

Helmut Katzier

Elektrische Kabel und Leitungen

Technologien, Anwendungen und Anforderungen



ERNI - Ihr Partner im
Bereich Steckverbinder
und Kabelkonfektion.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	17
2 Konstruktive Basiskomponenten.....	22
2.1 Elektrischer Leiter.....	24
2.1.1 Materialien	24
2.1.2 Leiteraufbau und -geometrie	25
2.1.3 Massiver Einzeleiter	26
2.1.4 Verseilte Leiter	27
2.1.4.1 Bündellitze	27
2.1.4.2 Konzentrische, kreisförmige Leiter	28
2.1.4.3 Verseilung/Verdrillung der Leiter	28
2.1.5 Verdichtete Leiter	31
2.1.6 Hohlleiter.....	32
2.1.7 Millikenleiter.....	33
2.1.8 Leiter mit innerer Leitschicht	33
2.1.9 Beschichtete Leiter	35
2.1.10 Lahnleiter	36
2.1.11 Kupferlackdraht.....	36
2.1.12 Widerstandsleiter.....	36
2.1.13 Normen und Kennzeichnungen	37
2.2 Aderisolierung.....	41
2.2.1 Materialien	41
2.2.2 Bauformen und Geometrie	43
2.3 Kennzeichnung der Adern.....	45
2.4 Verseilen der Adern	49
2.5 Füllelemente und Füllmittel	50
2.6 Gemeinsame Aderumhüllung.....	51
2.7 Flexible Trennschicht	51

2.8	Elektrische Schirmung	52
2.8.1	Materialien	53
2.8.2	Bauformen und Geometrie	54
2.8.2.1	Schirmung aus Metallgeflechten und Metallfolien	55
2.8.2.2	Magnetische Schirmung	57
2.8.2.3	Massive Metallmäntel	57
2.8.2.4	Äußere Leitschicht	59
2.8.2.5	Verdrillung	59
2.8.2.6	Beidraht	60
2.8.2.7	Querleitwendel	61
2.9	Schutzhüllen	61
2.10	Bewehrung/Armierung	61
2.11	Öffnungshilfen	63
2.12	Mantel	63
2.13	Kabelkennzeichnung	66
3	Materialien und Werkstoffe	68
3.1	Metallische Werkstoffe	68
3.1.1	Kennwerte	69
3.1.2	Schmelztemperatur	71
3.1.3	Temperaturkoeffizient der Länge	72
3.1.4	Wärmeleitfähigkeit	72
3.1.5	Wärmekapazität	73
3.1.6	Spezifische Wärmekapazität	74
3.1.7	Wärmespeicherzahl	75
3.1.8	Dichte	75
3.1.9	Elastizitätsmodul	76
3.1.10	Elastizitätsgrenzen	79
3.1.11	Streckgrenze	80
3.1.12	Dehngrenze	80
3.1.13	Zugfestigkeit	81
3.1.14	Gleichmaßdehnung	81
3.1.15	Bruchdehnung	82
3.1.16	Federbiegegrenze	83
3.1.17	Biegeweichselfestigkeit	83
3.1.18	Härte	84
3.1.19	Elektrische Leitfähigkeit und spezifischer Widerstand	85

3.1.20	Temperaturkoeffizient der Leitfähigkeit	86
3.1.21	Magnetische Eigenschaften.....	87
3.1.22	Kupfer.....	87
3.1.23	Kupferlegierungen.....	90
3.1.23.1	Messing	90
3.1.23.2	Bronze	92
3.1.23.3	Neusilber	94
3.1.24	Aluminium	94
3.1.24.1	Aldrey.....	96
3.1.25	Silber	97
3.1.26	Gold.....	99
3.1.27	Zinn	100
3.1.28	Nickel	102
3.1.29	Zink	103
3.1.30	Blei	104
3.1.31	Eisen	105
3.1.32	Stahl.....	106
3.2	Elektrisch isolierende Materialien.....	107
3.2.1	Füllstoffe	113
3.2.2	Weichmacher	113
3.2.3	Stabilisatoren.....	113
3.2.4	Kennwerte für Kunststoffe.....	114
3.2.4.1	Schmelztemperatur.....	115
3.2.4.2	Glasübergangstemperatur	115
3.2.4.3	Betriebstemperatur	117
3.2.4.4	Wärmeformbeständigkeit.....	118
3.2.4.5	Längendehnkoeffizienten.....	119
3.2.4.6	Schwindung.....	120
3.2.4.7	Fließfähigkeit.....	121
3.2.4.8	Dichte	121
3.2.4.9	Bestimmung der mechanischen Kennwerte	122
3.2.4.10	Elastizitätsmodul	123
3.2.4.11	Streckspannung und Streckdehnung	125
3.2.4.12	Bruchspannung und Bruchdehnung	125
3.2.4.13	Härte	125
3.2.4.14	Spannungsfestigkeit und Durchschlagsfestigkeit.....	126

3.2.4.15	Spezifischer elektrischer Durchgangswiderstand	126
3.2.4.16	Spezifischer Oberflächenwiderstand	128
3.2.4.17	Kriechstromfestigkeit	129
3.2.4.18	Relative Dielektrizitätskonstante	130
3.2.4.19	Dielektrischer Verlustfaktor.....	135
3.2.4.20	Brandbeständigkeit.....	136
3.2.4.21	Wasser- und Feuchtigkeitsaufnahme	139
3.2.4.22	Umweltbeständigkeit.....	139
3.2.4.23	Kunststoffeigenschaften	141
3.2.5	Thermoplaste.....	142
3.2.5.1	Polyvinylchlorid weich (PVC).....	142
3.2.5.2	Polystyrol (PS).....	144
3.2.5.3	Polycarbonat (PC).....	146
3.2.5.4	Polyethylen (PE)	147
3.2.5.5	Polybutylenterephthalat (PBT)	149
3.2.5.6	Polypropylen (PP).....	151
3.2.5.7	Polyamide (PA).....	152
3.2.5.8	Polyvinylidenfluorid (PVDF)	156
3.2.5.9	Polyfluorethylenpropylen (FEP)	157
3.2.5.10	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE).....	158
3.2.5.11	Perfluoralkoxylalkan (PFA)	159
3.2.5.12	Polyetherertherketon (PEEK)	161
3.2.5.13	Polytetrafluorethylen (PTFE).....	162
3.2.6	Thermoplastische Elastomere (TPE).....	164
3.2.6.1	Polyurethane (PUR).....	164
3.2.6.2	Copolyamide (TPA).....	166
3.2.6.3	Copolyester (TPC).....	166
3.2.6.4	Olefin-TPE (TPO)	167
3.2.6.5	Polystyrol-Elastomere (TPS).....	168
3.2.7	Elastomere	170
3.2.7.1	Vernetztes Polyethylen (VPE)	170
3.2.7.2	Ethylen-Vinylacetat-Copolymere (EVA).....	171
3.2.7.3	Kautschuke	172
3.2.7.3.1	R-Kautschuke.....	173
3.2.7.3.2	M-Kautschuke	173
3.2.7.3.3	Q-Kautschuke.....	174
3.2.8	Papiere	175

4 Elektrische Eigenschaften	177
4.1 Zeitbereich	178
4.1.1 Zeitkonstante Beschreibung	178
4.1.1.1 Powerintegrität.....	178
4.1.2 Zeitkontinuierliche Beschreibung	181
4.1.3 Zeitdiskrete Beschreibung.....	181
4.1.3.1 Signalintegrität	183
4.1.3.2 Augendiagramme	185
4.1.3.3 Harmonische Beschreibung.....	189
4.2 Frequenzbereich.....	190
4.2.1 Frequenzbänder	190
4.2.2 Streuparameter	191
4.2.2.1 Streuparameter des Zweileitersystems	195
4.2.3 Tief-, Hoch- und Bandpass.....	202
4.2.4 Bandbreite	203
4.3 Zusammenhang zwischen Frequenz und Zeitbereich	205
4.4 Elektromagnetische Felder.....	206
4.5 Strom.....	210
4.5.1 Stromfluss durch den Leiter.....	212
4.5.1.1 Strombelastbarkeit.....	213
4.5.2 Stromfluss durch den Isolator.....	215
4.5.3 Stromfluss auf der Isolatoroberfläche.....	216
4.6 Spannung.....	218
4.6.1 Spannungsfestigkeit.....	220
4.7 Leistung.....	223
4.8 Widerstände.....	226
4.8.1 Gleichstromwiderstand.....	227
4.8.2 Isolationswiderstand.....	229
4.8.2.1 Gleichstromwiderstand.....	229
4.8.2.2 Frequenzabhängiger Isolationswiderstand	230
4.8.3 Skin-Effekt-Widerstand.....	231
4.8.4 Proximity-Widerstand	234
4.8.5 Kapazitiver Widerstand	237
4.8.6 Induktiver Widerstand	244
4.8.7 Dämpfung und Phasenmaß.....	251
4.8.7.1 Dämpfung.....	253
4.8.7.2 Phasenmaß und Phasengeschwindigkeit	255

4.8.8	Impedanz	255
4.8.8.1	Impedanzanpassung	259
4.8.8.2	Impedanzprofil	260
4.8.8.3	Impedanz bei einer Einzelleiterübertragung.....	261
4.8.8.4	Impedanzen bei einer Zweileiterübertragung	263
4.8.8.5	Symmetrischer Betrieb	264
4.8.8.6	Unsymmetrischer Betrieb.....	268
4.8.8.7	Symmetrischer und unsymmetrischer Betrieb.....	270
4.9	Reflexion	274
4.9.1	Zeitbereich.....	275
4.9.2	Frequenzbereich	276
4.9.3	Reflexion im Zweileitersystem.....	278
4.10	Transmission	282
4.10.1	Zeitbereich.....	282
4.10.2	Frequenzbereich	284
4.10.3	Transmission im Zweileitersystem.....	285
4.11	Nebensprechen	287
4.11.1	Internes Nebensprechen	288
4.11.1.1	Leiteranordnungen mit querhomogenem Isolations- medium.....	289
4.11.1.2	Leiteranordnungen mit querinhomogenem Isolations- medium.....	293
4.11.2	Externes Nebensprechen	298
4.11.2.1	Leiteranordnungen mit querhomogenem Isolations- medium.....	298
4.11.2.2	Leiteranordnungen mit querinhomogenem Isolations- medium.....	304
4.11.3	Definitionen für das Nebensprechen im Zeitbereich	305
4.11.3.1	Externes Nahnebensprechen im Zweileitersystem	306
4.11.3.2	Externes Fernnebensprechen im Zweileitersystem	308
4.12	Ausbreitungsgeschwindigkeiten und Laufzeiten	310
4.12.1	Laufzeiten in Zweileitersystemen.....	311
4.13	Elektromagnetische Verträglichkeit	313
4.13.1	Elektromagnetische Materialeigenschaften.....	315
4.13.1.1	Permittivität	315
4.13.1.1.1	Dielektrikum	317
4.13.1.2	Permeabilität.....	318

4.13.2	Elektromagnetische Verkopplungen	320
4.13.2.1	Galvanische Verkopplung.....	320
4.13.2.2	Kapazitive Verkopplung	322
4.13.2.3	Induktive Verkopplung	323
4.13.2.4	Verkopplung bei Hochfrequenzfeldern	325
4.13.3	Bezugspotenziale.....	325
4.13.4	Erdschleifen.....	327
4.13.5	Schirmfaktor und Schirmdämpfung.....	328
4.13.6	Transferimpedanz.....	330
4.13.7	Transferadmittanz.....	333
4.13.8	Schirmwirkung der Materialeigenschaften	334
4.13.9	Beeinflussung elektromagnetischer Wellen durch eine Schirmwand	335
4.13.9.1	Absorptionsdämpfung	337
4.13.9.2	Reflexionsdämpfung.....	338
4.13.9.3	Fernfeldreflexionsdämpfung.....	339
4.13.9.4	Nahfeldreflexionsdämpfung	340
4.13.9.4.1	Elektrische Nahfeldreflexionsdämpfung.....	340
4.13.9.4.2	Magnetische Nahfeldreflexionsdämpfung	341
4.13.9.5	Vergleich der Nah- und Fernfeldreflexionsdämpfung	342
4.13.9.6	Mehrachtreflexionen	343
4.13.10	Schirmungsmaßnahmen	345
4.13.10.1	Schirmmaterial	345
4.13.10.2	Dicke des Schirmungsmaterials	345
4.13.10.3	Störung der Schirmströme.....	346
4.13.10.4	Schirmungskonstruktion	347
4.13.10.5	Leitungsführung	351
4.13.10.6	Schirmanschluss, Leitungsführung und Erdung.....	352
4.13.10.7	Schirmung der Kabelanschlusselemente	357
4.14	Übertragungssysteme	358
4.14.1	Energieübertragung	359
4.14.2	Signalübertragung	360
4.14.2.1	Ethernet	371
4.14.2.2	Feldbusse	375
4.15	Elektrische Messungen.....	388
4.15.1	Streuparamettermessungen.....	388
4.15.2	TDR-Messmethode	392
4.15.3	Messung der Schirmungseigenschaften	398

4.16	Berechnung der elektrischen Eigenschaften	402
4.16.1	Analytische Berechnungen.....	402
4.16.2	Netzwerksimulatoren.....	403
4.16.2.1	Simulation von verlustbehafteten Einzelleitungen	404
4.16.2.2	Simulation von mehrfach verkoppelten Leitern	407
4.16.3	Feldberechnungsmethoden	409
5	Mechanische Eigenschaften	411
6	Umwelt	414
7	Kabelherstellung	422
8	Kabelanschlüsse	428
8.1	Elektrischer Kontakt.....	430
8.2	Kontaktverbindungstechnologien.....	437
8.2.1	Wickeln.....	437
8.2.2	Löten.....	438
8.2.3	Schweißen.....	438
8.2.4	Schrauben	439
8.2.5	Federklemmen	439
8.2.6	Crimpen	440
8.2.6.1	Crimpanschlusselement.....	442
8.2.6.2	Crimpvorgang.....	443
8.2.6.3	Isolierhülsen	450
8.2.6.4	Prüfung der Crimpverbindung.....	451
8.2.6.5	Crimpen im Feld.....	454
8.2.6.6	Aluminium-Crimpen	454
8.2.7	Schneidklemmen	455
8.2.8	Piercing.....	460
8.2.9	Abisolierung und Abmantelung.....	461
8.2.10	Gehäuse	461
8.2.10.1	Gehäusematerialien	462
8.2.10.2	Schutzarten	463
8.2.11	Kontaktisolierung	464
8.2.12	Dichtungen	466
8.2.13	Kabelverschraubung.....	466
8.2.14	Kabelgarnituren.....	470

9 Normung und Standards	471
9.1 Normen	472
9.2 Standards und Spezifikationen	480
9.3 Richtlinien	481
9.4 Patente	482
10 Qualifizierung	483
10.1 Brandverhalten	486
11 Kabel- und Leitertypen	490
11.1 Klassifizierung nach der Bauform.....	490
11.1.1 Bandleitung	490
11.1.2 Doppelleitung	493
11.1.2.1 Sternvierer/Twisted-Quad.....	495
11.1.3 Koaxialkabel.....	496
11.1.3.1 Bauform.....	496
11.1.3.2 Rigid-Koaxialkabel.....	499
11.1.3.3 RG-Koaxialkabel.....	499
11.1.3.4 Wellmantelkabel.....	500
11.1.3.5 Strahlende Kabel	501
11.1.4 Triaxialkabel.....	501
11.1.5 Twinaxialkabel.....	502
11.1.6 Twisted-Pair-Kabel	503
11.1.7 Hybridkabel	507
11.1.8 Kabelbäume.....	508
11.1.9 Miniaturkabel	509
11.1.10 Kraftfahrzeug-Leitungssätze	509
11.1.11 Konfektionierte Kabel	510
11.2 Klassifizierung nach der Signalübertragung	511
11.2.1 Fernmeldekabel	511
11.2.1.1 Fernkabel	512
11.2.1.2 Ortsverbindungskabel.....	513
11.2.1.3 Teilnehmeranschlussleitung	514
11.2.1.4 Fernmeldeleitung	514
11.2.2 Netzwerkkabel.....	515
11.2.3 Steuerleitungen.....	517
11.2.4 Messkabel.....	519

11.2.5	Hochfrequenzkabel.....	519
11.2.6	Audio- und Video-Kabel	520
11.2.7	Anschlussleitungen.....	521
11.2.8	Installationsleitungen	522
11.3	Klassifizierung nach der Energieübertragung	522
11.3.1	Freileitung	523
11.3.2	Hochspannungskabel.....	523
11.3.3	Mittelspannungskabel.....	525
11.3.4	Niederspannungskabel	526
11.3.5	Installationskabel.....	526
11.3.6	Anschlussleitung	530
11.3.7	Kleinspannungsleitungen	530
11.4	Klassifizierung nach den Umgebungsanforderungen	531
11.5	Klassifizierung nach der mechanischen Flexibilität.....	534
11.6	Klassifizierung nach Normen, Standards und Zertifizierung.....	535
12	Glossar für Kabel und Leitungen	537
13	Literaturverzeichnis	547
14	Abkürzungsverzeichnis	550
14.1	Formelzeichen und Symbole	550
14.2	Abkürzungen.....	556
15	Stichwortverzeichnis.....	566
	Inserentenverzeichnis.....	579