

Otto Zinke · Hans Seither

Widerstände,
Kondensatoren, Spulen
und ihre Werkstoffe

Zweite, neubearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 275 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York 1982

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XVII
1 Widerstände und ihre Werkstoffe	1
1.1 Spezifischer Widerstand und Temperaturkoeffizient von Metallen, Widerstandslegierungen und Halbleitern	1
1.1.1 Deutung der Leitfähigkeit und Grundbegriffe	1
1.1.1.1 Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes unmagnetischer Metalle	4
1.1.2 Unmagnetische Legierungen mit sehr kleinem Temperaturkoeffizienten	8
1.1.2.1 Anwendung bei Dehnungsmeßstreifen (H. Seither)	9
1.1.3 Temperaturabhängigkeit des Widerstandes reiner ferromagnetischer Werkstoffe	13
1.1.4 Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Halbleitern	14
1.2 Kaltleiter (Leiter mit positivem Temperaturkoeffizienten, PTC-Widerstände)	18
1.2.1 Metallische Kaltleiter	19
1.2.2 Keramische Kaltleiter (DIN 44 080)	19
1.2.2.1 Statische Kennlinien keramischer Kaltleiter	20
1.2.2.2 Anwendungen keramischer Kaltleiter	24
1.3 Heißleiter (Leiter mit negativem Temperaturkoeffizienten, NTC-Widerstände) (DIN 44 070)	27
1.3.1 Meß- und Kompensations-Heißleiter sehr geringer Eigenerwärmung	30
1.3.2 Fremdgeheizte Heißleiter	31
1.3.3 Regelheißleiter, direkt geheizt	32
1.3.4 Anlaßheißleiter mit Eigenerwärmung innerhalb einer vorgeschriebenen Zeit	32
1.4 Erwärmung, Temperaturlgleichgewicht und Wärmewiderstand	33
1.4.1 Erwärmung und Wärmezzeitkonstante	34
1.4.2 Temperaturlgleichgewicht und Leistung	35
1.4.2.1 Wärmeabgabe durch Konvektion und Wärmestrahlung	35
1.4.2.2 Wärmeabgabe durch Wärmeleitung	37
1.4.2.3 Bedeutung des Wärmewiderstandes und seine Messung (F. Kuhn)	40

1.5	Magnetfeldabhängige Bauelemente (Hall-Generatoren, Feldplatten) (H. Seither; O. Zinke)	42
1.5.1	Der Hall-Effekt	42
1.5.2	Hall-Generatoren (H. Seither)	43
1.5.3	Magnetisch steuerbare Widerstände, Feldplatten, kontaktlose Potentiometer und Schalter (H. Seither)	45
1.6	Widerstände mit veränderlichem Leitwert	47
1.6.1	Spannungsabhängige Widerstände (Varistoren)	47
1.6.1.1	Varistoren für Spannungen unter 1 V	48
1.6.1.2	Varistoren für Spannungen über 1 V	49
1.6.1.3	Varistoren für Spannungen über 10 V	52
1.6.2	Lichtempfindliche Widerstände (Photowiderstände)	55
1.7	Frequenzabhängigkeit von Widerständen	56
1.7.1	Einfluß der Blindwiderstände	57
1.7.2	Einfluß der Größe des Widerstandswerts	59
1.7.2.1	Induktivitätsarme Wicklungen für Widerstände kleiner als $200\ \Omega$	60
1.7.2.2	Wicklungen für Widerstände größer als $1\ k\Omega$	61
1.7.3	Abnahme des Wirkwiderstandes bei Widerständen größer als $1\ k\Omega$ durch verteilte Kapazitäten	62
1.7.3.1	Abnahme des Wirkwiderstandes durch Parallelkapazitäten	62
1.7.3.2	Abnahme des Wirkwiderstandes durch Erdkapazitäten	64
1.8	Widerstandserhöhung durch Stromverdrängung (Skineffekt)	66
1.8.1	Ableitung der Beziehung zwischen magnetischer Feldstärke und Stromdichte	68
1.8.1.1	Großer Skineffekt	71
1.8.2	Einfluß der Querschnittsform auf die Stromverteilung in einem Leiter	74
1.9	Supraleitfähigkeit (Skineffekt bei Gleichstrom)	75
1.9.1	Supraleitende Elemente und Verbindungen	78
1.9.2	Anwendungen der Supraleiter	78
1.10	Rauschen von Widerständen	79
1.10.1	Thermisches Rauschen	79
1.10.1.1	Größe der Rauschleistung	79
1.10.1.2	Ersatzschaltungen rauschender Widerstände	80
1.10.2	Stromrauschen	81
1.11	Bauformen und Normen von Widerständen (F. Kuhn; O. Zinke)	83
1.11.1	Feste Drahtwiderstände (DIN 44 185) (F. Kuhn)	84
1.11.1.1	Normen und Allgemeines	84
1.11.1.2	Aufbau von Drahtwiderständen	85
1.11.1.3	Belastbarkeit von Drahtwiderständen	86
1.11.2	Schichtwiderstände (DIN 44 050) (F. Kuhn)	87
1.11.2.1	Normen und Allgemeines	87
1.11.2.2	Kohleschichtwiderstände (DIN 44 051/052/053/055)	88

1.11.2.3 Kohlegemisch-Schichtwiderstände (DIN 44 054)	88
1.11.2.4 Massewiderstände (MIL-R-11)	89
1.11.2.5 Metallschichtwiderstände (DIN 44 061)	89
1.11.2.6 Metalloxidschichtwiderstände (DIN 44 063)	89
1.11.2.7 Metallglasurwiderstände (DIN 44 064)	90
1.11.2.8 Belastbarkeit und Änderungsverhalten	91
1.11.2.9 Ebene Dick- und Dünnschichtwiderstände	93
1.11.3 Veränderbare Widerstände (F. Kuhn)	95
1.11.3.1 Schichtdrehwiderstände und Schiebewiderstände (DIN 41 450, IEC 393 und 190)	95
1.11.3.2 Drahtdrehwiderstände und Spindelwiderstände	96
1.12 Nichtlinearität von Widerständen (F. Kuhn)	96
1.13 Prüfungen an Widerständen und Zuverlässigkeit (F. Kuhn)	97
1.13.1 Elektrische Prüfungen	98
1.13.1.1 Dauerprüfung mit elektrischer Belastung (DIN 44 050/44 185)	98
1.13.1.2 Überlastprüfung bei Schichtwiderständen	98
1.13.1.3 Spannungsprüfung der Isolierung	98
1.13.1.4 Messung des Isolationswiderstands der Isolierung	98
1.13.2 Umweltprüfungen (DIN 40 046 und IEC 68)	98
1.13.3. Zuverlässigkeit und Ausfallverhalten	99
1.13.3.1 Zuverlässigkeit	99
1.13.3.2 Ausfallverhalten	99
1.13.3.3 Prüfung der Zuverlässigkeit	100
1.14 Einige Anwendungsrichtlinien, Auswahl für die Praxis (F. Kuhn)	100
1.14.1 Kohleschichtwiderstände	100
1.14.2 Metallschichtwiderstände	101
1.14.3 Drahtwiderstände	102
1.14.4 Veränderbare Widerstände	102
1.14.5 Impulsbelastbarkeit	102
2 Kondensatoren und Isolierstoffe (dielektrische Werkstoffe)	103
2.1 Kapazität und elektrisches Feld	103
2.1.1 Methoden zur Bestimmung der Kapazität	104
2.1.1.1 Überschlagsrechnung	104
2.1.1.2 Exakte analytische Methoden	104
2.1.1.3 Allgemeine analytische Näherungsmethode (Computer-Methode)	107
2.1.1.4 Graphische Methoden	112
2.1.2 Spezifische Kapazität (Kapazität pro Volumen)	113
2.1.3 Abrundung des Randes und Randfeldstärke	115
2.2 Bauform und Kapazität von Kondensatoren	117
2.2.1 Festkondensatoren	117
2.2.1.1 Wickelkondensatoren und ihre Kontaktierung (U. Grössler; O. Zinke)	117
2.2.1.2 Zylinderkondensatoren	118

2.2.1.3	Topfkondensatoren	120
2.2.1.4	Scheibenkondensatoren (U. Grössler)	120
2.2.1.5	Schichtkondensatoren (U. Grössler)	120
2.2.1.6	Meßkondensatoren (K. Lehner)	120
2.2.1.7	Trimmkondensatoren	123
2.2.2	Drehkondensatoren	124
2.2.2.1	Vergleich der verschiedenen Plattschnitte	126
2.3	Der technische Kondensator	126
2.3.1	Einfluß der Induktivität auf die wirksame Kapazität (Lage der Resonanzfrequenzen)	127
2.3.2	Güte, Verlustfaktor und Ersatzschaltungen	130
2.3.3	Frequenzabhängigkeit des Verlustfaktors und des Scheinwiderstandes (U. Grössler; O. Zinke)	135
2.3.4	Strom- und Spannungsbelastbarkeit bei verschiedenen Frequenzen	138
2.3.5	Impulsbelastbarkeit (U. Grössler)	139
2.4	Die Verluste des Dielektrikums und die komplexe Permittivität	140
2.4.1.	Die Polarisationsverluste	140
2.4.1.1	Polare und nichtpolare Isolierstoffe	140
2.4.1.2	Frequenzabhängigkeit der komplexen Permittivität bei polaren Stoffen (Beziehungen zwischen Permittivitätszahl und Verlustfaktor)	141
2.4.1.3	Temperaturabhängigkeit der komplexen Permittivität	145
2.4.2	Verluste durch ohmsche Leitfähigkeit des Dielektrikums (Beziehung zwischen der Kapazität und dem inneren Isolationswiderstand)	145
2.4.3	Frequenzabhängigkeit der komplexen Permittivitätszahl bei Polarisations- und Leitfähigkeitsverlusten	148
2.5	Gasförmige und flüssige dielektrische Werkstoffe für Kondensatoren	149
2.5.1	Gase als Isolierstoffe	149
2.5.1.1	Preßgas-Kondensatoren	150
2.5.1.2	Vakuum-Kondensatoren	152
2.5.2	Flüssige Isolierstoffe	152
2.5.2.1	Isolieröle	153
2.5.2.2	Isolierflüssigkeiten mit hohem ϵ' und Wasser	153
2.5.2.3	Imprägnier- und Tränkungsmittel (K. Lehner)	155
2.5.2.4	Flüssigkristalle (U. Grössler)	156
2.6	Papier für Kondensatoren	158
2.6.1	Eigenschaften von Kondensatorpapier (K. Lehner)	158
2.6.2	Papier-Kondensatoren (U. Grössler)	158
2.6.3	Metallisierte Papier-Kondensatoren (MP) (U. Grössler)	158
2.7	Kunststoffe für Kondensatoren	159
2.7.1	Celluloseacetat	159
2.7.1.1	Eigenschaften von Celluloseacetat (CA) (K. Lehner)	159
2.7.1.2	MKU-Kondensatoren (U. Grössler)	160

2.7.2	Polystyrol	161
2.7.2.1	Eigenschaften von Polystyrol (PS) (K. Lehner)	161
2.7.2.2	Polystyrolfolie-Kondensatoren (KS) (U. Grössler)	162
2.7.3	Polypropylen	163
2.7.3.1	Eigenschaften von Polypropylen (PP) (K. Lehner)	163
2.7.3.2	Polypropylen-Kondensatoren (KP) (U. Grössler)	164
2.7.3.3	Metallisierte Polypropylen-Kondensatoren (MKP) (U. Grössler)	164
2.7.4	Polyethylenterephthalat	165
2.7.4.1	Eigenschaften von Polyethylenterephthalat (PETP) (K. Lehner)	165
2.7.4.2	Polyethylenterephthalat-Kondensatoren (KT) (U. Grössler)	166
2.7.4.3	Metallisierte Polyethylenterephthalat-Kondensatoren (MKT) (U. Grössler)	166
2.7.5	Polycarbonat	167
2.7.5.1	Eigenschaften von Polycarbonat (PC) (K. Lehner)	167
2.7.5.2	Polycarbonat-Kondensatoren (KC) (U. Grössler)	168
2.7.5.3	Metallisierte Polycarbonat-Kondensatoren (MKC) (U. Grössler)	168
2.7.6	Sonderdielektrika aus Kunststoffen und ihre Anwendung (K. Lehner)	169
2.7.6.1	Polytetrafluorethylen (PTFE)	169
2.7.6.2	Polysulfon (PSU)	170
2.7.6.3	Silicone (SI)	170
2.7.6.4	Polyvinylchlorid (PVC)	171
2.7.6.5	Polyimid (PI)	171
2.7.7	Gehäuse, Vergußmittel und Überzüge für Kondensatoren (U. Grössler; K. Lehner)	172
2.7.7.1	Metallgehäuse	172
2.7.7.2	Kunststoffumhüllungen	173
2.8	Keramik, Glimmer, Quarz und Glas für Kondensatoren	173
2.8.1	Eigenschaften von NDK-Massen ($\epsilon' \leq 200$)	173
2.8.1.1	Gruppe 100. Aluminiumsilicate (Porzellane)	173
2.8.1.2	Gruppe 200. Magnesiumsilicate (Steatite)	174
2.8.1.3	Gruppe 300. Titandioxid-Massen (Rutilhaltige Magnesiumsilicate)	175
2.8.1.4	Gruppe 400. Magnesium-Aluminium-Silicate	176
2.8.1.5	Gruppe 500. Poröse Aluminiumsilicate	176
2.8.1.6	Gruppe 600. Aluminiumoxid-Keramik	176
2.8.1.7	Gruppe 700. Reine Oxidkeramik	176
2.8.1.8	Besondere Silicate	176
2.8.2	Keramik-Kondensatoren der Klasse 1 (NDK) (U. Grössler)	176
2.8.2.1	Rohrkondensatoren	177
2.8.2.2	Scheibenkondensatoren	177
2.8.2.3	Keramik-Vielschichtkondensatoren	181

2.8.3	Eigenschaften von HDK-Massen ($\epsilon' > 200$), Ferroelektrizität (K. Lehner; O. Zinke)	182
2.8.4	Keramik-Kondensatoren der Klasse 2 (HDK) (U. Grössler)	184
2.8.4.1	Scheibenkondensatoren (U. Grössler)	187
2.8.4.2	Vielschichtkondensatoren (U. Grössler)	188
2.8.5	Andere Anwendungen der ferroelektrischen Keramiken (Piezokeramik) (U. Grössler)	189
2.8.6	Sperrsichtkondensatoren (Keramik-Kondensatoren der Klasse 3) (U. Grössler)	189
2.8.7	Eigenschaften von Glimmer (O. Zinke)	190
2.8.8	Glimmer-Kondensatoren (U. Grössler)	191
2.8.9	Eigenschaften von Quarz und Gläsern für Kondensatoren (O. Zinke)	192
2.8.9.1	Quarz	192
2.8.9.2	Gläser	192
2.8.10	Glas-Kondensatoren (U. Grössler)	193
2.9	Elektrolyt-Kondensatoren (U. Grössler)	193
2.9.1	Eigenschaften von Metalloxiden (Al_2O_3 und Ta_2O_5)	194
2.9.2	Nasse Elektrolyt-Kondensatoren	194
2.9.2.1	Nasse Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren	194
2.9.2.2	Nasse Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren	201
2.9.3	Trockene Elektrolyt-Kondensatoren	201
2.9.3.1	Trockene Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren	201
2.9.3.2	Trockene Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren	205
2.10	Prüfungen an Kondensatoren und Zuverlässigkeit (U. Grössler)	206
2.10.1	Elektrische Messungen und Prüfungen	207
2.10.1.1	Messung der Kapazität	207
2.10.1.2	Verlustfaktor	207
2.10.1.3	Isolationswiderstand	208
2.10.1.4	Reststrom	208
2.10.1.5	Scheinwiderstand	208
2.10.1.6	Induktivität (nach IEC 384-5)	208
2.10.1.7	Temperaturabhängigkeit der Kapazität	209
2.10.1.8	Spannungsprüfung	209
2.10.1.9	Feuchte-Wärme-Prüfung	209
2.10.1.10	Dauerspannungsprüfung	209
2.10.1.11	Lade- und Entladeprüfung und Spitzenspannungsprüfung	210
2.10.2	Zuverlässigkeit und typisches Ausfallverhalten	211
2.11	Anwendungsrichtlinien für Kondensatoren (U. Grössler)	214
2.11.1	Auswahlkriterien für die Praxis	214
2.11.2	Kapazitätsbereiche bei Kondensatoren	215
3	Spulen, Übertrager und magnetische Werkstoffe	217
3.1	Grundbeziehungen für die Induktivität	217

3.1.1 Spule und Kondensator als duale Schaltelemente	219
3.1.2 Kapazitätsbelasteter Gyrator als Induktivität	220
3.2 Induktivität einfacher Leiterformen	223
3.2.1 Induktivität der Koaxialleitung	223
3.2.2 Induktivität der Streifenleitung (Bandleitung, Bifilarband)	224
3.2.3 Induktivität der Doppelleitung aus Runddrähten	224
3.2.4 Induktivität eines Drahtringes	225
3.2.5 Induktivität und Gegeninduktivität von zwei koaxialen Kreisringen	228
3.2.6 Zwei Windungen bzw. Spulen mit homogenem Axialfeld (Helmholtz-Spulenpaar)	230
3.2.7 Spulen mit drei Windungen	231
3.2.8 Induktivität von enggewickelten Zylinder- und Flachspulen	232
3.2.9 Spezifische Induktivität. Optimale einlagige Zylinderspulen	235
3.2.10 Optimale Spulen mit quadratischem Wickelraum	238
3.2.11 Spulen mit geringem Außenfeld	239
3.2.11.1 Toroidspulen (Ringkernspulen)	240
3.3 Spulen mit magnetischem Kern (R. Hörndlein; O. Zinke)	243
3.3.1 Blechkerne für den Niederfrequenzbereich	243
3.3.1.1 Geschichtete Blechkerne	244
3.3.1.2 Geklebte Kernblechpakete (R. Hörndlein)	244
3.3.2 Gewickelte Bandkerne aus hochpermeablem Material	245
3.3.3 Eisenpulverkerne mit Isolierstoff	246
3.3.4 Ferritkerne	247
3.3.5 Verminderung und Linearisierung der Permeabilität durch Luftspalte	248
3.3.6 Abgleichbare Spulenkerne (R. Hörndlein)	250
3.3.7 Festinduktivitäten (HF-Drosselspulen) (R. Hörndlein)	253
3.4 Eigenschaften technischer Spulen (R. Hörndlein; O. Zinke)	254
3.4.1 Einfluß der Eigenkapazität	254
3.4.1.1 Resonanzwellenlänge von Flach- und Zylinderspulen	256
3.4.2 Einfluß der Verluste	257
3.4.3 Belastbarkeit von technischen Spulen	260
3.4.4 Übertrager-Ersatzschaltbilder (R. Hörndlein)	261
3.4.5 Einfluß des Streuflusses beim Übertrager; Streuinduktivität (R. Hörndlein)	265
3.4.5.1 Übertrager mit getrennten Wicklungen	265
3.4.5.2 Angezapfte Spule (Spartransformator)	270
3.4.6 Lebensdauer und Zuverlässigkeit technischer Spulen (R. Hörndlein)	274
3.5 Eigenschaften des Kernmaterials	280
3.5.1 Einteilung der Stoffe nach magnetischen Eigenschaften	280
3.5.1.1 Magnetisch neutrale Stoffe	280
3.5.1.2 Diamagnetismus	281
3.5.1.3 Paramagnetismus	282
3.5.1.4 Ferromagnetismus	283

3.5.1.5 Antiferromagnetismus	287
3.5.1.6 Ferrimagnetismus	289
3.5.1.7 Metamagnetismus	290
3.5.2 Ferromagnetische Stoffe in Wechselfeldern, komplexe Permeabilität	291
3.5.2.1 Wirbelströme	292
3.5.2.2 Hysterese	296
3.5.2.3 Magnetische Nachwirkung	301
3.5.2.4 Resonanzerscheinungen	303
3.5.2.5 Trennung der Verlustanteile (R. Hörndlein)	306
3.6 Magnetische Werkstoffe (R. Hörndlein; O. Zinke)	307
3.6.1 Magnetisch weiche Werkstoffe mit kleinen Ummagnetisierungsverlusten	308
3.6.1.1 Ferromagnetische Werkstoffe (Metalllegierungen) (R. Hörndlein)	308
(a) Eisen-Silicium-Legierungen	312
(b) Eisen-Nickel-Legierungen	312
(c) Sonstige Legierungen	314
(d) Amorphe Metalle	314
3.6.1.2 Ferrimagnetische Werkstoffe (Metallmischoxide)	315
(a) Mangan-Zink-Ferrite (R. Hörndlein)	318
(b) Nickel-Zink-Ferrite (R. Hörndlein)	318
(c) Hexagonale Ferrite (R. Hörndlein)	318
3.6.1.3 Legierungen nichtferromagnetischer Metalle	319
3.6.2 Magnetisch weiche Werkstoffe mit rechteckiger Hystereseschleife	319
3.6.2.1 Ferromagnetische Legierungen	320
3.6.2.2 Ferrimagnetische Werkstoffe	320
3.6.3 Magnetisch harte Werkstoffe für permanente magnetische Felder (Dauermagnetworkwerkstoffe)	321
3.6.3.1 Ferromagnetische Legierungen	321
3.6.3.2 Ferrimagnetische Werkstoffe	322
3.6.3.3 Legierungen nichtferromagnetischer Metalle	322
Anhang. Grundlagen der Zuverlässigkeitssanalyse und -synthese (A. Vlcek)	323
1. Begriffsbestimmungen	323
2. Zuverlässigkeitssanalyse und -synthese	326
3. Ermittlung von Zuverlässigkeitsparametern	329
Literatur	331
Kapitel 1. Widerstände und ihre Werkstoffe	331
Kapitel 2. Kondensatoren und Isolierstoffe (dielektrische Werkstoffe)	333
Kapitel 3. Spulen, Übertrager und magnetische Werkstoffe	338
Anhang. Grundlagen der Zuverlässigkeitssanalyse und -synthese	340
Sachverzeichnis	342