

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Grundlagen</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Grundlagen der EMV</b> .....	<b>1</b>
1.1.1 Definition der EMV .....	3
1.1.2 Störquellen .....	5
1.1.2.1 Natürliche Störquellen und "man made noise" .....	7
1.1.2.2 Beabsichtigte HF-Erzeugung: Funkdienste .....	11
1.1.2.3 Störspektren .....	11
1.1.3 Störsignalausbreitung .....	13
1.1.3.1 Leitungsgebundene Störsignalübertragung - strahlungsgebundene Störsignalübertragung .....	14
1.1.3.2 Galvanische Kopplung .....	14
1.1.3.3 Kapazitive Kopplung .....	15
1.1.3.4 Induktive Kopplung .....	16
1.1.3.5 Elektromagnetische Strahlungskopplung .....	18
1.1.3.6 Felder von Elementarstrahlern .....	20
1.1.3.7 Verschiedene Antennen .....	23
1.1.4 Maßnahmen zur Erreichung der EMV .....	24
1.1.4.1 Grundmaßnahmen .....	24
1.1.4.2 Zusatzmaßnahmen .....	25
1.1.5 Problemfelder .....	26
1.1.5.1 Impulse auf Netzleitungen .....	26
1.1.5.2 Direkte und indirekte Wirkungen niederfrequenter Magnetfelder .....	27
1.1.5.3 Störung des Funkempfangs durch Elektronik .....	28
1.1.5.4 Beeinflussungen der Elektronik durch HF-Abstrahlungen .....	28
1.1.6 Randgebiete .....	29
1.1.7 Logarithmische Darstellung elektrischer Größen .....	30
1.1.8 Begriffsdefinitionen .....	32
1.1.9 Literatur .....	38
<b>1.2 EMV auf der Schaltkreis- und Geräteebene</b> .....	<b>39</b>
1.2.1 Allgemeines .....	39
1.2.2 Erläuterung der Begriffe "Gerät", "Anlage" und "System" .....	40

1.2.3	EMV-Planung bei der Geräteentwicklung . . . . .	41
1.2.4	Erfüllung von Vorschriften und Spezifikationen . . . . .	44
1.2.5	Maßnahmen zur Sicherstellung der Elektromagnetischen Verträglichkeit . . . . .	47
1.2.5.1	Massungsmaßnahmen . . . . .	48
1.2.5.2	Schirmungsmaßnahmen . . . . .	51
1.2.5.3	Filterungsmaßnahmen . . . . .	57
1.2.5.4	Verdrahtung und Verkabelung . . . . .	60
1.2.6	Nachweis der Elektromagnetischen Verträglichkeit von Geräten . . . . .	61
1.2.7	Zusammenfassung . . . . .	61
1.2.8	Literatur . . . . .	62
1.3	EMV auf der Systemebene . . . . .	64
1.3.1	Einleitung . . . . .	64
1.3.2	Vorgaben durch die Umwelt . . . . .	65
1.3.2.1	Zivile Projekte und Systeme . . . . .	65
1.3.2.2	Militärische Projekte und Systeme . . . . .	66
1.3.3	Phasen und Phasenpapiere einer EMV-Systemplanung . . . . .	67
1.3.3.1	Konzeptphase . . . . .	68
1.3.3.2	Definitionsphase . . . . .	69
1.3.3.3	Konstruktions- und Bauphase . . . . .	71
1.3.3.4	Nützliche Diagramme und Formblätter für die Systemplanung . . . . .	72
1.3.4	EMV-Zonenmodell . . . . .	75
1.3.4.1	Allgemeines . . . . .	75
1.3.4.2	Konstruktionsbedingte Zonenvorgaben . . . . .	76
1.3.4.3	Zonenentkopplung . . . . .	77
1.3.4.4	Grenzwertvorgaben für die Geräte der einzelnen EMV-Zonen . . . . .	79
1.3.5	Intrasystemmaßnahmen . . . . .	80
1.3.5.1	Massung . . . . .	81
1.3.5.2	Schirmung . . . . .	82
1.3.5.3	Filterung . . . . .	82
1.3.5.4	Verkabelung . . . . .	83
1.3.6	Beeinflussungsmatrix . . . . .	85
1.3.6.1	Sinn . . . . .	85

1.3.6.2	Aufbau . . . . .	85
1.3.6.3	Einzelanalysen . . . . .	87
1.3.7	EMV-Systemvermessung . . . . .	88
1.3.7.1	Allgemeines . . . . .	88
1.3.7.2	Gegenüberstellung von Aussendungs- und Festigkeitsgrenzwerten . . . . .	88
1.3.7.3	Prüfungen im System zur Feststellung des Störsicherheitsabstandes . . . . .	91
1.3.8	Literatur . . . . .	92
1.4	<b>Schaltüberspannungen, statische Entladungen, Feldimpulse . . . . .</b>	<b>93</b>
1.4.1	Einleitung . . . . .	93
1.4.2	Transiente Störsignale . . . . .	94
1.4.2.1	Schaltüberspannungen . . . . .	94
1.4.2.2	Elektrostatische Entladungen (ESD) . . . . .	100
1.4.2.3	Simulation von ESD . . . . .	107
1.4.2.4	LEMP und NEMP . . . . .	109
1.4.3	Zusammenfassung . . . . .	110
1.4.4	Literatur . . . . .	110
2.	<b>Analysen . . . . .</b>	<b>111</b>
2.1	<b>Werkzeuge zur Behandlung von Beeinflussungsmodellen . . . . .</b>	<b>111</b>
2.1.1	Leitungstheoretische Ansätze . . . . .	112
2.1.2	Ersatzladungsverfahren . . . . .	116
2.1.3	Finite Elemente und finite Differenzen . . . . .	118
2.1.3.1	Statisches Feld . . . . .	118
2.1.3.2	Elektrodynamisches Feld . . . . .	120
2.1.4	Magnetische Streufelder, Gegeninduktivitäten . . . . .	123
2.1.4.1	Berechnung magnetischer Streufelder . . . . .	124
2.1.4.2	Numerische Berechnung von Gegen- und Eigeninduktivitäten . . . . .	125
2.1.5	Momentenmethode . . . . .	128
2.1.6	Verfahren der geometrischen Optik (GTD, UTD) . . . . .	130
2.1.7	Literatur . . . . .	133

<b>2.2 Die Momentenmethode als Werkzeug zur Lösung von EMV-Problemen</b> .....	<b>134</b>
2.2.1 Mathematisch-physikalische Grundlagen .....	134
2.2.2 Prinzip .....	136
2.2.2.1 Dünndrahtanordnungen .....	136
2.2.2.2 Flächenstrukturen .....	140
2.2.2.3 Anregungsvarianten .....	142
2.2.2.4 Vergleichende Übersicht .....	146
2.2.3 Transiente Vorgänge .....	148
2.2.4 Empfehlungen zur Modellierung .....	150
2.2.5 Literatur .....	153
<b>2.3 Möglichkeiten und Anwendung der Momentenmethode mit Beispielen</b> .....	<b>154</b>
2.3.1 Ergebnisbewertung .....	155
2.3.2 Beispiele einfacher Stabstrukturen .....	158
2.3.2.1 Horizontale Leiterschleife in der Nähe einer Vertikalantenne .....	159
2.3.2.2 T-Antenne über idealem Grund mit vertikalem Empfängerstab .....	161
2.3.2.3 Eigeninduktivität, Gegeninduktivität .....	166
2.3.4 Beispiele aufwendigerer Anordnungen .....	168
2.3.4.1 Blitzdirekteinschlag in eine Peilerantenne .....	168
2.3.4.2 Analyse eines Automobils bei Anregung durch eine dachmontierte Monopolantenne .....	171
2.3.4.3 Flugzeug bei Anregung durch ein ebenes Wellenfeld .....	174
2.3.5 Literatur .....	176
<b>3. Intrasystemmaßnahmen</b> .....	<b>177</b>
3.1 Erdung und Massung .....	177
3.1.1 Einleitung .....	177
3.1.2 Schutzerdung und Signalmassung .....	179
3.1.2.1 Gemeinsamkeiten und Unterschiede .....	179
3.1.2.2 Begriffe .....	180

3.1.3	Erdungskonzepte für Stromversorgungsnetze .....	183
3.1.3.1	TN-Netz .....	183
3.1.3.2	TT-Netz .....	124
3.1.3.3	IT-Netz .....	185
3.1.3.4	Kleinspannung .....	186
3.1.4	Massekonzepte für die Signalübertragung .....	186
3.1.4.1	Massefreie und massebezogene Signalübertragung .....	186
3.1.4.2	Konzepte für die massebezogene Signalübertragung .....	189
3.1.4.3	Störspannungen bei einem flächenhaften Bezugsleiter .....	191
3.1.5	Massung von Kabelschirmen .....	194
3.1.6	Prüfungen .....	195
3.1.6.1	Sachgebiet Erdung .....	195
3.1.6.2	Sachgebiet Massung, EMV .....	196
3.1.7	Vorschriften und Richtlinien, Literatur .....	196
3.1.7.1	Sachgebiet Erdung .....	196
3.1.7.2	Sachgebiet Massung, EMV .....	198
3.1.7.3	Literatur .....	198
3.2	<b>Räumliche Entkopplung und Schirmung .....</b>	<b>199</b>
3.2.1	Definitionen zu EMV-Zonen und Schirmdämpfungen .....	199
3.2.2	Berechnung der Schirmdämpfung .....	201
3.2.2.1	Abschirmung niederfrequenter Felder .....	201
3.2.2.2	Abschirmung hochfrequenter Felder .....	211
3.2.2.3	Vergleich der geschilderten Rechenmethoden zur Ermittlung der Schirmdämpfung im Fernfeld .....	223
3.2.2.4	Schirmdämpfung bei transientem Vorgang .....	225
3.2.2.5	Mehrschalige Schirme .....	228
3.2.3	Realistische Grenzwerte der Schirmdämpfung .....	230
3.2.3.1	Leckagen .....	230
3.2.3.2	Stehende Wellen .....	231
3.2.3.3	Übereinstimmung Rechnung - Messung .....	232
3.2.4	Besondere Schirmmaterialien und ausgeführte Schirme .....	232
3.2.4.1	Gitter .....	232
3.2.4.2	Wabenfenster und Rohrdurchführungen .....	234
3.2.4.3	EMV-Dichtungen .....	235
3.2.4.4	Leitfähige Kunststoffe .....	236
3.2.4.5	Beispiele von Abschirmkabinen und abgeschirmten Räumen ..	239
3.2.5	Literatur .....	242

<b>3.3</b>	<b>Verkabelung und Filterung</b>	<b>243</b>
3.3.1	Einleitung	243
3.3.2	Verkabelung	244
3.3.2.1	Galvanische Einkopplung	244
3.3.2.2	Induktive Einkopplung	245
3.3.2.3	Kapazitive Einkopplung	245
3.3.2.4	Elektromagnetische Strahlungskopplung	246
3.3.2.5	Kopplungswiderstand / Transferimpedanz	247
3.3.2.6	Ferritbeschichtete Kabel	250
3.3.2.7	Einfluß der Schirmdung bei ein-/zweiseitiger Erdung	257
3.3.2.8	Verkabelungsregeln	261
3.3.2.8.1	Kabelkategorien	261
3.3.2.8.2	Verlegungsplanung	261
3.3.2.8.3	Leitungsverlegung	263
3.3.2.8.4	Anschlußtechnik für Leitungen	264
3.3.3	Filterung	274
3.3.3.1	Filter an den Grenzen verschiedener EMV-Zonen	274
3.3.3.2	Filter in Datenleitungen	274
3.3.3.3	Filterverhalten	275
3.3.3.3.1	Einfügungsdämpfung	275
3.3.3.3.2	Filter für Quellen- und Lastimpedanz $\neq 50 \Omega$	276
3.3.3.3.3	Wichtige Filtermerkmale	276
3.3.3.4	Bauelemente gegen Überspannungen	278
3.3.3.5	EMI-Filter	278
3.3.3.5.1	Filterdegradation durch fehlerhafte Montage	280
3.3.3.5.2	Sicherheitsgesichtspunkte	280
3.3.3.5.3	Filterwirkung bei Pulsbelastung	281
3.3.3.6	Filter-"Hardware"	282
3.3.3.7	Verlagerung der Filterung	283
3.3.3.8	Beispiel eines ungünstigen Filterverhaltens	283
3.3.3.9	Zusammenfassung zu den EMI-Filtern	284
3.3.4	Zusammenfassung	285
3.3.5	Literatur	286
<b>3.4</b>	<b>Schutzschaltungen zur Begrenzung von Überspannungen</b>	<b>287</b>
3.4.1	Einleitung	287
3.4.2	Schutzmaßnahmen gegen transiente Störungen	287
3.4.2.1	Schutzmaßnahmen gegen Störungen durch ESD	287

3.4.2.2	Schutzmaßnahmen gegen leitungsgeführte Störungen (nichtlineare Schutzschaltungen) . . . . .	288
3.4.3	Zusammenfassung . . . . .	302
3.4.4	Literatur . . . . .	303
4.	<b>EMV in verschiedenen Anwendungsbereichen . . . . .</b>	<b>304</b>
4.1	<b>Störfestigkeit in der Automatisierungstechnik . . . . .</b>	<b>304</b>
4.1.1	Einleitung . . . . .	304
4.1.2	Grundsätzliche Arten der Verkopplung . . . . .	305
4.1.2.1	Galvanische Verkopplung . . . . .	305
4.1.2.2	Induktive Verkopplung . . . . .	305
4.1.2.3	Kapazitive Verkopplung . . . . .	306
4.1.2.4	Wellenkopplung zwischen elektrisch langen Leitungen . . . . .	306
4.1.3	Entkopplung, prinzipiell . . . . .	307
4.1.3.1	Entkopplung, galvanisch . . . . .	307
4.1.3.2	Entkopplung, induktiv . . . . .	308
4.1.3.3	Entkopplung, kapazitiv . . . . .	310
4.1.3.4	Entkopplung, Leitungswellen . . . . .	312
4.1.3.5	Entkopplung durch große leitende Flächen . . . . .	312
4.1.3.6	Leitungsschirme . . . . .	314
4.1.4	Konkrete Entkopplung interner Störsignale (interne EMV) . . . . .	317
4.1.4.1	Galvanische Verkopplung zwischen Teilsystemen unterschiedlicher Leistung . . . . .	319
4.1.4.2	Galvanische Verkopplungen innerhalb des digitalen Signalverarbeitungsteils . . . . .	319
4.1.4.3	Hochfrequente Signalübertragung . . . . .	322
4.1.5	Konkrete Entkopplung gegen Störbeeinflussungen aus der Umwelt (externe EMV) . . . . .	323
4.1.5.1	Maßnahmen an Störquellen . . . . .	325
4.1.5.2	Maßnahmen an den Verkopplungs-Schnittstellen . . . . .	327
4.1.5.3	Bezugspunkt; Topologie, konstruktive Maßnahmen . . . . .	329
4.1.6	Zusammenfassung . . . . .	331
4.1.6.1	Maßnahmen zur geräteinternen Störfestigkeit . . . . .	331
4.1.6.2	Maßnahmen zur Störfestigkeit gegenüber externen Einwirkungen . . . . .	332
4.2	<b>Besonderheiten der EMV in der Informationstechnik . . . . .</b>	<b>334</b>

4.2.1	Einleitung	334
4.2.2	Signalschnittstellen, Übertragungsverfahren	335
4.2.2.1	Beidseitig auf Erde bezogene Signalübertragung	335
4.2.2.2	Erdfreie, jedoch beidseitig potentialgebundene Signalübertragung	336
4.2.2.3	Potentialgetrennte, jedoch unsymmetrische Signalübertragung	337
4.2.2.4	Symmetrische Signalübertragung	338
4.2.3	Einkopplungen in koaxiale Busse	339
4.2.3.1	Niederfrequente Einkopplungen in triaxiale Systeme (Beispiel ETHERNET)	339
4.2.3.2	Einkopplung von Sprüngen in triaxiale Systeme (Beispiel ETHERNET)	343
4.2.3.3	Schirmungslücken; Lücken im Koax-System	345
4.2.3.4	Frequenzspektrum von Schützeinkopplungen in Koax-Kabel	346
4.2.4	Symmetrische Übertragung (Feldbusse)	348
4.2.5	Leitungsschirme bei elektrisch langen Anordnungen	351
4.2.6	Primäre Verkopplung, Koppelfaktor; Entkopplung	354
4.2.7	Optische Busse, Netze	355
4.2.8	Signal-Dämpfung, -Verzerrung; Übertragungsgrenzen	356
4.2.9	Leiterplatten-Busse	360
4.2.10	Zusammenfassung	363
4.2.11	Literatur	364
4.3	<b>Besonderheiten der EMV in der Energietechnik</b>	365
4.3.1	Einleitung	365
4.3.2	Störungen im Energieversorgungsnetz	367
4.3.2.1	Dauerstörer	368
4.3.2.2	Kurzzeitstörungen	376
4.3.2.3	Spektren	383
4.3.3	Netzverhalten	388
4.3.4	Entstörung	391



4.3.5	Vorschriften .....	395
4.3.6	Literatur .....	396
4.4	<b>Besonderheiten der EMV in der Kfz-Technik .....</b>	<b>398</b>
4.4.1	Belastung der elektronischen Komponenten durch Schwankungen, Überspannungen und Kurzzeitunterbrechungen der Spannungsversorgung .....	399
4.4.2	Fern-Entstörung .....	401
4.4.2.1	Grenzwerte .....	402
4.4.2.2	Nachweis .....	403
4.4.3	Eigen-Entstörung .....	403
4.4.3.1	Grenzwerte .....	404
4.4.3.2	Nachweis .....	404
4.4.3.3	Hinweise für die Funk-Entstörung .....	405
4.4.4	Störfestigkeit der elektronischen Komponenten gegen hochfrequente elektromagnetische Störsignale .....	405
4.4.4.1	HF-Abstrahlungen von Feststationen .....	406
4.4.4.2	HF-Abstrahlungen von Antennen des eigenen Fahrzeuges .....	407
4.4.4.3	Elektromagnetische Felder von Mobilstationen und von Handsprechfunkgeräten .....	408
4.4.4.4	HF-Felder von Radar- und Richtfunkanlagen .....	408
4.4.4.5	Störfestigkeitsgrenzwerte und Meßverfahren .....	410
4.4.5	Literatur .....	411
5.	<b>EMV-Meßtechnik .....</b>	<b>412</b>
5.1	<b>Überblick .....</b>	<b>412</b>
5.1.1	Einleitung .....	412
5.1.2	Frequenzspektrum .....	413
5.1.3	Wege elektromagnetischer Kopplungen .....	414
5.1.4	Eigenschaften der Störsignale .....	415
5.1.5	Erfassung und Nachbildung von Störsignalen .....	416
5.1.6	Prüfverfahren .....	417

5.1.6.1	Genormte Prüfverfahren . . . . .	417
5.1.6.2	Orientierende Meßmethoden . . . . .	418
5.1.7	Literatur . . . . .	418
<b>5.2</b>	<b>Störaussendungsmessungen . . . . .</b>	<b>419</b>
5.2.1	Allgemeines . . . . .	419
5.2.2	Störaussendungen auf Leitungen . . . . .	421
5.2.3	Störaussendungen über Felder . . . . .	424
5.2.4	Störstrahlungsleistung . . . . .	428
5.2.5	Funktörleistung . . . . .	430
5.2.6	Prüfablauf . . . . .	431
5.2.7	Meßunsicherheiten / Reproduzierbarkeit . . . . .	432
5.2.7.1	Meßfehler nach VDE 0877 . . . . .	432
5.2.7.2	Reproduzierbarkeit . . . . .	433
5.2.8	Meßeinrichtungen . . . . .	439
5.2.8.1	Freifeld-Meßgelände . . . . .	439
5.2.8.2	Geschirmte Kabine / Absorber-Kabine . . . . .	440
5.2.9	Meßgeräte . . . . .	444
5.2.9.1	Funktörmeßempfänger . . . . .	444
5.2.9.2	Netznachbildungen . . . . .	445
5.2.9.3	Tastkopf . . . . .	446
5.2.9.4	Stromzange (HF-Stromwandler) . . . . .	446
5.2.9.5	Absorptions-Meßwandlerzange . . . . .	447
5.2.9.6	Meßspule . . . . .	447
5.2.9.7	Meßantennen . . . . .	447
5.2.10	Beispiel eines EMV-Meßlabors . . . . .	449
5.2.11	Zusammenfassung . . . . .	449
5.2.12	Literatur . . . . .	449
<b>5.3</b>	<b>Störfestigkeitsmessungen . . . . .</b>	<b>451</b>
5.3.1	Einleitung . . . . .	451

5.3.1.1	Überblick .....	451
5.3.1.2	Störgrößen .....	452
5.3.1.3	Simulation der Störgrößen .....	452
5.3.2	Meßverfahren Störfestigkeit .....	454
5.3.2.1	Störfestigkeit gegen leitungsgeführte Störgrößen .....	454
5.3.2.2	Störfestigkeit gegen elektromagnetische Felder .....	459
5.3.2.3	Störfestigkeit gegen die Entladung statischer Elektrizität .....	461
5.3.3	Meßgeräte .....	462
5.3.3.1	Übersicht .....	462
5.3.3.2	Meßsender und Prüfgeneratoren .....	462
5.3.3.3	Leistungsverstärker .....	464
5.3.3.4	Ankoppel-Netzwerke .....	465
5.3.3.5	Sendeantennen und Wellenleiter .....	468
5.3.3.6	Feldstärke-Meßsonden .....	471
5.3.4	Ausrüstung eines modernen Meßlabors für Störfestigkeitsmessungen ...	472
5.3.4.1	Allgemeines .....	472
5.3.4.2	Geschirmte Kabinen / Absorberhallen .....	474
5.3.4.3	Störfestigkeitsmeßplätze .....	475
5.3.5	Zusammenfassung .....	478
5.3.6	Literatur .....	479
6.	<b>Normung auf dem Gebiet der EMV .....</b>	<b>482</b>
6.1	<b>Übersicht zur EMV-Normung .....</b>	<b>482</b>
6.2	<b>Nationale EMV-Normung .....</b>	<b>482</b>
6.2.1	Nationale EMV-Normung für zivile Anwendungen .....	482
6.2.2	Nationale EMV-Normung für militärische Anwendung .....	486
6.3	<b>Internationale EMV-Normung .....</b>	<b>487</b>
6.4	<b>EG-Richtlinien und Europäische Normung zur EMV .....</b>	<b>488</b>
6.4.1	EMV-Rahmenrichtlinie der EG .....	489
6.4.2	EMV-Gesetz .....	493

<b>6.5</b>	<b>Struktur der EMV-Europa-Normen</b>	<b>493</b>
6.5.1	Basic Standards	494
6.5.2	Generic Standards	495
6.5.2.1	Wohnbereiche, Bürobereiche und Leichtindustrie	497
6.5.2.2	Industriegebiet	497
6.5.3	Product/Product Family Standards	500
6.5.4	Europa-Normen zur Funk-Entstörung	500
<b>6.6</b>	<b>Normenübersicht</b>	<b>501</b>
6.6.1	Definitionen	502
6.6.2	Programme und Verfahren	502
6.6.3	Aufbau- und Konstruktionsrichtlinien	503
6.6.4	Grenzwerte	503
6.6.5	Prüf- und Meßverfahren	504
6.6.6	Meßgeräte und Meßeinrichtungen	505
6.6.7	Gefährdung	505
<b>6.7</b>	<b>Literatur</b>	<b>506</b>
<b>Index</b>		<b>507</b>