
11	Elektrische Leitungen	339
11.1	Übersicht der Übertragungsmedien	339
11.2	Grundlagen zu elektrischen Leitungen	340
11.2.1	Wellenwiderstand	341
11.2.2	Ausbreitungskoeffizient	343
11.2.3	Ausbreitungsgeschwindigkeit (Phasengeschwindigkeit)	344
11.2.4	Phasenlaufzeit	345
11.2.5	Gruppenlaufzeit	345
11.2.6	Messung von Kurzschluss- und Leerlaufwiderstand	346

11.2.7	Eingangsimpedanz	347
11.2.8	Resonanz	347
11.2.9	Gekoppelte Leitungen	348
11.3	Zusammenfassung	349
11.4	Eindrahtleitung	350
11.4.1	Rundleiter nahe einer Massefläche	351
11.4.2	Rundleiter im rechten Winkel einer Massefläche	351
11.4.3	Rundleiter zwischen zwei parallelen Masseflächen (Slab Line)	352
11.4.4	Rundleiter mit U-Schirm (Trough Line, Channel Line)	352
11.4.5	Rundleiter auf einem Substrat mit rückwärtiger Massefläche	353
11.4.6	Rundleiter oberhalb eines Substrats mit rückwärtiger Massefläche	353
11.5	Zweidrahtleitungen	354
11.5.1	Paralleldrahtleitung	354
11.5.2	Zweidrahtleitung über Massefläche	358
11.5.3	Zweidrahtleitung mit unterschiedlichen Leiterdurchmessern	358
11.5.4	Zweidrahtleitung in runder Abschirmung	358
11.5.5	Twisted Pair	359
11.6	Koaxialleitung	362
11.6.1	Aufbau und Anwendungen der runden Koaxialleitung	362
11.6.2	Eigenschaften von Koaxialkabeln	363
11.6.3	Leitungsbeläge von Koaxialleitungen bei hohen Frequenzen	367
11.6.4	Koaxialkabel mit geschichtetem Dielektrikum	368
11.6.5	Rundes, exzentrisches Koaxkabel	369
11.6.6	Koaxialleitung mit quadratischer Schirmung	370
11.6.7	Koaxiale Bandleitung mit Rechteckform von Schirm und Innenleiter	370
11.6.8	Koaxiale Bandleitung mit rundem Schirm	371
11.7	Streifenleitung	371
11.7.1	Vor- und Nachteile, Grundformen und Anwendungen der Streifenleitung	371
11.7.2	Materialien und Substrate von Streifenleiterschaltungen	375
11.7.3	Bauformen von Streifenleitungen	376
11.7.4	Einfache Näherungsformeln zur Analyse bestimmter Bauformen von Streifenleitungen	376
11.7.4.1	Doppelbandleitung	377
11.7.4.2	Mikrostreifenleitung (microstrip)	378
11.7.4.3	Eingebettete Mikrostreifenleitung (embedded microstrip)	378
11.7.4.4	Symmetrisch geschirmte Streifenleitung (stripline, centered stripline, triplate)	379

11.7.4.5	Doppelte, geschirmte Streifenleitung (dual stripline)	379
11.7.4.6	Asymmetrische, geschirmte Streifenleitung (asymmetric stripline)	380
11.7.4.7	Gekoppelte Mikrostreifenleitung (differential microstrip)	380
11.7.4.8	Gekoppelte, geschirmte Streifenleitung (differential stripline)	381
11.7.5	Einfluss einer kapazitiven Last auf t_{pd} und Z_0	381
11.7.6	Mikrostreifenleitung (microstrip)	382
11.7.6.1	Statische Analyse einer Mikrostreifenleitung	385
11.7.6.2	Dynamische Analyse einer Mikrostreifenleitung	389
11.7.6.3	Synthese einer Mikrostreifenleitung	391
11.7.6.4	Dämpfung der Mikrostreifenleitung	392
11.7.6.5	Frequenzgrenzen der Mikrostreifenleitung	394
11.7.6.6	Mikrostreifenleitung und weitere Bauelemente	394
11.7.7	Koplanare Streifenleitung (CPW = Coplanar Waveguide)	395
11.7.8	Symmetrischer Streifenleiter (stripline)	396
11.7.9	Abgeschirmter symmetrischer Streifenleiter (shielded stripline)	397
11.7.10	Koplanare Zweibandleitung (CPS = Coplanar Strips)	397
11.7.11	Asymmetrische koplanare Zweibandleitung	402
11.7.12	Koplanare Dreibandleitung	402
11.7.13	Koplanare Dreibandleitung mit Massefläche	403
11.7.14	Koplanare Streifenleitung (CPW) mit Berücksichtigung der Leiterdicke	404
11.7.15	Koplanare Streifenleitung (CPW) mit rückseitiger Massefläche	405
11.7.16	Koplanare Streifenleitung mit oberer Masse-Abschirmfläche	405
11.7.17	Kantengekoppelter symmetrischer Streifenleiter (narrow side coupled stripline)	406
11.8	Bauelemente in Microstrip-Technik und Anwendungsbeispiele	407
11.8.1	Rechtwinkliger Leitungsknick	408
11.8.2	Leitungsunterbrechung	410
11.8.3	Leiterbreitenstufe	411
11.8.4	Mikrostreifenleerlauf	411
11.8.5	Beispiele für die Realisierung von Bauelementen und elementaren Schaltungen	413

12	Lichtwellenleiter	415
12.1	Vor- und Nachteile des Lichtwellenleiters	415
12.2	Einsatz von Lichtwellenleitern	416
12.3	Aufbau und Funktionsprinzip des Lichtwellenleiters	417
12.4	Wellenausbreitung im Lichtwellenleiter, Moden, Dispersion	420
12.5	Multimode-Faser	423
12.6	Gradientenfaser	424
12.7	Monomode-Faser	425
12.8	Sende- und Empfangselemente von Lichtwellenleitern	426
12.8.1	Sender von Lichtwellenleitern	426
12.8.2	Empfänger von Lichtwellenleitern	427
12.9	Dämpfung von Lichtwellenleitern	428
12.9.1	Bedeutung der Dämpfung	428
12.9.2	Dämpfung und verwendete Wellenlängen bei Lichtwellenleitern	429
12.10	Verstärker in LWL-Strecken	430
12.11	Verbindungen von Lichtwellenleitern	432
12.11.1	Spleißverbindungen von Lichtwellenleitern	433
12.11.2	Steckverbindungen für Lichtwellenleiter	433
12.11.3	Einflüsse auf die Einfügungsdämpfung	435
12.11.4	Einige Beispiele von Standard-LWL-Steckern	436
12.12	Zusammenfassung	440
13	Hohlleiter	443
13.1	Einsatzgebiete, Vor- und Nachteile von Hohlleitern	443
13.2	Grundsätzlicher Aufbau von Hohlleitern	444
13.3	Wellenfortpflanzung und Wellentypen in Hohlleitern	445
13.4	Rechteckhohlleiter	446
13.5	Rundhohlleiter	452
13.6	Einige Daten von Hohlleitern	454
13.7	Hohlleiterbauelemente	457
13.8	Hohlraumresonator mit Rechteckquerschnitt	458
13.9	Zusammenfassung	460
	Liste verwendeter Formelzeichen	463
	Literatur	467
	Stichwortverzeichnis	471

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, Stereoanlage).

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

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 λ gibt an, welcher Bruchteil ΔN von N Bauelementen im Mittel während eines Zeitintervalls Δt 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, Nennwerte¹ (Bemessungswerte), typische Werte, Garantiewerte, Grenzwerte, Qualitätsdaten, Schaltungsvorschläge. Eine solche Datenzusammenstellung kann enthalten:

¹ 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 φ
 - 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!)

ρ = *spezifischer Widerstand* des Materials (eine temperaturabhängige Materialkonstante, meist als ρ_{20} für Raumtemperatur mit 20 °C angegeben)

l = Länge des Leiters

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

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

Der spezifische Leitwert σ ist der Kehrwert des spezifischen Widerstandes:

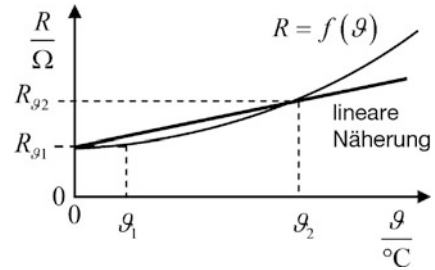
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.2)$$

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 ϑ 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 °C nimmt der Widerstand wieder stärker (nichtlinear) zu. Innerhalb des genannten Temperaturintervalles braucht also i. Allg. in Gl. 2.4 nur mit dem Koeffizienten α 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 ϑ zu $\vartheta_1 = 20\text{ °C}$ gewählt. Bezogen auf $\vartheta_1 = 20\text{ °C}$ ist α_{20} der lineare *Temperaturkoeffizient* (TK) mit der Einheit $\frac{1}{\text{K}}$ oder $\frac{1}{\text{°C}}$, der quadratische TK ist β_{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_{ϑ_2} bei der Temperatur ϑ_2 :

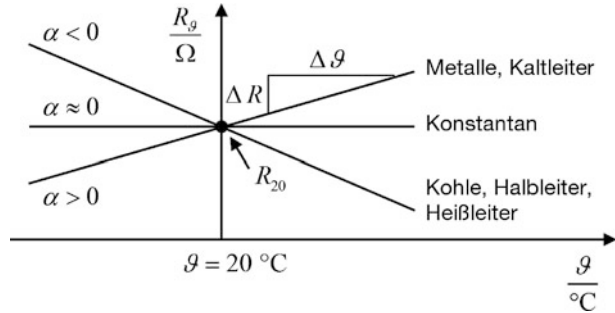
$$R_{\vartheta_2} = R_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} (\vartheta_2 - 20\text{ °C})] \quad (2.6)$$

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

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

R_{20} ist der Bezugswiderstandswert bei 20 °C .

Abb. 2.2 Widerstandsänderung von Materialien je nach Temperaturkoeffizient α



Für Temperaturen ϑ_{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 ϑ_{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 α 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 ρ_{20} und Temperaturkoeffizienten α_{20} und β_{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

Gl. 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** δ (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 δ 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 δ in Abhängigkeit der Frequenz bei einem Kupferleiter

f	60 Hz	10 kHz	1 MHz	100 MHz	10 GHz
δ	8,6 mm	0,67 mm	67 μm	6,7 μm	0,67 μm

δ = Eindringtiefe in m (Meter),

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

σ = spezifische Leitfähigkeit

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

μ_r = Permeabilitätskonstante des Leitermaterials (relative magnetische Permeabilität, Permeabilitätszahl)

Gl. 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 δ 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,

σ = spezifische Leitfähigkeit.

Zur Beurteilung des Wechselstromwiderstandes eines Leiters bei hohen Frequenzen muss zuerst die Eindringtiefe δ 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 Skineffekt:

- 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 ($\emptyset \leq 0,1$ 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 Skineffekt 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 α (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.