
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, Heißeiter	92
5.1.1	Einsatzbereiche des Heißeiters	92
5.1.2	Herstellung von Heißeitern, 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
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	178
8.2.2.1	Elektronenpolarisierung	179
8.2.2.2	Ionenpolarisierung	179
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	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	Masskondensatoren	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
9	Induktivitäten	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	Drahting (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
10	Transformatoren und Übertrager	311
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
11	Elektrische Leitungen	335
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	Leistungsunterbrechung	406
11.8.3	Leiterbreitenstufe	407
11.8.4	Mikrostreifenleiterlauf	407
11.8.5	Beispiele für die Realisierung von Bauelementen und elementaren Schaltungen	409
12	Lichtwellenleiter	411
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 Einfügungsämpfung	431
12.11.4	Einige Beispiele von Standard-LWL-Steckern	432
12.12	Zusammenfassung	436
13	Hohlleiter	439
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
	Liste verwendeter Formelzeichen	459
	Literatur	463
	Sachverzeichnis	467