

# Inhaltsverzeichnis

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

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

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

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

<b>9 Normung und Standards .....</b>	471
9.1 Normen .....	472
9.2 Standards und Spezifikationen .....	480
9.3 Richtlinien .....	481
9.4 Patente .....	482
<b>10 Qualifizierung .....</b>	483
10.1 Brandverhalten .....	486
<b>11 Kabel- und Leitertypen .....</b>	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
<b>12</b>	<b>Glossar für Kabel und Leitungen .....</b>	<b>537</b>
<b>13</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>547</b>
<b>14</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>550</b>
14.1	Formelzeichen und Symbole.....	550
14.2	Abkürzungen.....	556
<b>15</b>	<b>Stichwortverzeichnis.....</b>	<b>566</b>
<b>Inserentenverzeichnis.....</b>		<b>579</b>