

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Umfang der Störungsbetrachtung</b>	<b>17</b>
1.1	Die Funkstörungen	17
1.2	Die elektromagnetische Verträglichkeit - EMV	18
1.2.1	Begründung	18
1.2.2	EMV-Begriffe und deren Inhalte	19
1.2.2.1	Elektromagnetische Verträglichkeit, Funktionsstörung, Störgröße	19
1.2.2.2	Störfestigkeit, Verträglichkeitspegel	20
1.2.2.3	Intersystem, Intrasystem	21
1.2.2.4	Elektromagnetische Interferenz und Suszeptibilität	21
1.2.3	Störquellen, Störsenken, Kopplungswege	22
1.2.4	Die EMV-Analyse	24
1.2.4.1	Theoretische EMV-Analyse	24
1.2.4.2	Der EMV-Funktionstest	29
1.3	Physikalische Größen und Betrachtungstoleranzen	30
1.3.1	Die betrachteten physikalischen Größen	30
1.3.2	Die Darstellung und Umrechnung der Einheiten	30
1.3.3	Die Genauigkeit der erfaßten Größen	31
1.4	Zusammenfassung	31
<b>2</b>	<b>Die Kopplungsmechanismen und ihre gegenseitige Abgrenzung</b>	<b>33</b>
2.1	Der Mechanismus der Störungskopplung	33
2.1.1	Die Kopplungsimpedanz	33
2.1.2	Dynamische und quasistationäre Signalverteilung	35
2.1.2.1	Die Bedeutung der Wellenlänge	35
2.1.2.2	Die Ermittlung der Wellenlänge	36
2.1.2.3	Die Systematik der Kopplungsmechanismen	37
2.2	Die galvanische Kopplung	38
2.2.1	Wirkungsweise	39
2.2.2	Der Gleichstromwiderstand	40
2.2.3	Der Skineffekt und Proximityeffekt	42
2.2.4	Die Selbstinduktivität von Leitungen	47

2.2.4.1	Mechanismus .....	47
2.2.4.2	Konkrete Induktivitätswerte .....	48
2.3	Quelle und Senke nahe zusammenliegend. ....	52
2.3.1	Die kapazitive Kopplung .....	52
2.3.1.1	Das elektrische Feld und die Kapazität .....	52
2.3.1.2	Die bildenden Größen einer Kapazität .....	56
2.3.1.3	Kapazitäten von speziellen Leitungsanordnungen .....	58
2.3.1.4	Die kapazitive Kopplung von Störungen .....	61
2.3.2	Die induktive Kopplung .....	64
2.3.2.1	Mechanismus und Grundgesetze .....	64
2.3.2.2	Mechanismus der Störungskopplung .....	66
2.3.2.3	Gegeninduktivität von typischen Anordnungen .....	68
2.3.2.4	Wirkung der induktiven Störungskopplung .....	71
2.3.2.5	Abstandsabhängigkeit .....	73
2.3.2.6	Dipole .....	74
2.3.3	Die Wellenleiterkopplung .....	75
2.3.3.1	Der Wellenwiderstand von Leitungen .....	75
2.3.3.2	Der Wellenwiderstand von typischen Anordnungen .....	77
2.3.3.3	Der Kopplungsmechanismus .....	79
2.4	Die Strahlungskopplung .....	81
2.4.1	Grundgesetze der Strahlung .....	81
2.4.1.1	Hertzscher Dipol und magnetischer Elementarstrahler .....	82
2.4.1.2	Das elektromagnetische Fernfeld .....	83
2.4.1.3	Das elektromagnetische Nahfeld .....	86
2.4.2	Das Strahlungsfeld von Leitungen .....	88
2.4.2.1	Strom- und Spannungsstrahler .....	88
2.4.2.2	Das Reziprozitätsgesetz .....	91
2.4.2.3	Transversal-Elektromagnetische (TEM) Wellenleiter .....	92
2.4.3	Durch Felder erzeugte Spannung .....	93
2.4.3.1	Spannung bei gegebenem Feld .....	93
2.4.3.2	Das wirkende Feld .....	97
2.4.4	Das Babinet'sche Prinzip .....	99
2.5	Kopplungseigenschaften von Quelle und Senke .....	100
2.5.1	Kopplungsrelevante Strukturierung .....	100
2.5.1.1	Symmetrische und asymmetrische Stromkreise .....	100
2.5.1.2	Symmetrische, unsymmetrische, asymmetrische Störkomponenten ....	101
2.5.2	Ermittlung der überkoppelnden Störspannung .....	103
2.5.2.1	Abhängigkeit vom Abgriffspunkt der koppelnden Leitungen .....	104
2.5.2.2	Kopplung bei asymmetrischen Stromschleifen .....	107
2.5.2.3	Kopplung bei symmetrischen Stromschleifen .....	107
2.5.3	Die Störungen über das Versorgungsnetz .....	109
2.5.3.1	Störspannungsarten und Kopplungswege .....	109
2.5.3.2	Die Impedanz von Netzleitungen .....	110
2.6	Zusammenfassung .....	112

<b>3</b>	<b>Störquellen; Messung und Bewertung der erzeugten Störungen</b> .....	114
3.1	Spektralkomponenten eines Signals in der Zeitdarstellung .....	114
3.1.1	Die Fourier-Transformation von periodischen Zeitfunktionen .....	115
3.1.2	Fourier-Transformation einer nichtperiodischen Zeitfunktion .....	120
3.1.2.1	Allgemeine Darstellung .....	120
3.1.2.2	Transformation spezieller Funktionen .....	121
3.1.2.3	Grafische Transformation .....	124
3.2	Störquellen .....	129
3.2.1	Die Systematik von Störquellen .....	129
3.2.2	Allgemeine Störquellen .....	130
3.2.2.1	Spannungen als Störer .....	130
3.2.2.2	Ströme als Störer .....	131
3.2.2.3	Breitbandige Schwingungen .....	132
3.2.2.4	Homogene Schwingungen .....	134
3.2.3	Spezielle Störquellen .....	135
3.2.3.1	Übersicht .....	135
3.2.3.2	Erzeuger von Stromflußänderungen .....	136
3.2.3.3	Störungen durch Stromunterbrechung bei induktiven Lasten .....	140
3.2.3.4	Störungsarten auf der Netzleitung .....	144
3.2.3.5	Störungen durch elektrostatische Entladungen .....	149
3.2.3.6	Störungen durch Blitzüberschlag (LEMP) .....	151
3.2.3.7	Störungen durch den nuklearen elektromagnetischen Puls (NEMP) .....	155
3.2.3.8	Die Thermospannung .....	156
3.2.4	Beispiele für komplexe Störquellen .....	157
3.2.4.1	Der Rechner als Quelle und Senke für Störungen .....	157
3.2.4.2	Störquellen in Kraftfahrzeugen .....	160
3.3	EMV-Normung .....	162
3.3.1	Klassifizierung der Normen .....	162
3.3.2	Grenzwerte der Emission .....	166
3.3.2.1	Störspannungsgrenzwerte auf Leitungen für 10 kHz bis 30 MHz ...	166
3.3.2.2	Strahlungsgrenzwerte für Breitbandstörungen .....	171
3.3.2.3	Strahlungsgrenzwerte für monochromatisch erzeugte Schwingungen	172
3.3.2.4	Strahlungsgrenzwerte für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren .....	175
3.3.3	Vorgabe der Störfestigkeit .....	175
3.3.3.1	Störfestigkeit von Meß-, Steuer- und Regeleinrichtungen .....	176
3.3.3.2	Störfestigkeitswerte in der Unterhaltungselektronik .....	179
3.3.3.3	Störfestigkeit von Signalen für die menschliche Kommunikation ...	182
3.3.4	Gesetzliche Grundlagen .....	186
3.3.4.1	Das Fernmeldeanlagengesetz .....	186
3.3.4.2	Das Hochfrequenz-Geräte-Gesetz .....	187
3.3.4.3	Das Funkstörgesetz .....	188
3.3.4.4	Das "EMV-Gesetz" .....	189
3.3.4.5	Weitere Gesetze .....	190
3.4	Die meßtechnische Erfassung .....	190
3.4.1	Vielfalt der Meßgrößen .....	191

3.4.2	Meßgeräte, Meßverfahren .....	192
3.4.2.1	Messung von Störungen am Versorgungsnetz .....	192
3.4.2.2	Messung einmaliger Ereignisse (Transienten) .....	193
3.4.2.3	Messung von periodischen Ereignissen .....	197
3.4.2.4	Messung von elektrostatischen Feldern .....	203
3.4.3	Antennen, Sonden, Abtaster .....	204
3.4.3.1	Tastköpfe .....	204
3.4.3.2	Schnüffelsonden, Meßwandlerzangen .....	207
3.4.3.3	Antennen .....	210
3.4.4	Messung und Simulation von EMV-Störungen .....	217
3.4.4.1	Geräte zur Störungssimulation .....	217
3.4.4.2	Rechnersimulation von Störeinflüssen .....	220
3.4.4.3	TEM-Zellen/Meßkabinen .....	222
3.4.4.4	Belastung durch den Meßabgriff .....	224
3.5	Zusammenfassung .....	225
<b>4</b>	<b>Die Wirkung von Störsignalen an der Störsecke .....</b>	<b>227</b>
4.1	Auswirkungen auf die Bauelemente .....	227
4.2	Bestimmungsgrößen für die Störfestigkeit .....	230
4.2.1	Störfestigkeit bei analogen Signalen .....	230
4.2.1.1	Funktionsziele analoger Signale .....	230
4.2.1.2	Meßsignale bei linearer Störungseinwirkung .....	232
4.2.1.3	Störungen an nichtlinearen Kennlinien .....	233
4.2.2	Störfestigkeit bei digitalen Signalen .....	236
4.2.2.1	Logikfamilien und ihre Spannungspegel .....	238
4.2.2.2	Pegel und Störspannungsabstände der TTL-Familien .....	239
4.2.2.3	Pegel und Störspannungsabstände der CMOS-Familien .....	246
4.2.2.4	Pegel und Störspannungsabstände der ECL-Familien .....	250
4.3	Maßnahmen zur Verbesserung der Störfestigkeit .....	252
4.3.1	Allgemeine Maßnahmen .....	252
4.3.2	Spezielle Maßnahmen .....	258
4.3.2.1	Maßnahmen bei analogen Systemen .....	258
4.3.2.2	Maßnahmen bei digitalen Systemen .....	260
4.3.2.3	Beispiele für konzeptionelle Maßnahmen .....	264
4.3.2.4	Der Einfluß der senkeseitigen Impedanzen .....	267
4.3.3	Erzeugung und Verarbeitung symmetrischer Signale .....	271
4.3.3.1	Die Gleichtaktunterdrückung von asymmetrischen Störsignalen .....	271
4.3.3.2	Signalsymmetrierung mit Übertragern .....	274
4.3.4	Maßnahmen beim Ausfall der Versorgungsspannung .....	276
4.3.5	Korrekturmöglichkeiten von gestörten digitalen Signalfolgen .....	279
4.3.5.1	Fehlererkennung und -korrektur von digitalen Worten .....	279
4.3.5.2	Erkennungsmethoden fehlerhafter Funktionsabläufe .....	282
4.3.5.3	Störungstoleranz redundanter Hardwaresysteme .....	283
4.4	Zusammenfassung .....	283

<b>5</b>	<b>Vermeidung von Störeinflüssen durch Leitungsführung</b> ...	<b>285</b>
5.1	Problemstellung .....	285
5.1.1	Die relevanten Leitungstypen .....	285
5.1.2	Erde, Masse und Bezugspotential .....	286
5.2	Die Verlegung des Bezugspotentials .....	288
5.2.1	Grundlegende Gesichtspunkte der Leitungsverlegung .....	288
5.2.2	Strukturierung des Bezugspotentials .....	289
5.2.3	Die Leitungen auf der Leiterplatte .....	293
5.2.3.1	Die sternförmige Bezugsleiterstruktur .....	293
5.2.3.2	Trennung von Signal- und Strombezugsleitern .....	294
5.2.3.3	Die Bezugsleiterfläche .....	295
5.2.3.4	Die vermaschte Leitungsführung .....	296
5.2.4	Die Erdschleifen .....	298
5.2.5	Die Verlegung der Schutzerde .....	300
5.2.6	Ableitung von Überspannungen und Überschlagströmen .....	306
5.2.6.1	Ableitung von statischen Entladungen .....	306
5.2.6.2	Ableitung von atmosphärischen Blitzüberschlägen .....	308
5.2.6.3	Maßnahmen gegen Potentialverschiebungen .....	311
5.2.7	Ankopplung an den Bezugsleiter beim Meßvorgang .....	312
5.3	Die Verlegung von Signalleitungen .....	314
5.3.1	Strukturen der signalführenden Stromkreise .....	314
5.3.1.1	Gesichtspunkte zur Leitungsführung .....	314
5.3.1.2	Die Signalübertragung zwischen einzelnen Geräten .....	317
5.3.1.3	Leistungsverteilung bei symmetrischen Signalen .....	318
5.3.2	Die bezugspotentialfreie Ankopplung .....	320
5.3.2.1	Die quasipotentialfreie Signalübertragung .....	321
5.3.2.2	Die optische Signaltrennung .....	323
5.3.2.3	Die optische Signalübertragung .....	326
5.3.2.4	Die Trennung durch Übertrager .....	330
5.3.2.5	Die Trennung durch Kapazitäten .....	332
5.3.2.6	Trennverstärker .....	333
5.3.2.7	Die Relaiskopplung .....	334
5.4	Die Verlegung von Versorgungsleitungen .....	335
5.4.1	Die Leitungsführung .....	335
5.4.1.1	Die Verlegung der 0V-Leiter .....	335
5.4.1.2	Verlegung und Pufferung der spannungsführenden Leitungen .....	337
5.4.2	Anschluß von Fühlerleitungen für die Spannungsregelung .....	340
5.5	Zusammenfassung .....	342
<b>6</b>	<b>Unterdrückung von Störeinflüssen durch Filterung</b> .....	<b>344</b>
6.1	Filterarten und ihre Wirkungsweise .....	344
6.1.1	Das Prinzip der Filterung .....	344
6.1.2	Die Filtertypen .....	345
6.1.3	Die Bedeutung von aktiven Filtern .....	350
6.1.4	Die passiven Filter .....	351

6.1.4.1	Die Tiefpaßfilter .....	351
6.1.4.2	Hochpaßfilter, Bandpaßfilter, Bandsperren .....	355
6.1.5	Die Störungsdämpfung durch ideale Filterung .....	358
6.1.5.1	Die Einfügungsdämpfung .....	358
6.1.5.2	Die Bedeutung der Anschlußimpedanz .....	358
6.1.5.3	Gesichtspunkte bei <i>RC</i> - und <i>LC</i> -Tiefpaßfiltern .....	360
6.1.5.4	Allgemeine Regeln für den Filtereinsatz .....	364
6.2	Die Filter und ihre Bauelemente .....	364
6.2.1	Kondensatoren für die Entstörung .....	365
6.2.1.1	Die Bedeutung der Zuleitungsinduktivität .....	365
6.2.1.2	X- und Y-Kondensatoren .....	367
6.2.1.3	Durchführungs- und Vierpolkondensatoren .....	369
6.2.2	Spulen und Drosseln .....	370
6.2.2.1	Luftpulen .....	372
6.2.2.2	Materialien zur Erhöhung der Induktivität .....	372
6.2.2.3	Magnetischer Widerstand und Luftspalt .....	376
6.2.2.4	Entstördrosseln .....	378
6.2.2.5	Dämpfungspierlen .....	382
6.3	Entstörschaltungen .....	384
6.3.1	Der Aufbau und Einsatz von Filtern .....	384
6.3.1.1	Allgemeine Gesichtspunkte .....	384
6.3.1.2	Filter für NF-Signale .....	386
6.3.1.3	Filter für Antennensignale .....	388
6.3.1.4	Filter für Datenleitungen .....	390
6.3.1.5	Filter für Leitungen der Gleichspannungsversorgung .....	392
6.3.1.6	Filter für die Netzversorgung .....	395
6.3.2	Beispiele für Filterung .....	400
6.3.2.1	Filterung eines Lampendimmers (Triac-Phasenanschnitt) .....	400
6.3.2.2	Entstörung eines getakteten Netzteils .....	401
6.3.2.3	Filtermaßnahmen bei Kraftfahrzeugen .....	405
6.4	Die Unterdrückung von Überspannungen .....	408
6.4.1	Ableiter- Bauelemente .....	408
6.4.1.1	Dioden .....	409
6.4.1.2	Zener-Dioden .....	410
6.4.1.3	Thyristoren/Triacs .....	411
6.4.1.4	Überspannungsableiter .....	413
6.4.1.5	Spannungsabhängige Widerstände (Varistoren) .....	416
6.4.1.6	Schmelzsicherungen/Sicherungselemente .....	418
6.4.2	Schutzschaltungen .....	420
6.4.3	Unterdrückung von Überspannungen induktiver Lasten .....	426
6.5	Zusammenfassung .....	431

<b>7</b>	<b>Störunterdrückung durch Symmetrierung, Kompensation, Schirmung .....</b>	<b>434</b>
7.1	Abstands- und Lageabhängigkeit .....	434
7.1.1	Die Abstandsabhängigkeit .....	435

7.1.2	Die Lageabhängigkeit .....	436
7.1.3	Entstörung durch Symmetrierung .....	439
7.2	Schirmungen .....	442
7.2.1	Grundlegende Mechanismen .....	442
7.2.2	Die Absorptionsschirmung .....	445
7.2.3	Die Reflexionsschirmung .....	447
7.2.3.1	Allgemeine Reflexionseigenschaften .....	447
7.2.3.2	Die Reflexionsschirmung im Fernfeld .....	451
7.2.3.3	Die Impedanz des Nahfeldes .....	452
7.2.3.4	Die Reflexionsdämpfung von elektrischen Nahfeldern .....	453
7.2.3.5	Die Reflexionsdämpfung von magnetischen Nahfeldern .....	455
7.2.3.6	Der Einfluß von Vielfachreflexionen .....	457
7.3	Aufbau und Wirkung realer Schirme .....	458
7.3.1	Die idealen Dämpfungswerte .....	459
7.3.2	Realisierungen und Grenzen realer Schirme .....	460
7.3.2.1	Erdung des Schirms .....	460
7.3.2.2	Kamine und deren Felddurchgriff .....	461
7.3.2.3	Verbindungsstellen und ihre Dichtungen .....	466
7.3.2.4	Der konkrete Schirmaufbau .....	469
7.3.2.5	Absorber und Raumresonanzen .....	471
7.3.2	Schirmung von niederfrequenten magnetischen Feldern .....	473
7.3.2.1	Eigenschaften weichmagnetischer Materialien .....	473
7.3.2.2	Schirmwirkung weichmagnetischer Materialien .....	477
7.3.2.3	Der Einsatz von magnetischen Schirmungen .....	479
7.3.2.4	Die Schirmung von stationären magnetischen Feldern .....	482
7.3.3	Die Mehrfachschirmung .....	484
7.4	Die Schirmung von Leitungen .....	486
7.4.1	Die Schirmung des elektrischen Feldes durch Koaxialkabel .....	486
7.4.2	Schirmung magnetischer Felder durch koaxiale Schirme .....	488
7.4.2.1	Die Kompensation des magnetischen Flusses .....	488
7.4.2.2	Die Kopplungsimpedanz von Schirmen .....	493
7.4.3	Die Schirmtypen und ihre Anschlußarten .....	495
7.4.3.1	Die Schirmtypen .....	495
7.4.3.2	Die Verlegung der Rückleiter und der Schirmanschluß .....	499
7.4.3.3	Die Anschlußvarianten bei Schirmen .....	502
7.4.3.4	Die Schutzringschaltung .....	505
7.5	Zusammenfassung .....	507

<b>Größen und ihre Abkürzungen .....</b>	<b>510</b>
--	------------

<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>514</b>
-----------------------------------	------------

<b>Anhang .....</b>	<b>528</b>
A Bedeutung und Berechnung von dB-Werten .....	528
B Impedanz von Leiterpaaren .....	531
C Hochfrequenztapete .....	532

## Inhalt

<b>D Transformationspapier</b> .....	535
<b>E EMV-relevante DIN/VDE-Normen</b> .....	536
<b>F VG-Normen</b> .....	543
<b>G EN-/IEC-/MIL-Normen</b> .....	546
<b>H Produktbezogene maßgebende Normen</b> .....	548
<b>I Die wichtigsten mit Normung befaßten Gremien</b> .....	549
<b>K Hoheitliche Festschreibung der Funkstör-Vorschriften</b> .....	550
<b>L Das griechische Alphabet</b> .....	551
<b>M Vorsilben und ihre Multiplikatoren</b> .....	551
<b>N Hersteller/Anbieter von EMV-relevanten Komponenten</b> .....	552
<b>Sachverzeichnis</b> .....	553