

Inhalt

1	Einleitung	15
1.1	Definition und Motivation	15
1.2	Elektromagnetische Verträglichkeit als horizontale Disziplin	16
1.3	Aufbau des Buches	17
2	Grundlagen und Begriffe der EMV	19
2.1	Das EMV-Modell	19
2.1.1	Nutz- und Störgrößenfluss	21
2.1.2	Innere und äußere EMV	21
2.2	Eigenschaften von Störquellen	22
2.2.1	Charakterisierung von Störquellen	23
2.2.1.1	Natürlich/künstlich	23
2.2.1.2	Leitungsgebunden/gestrahlt	23
2.2.1.3	Beabsichtigt/unbeabsichtigt	23
2.2.1.4	Schmalbandig/breitbandig	24
2.2.1.5	Kontinuierlich/intermittierend	24
2.2.1.6	Zeitvarianz von Störquellen	24
2.2.2	Beispiele von Störquellen	25
2.2.3	ISM-Bänder contra lizenzierte Funkbänder	26
2.2.3.1	Übersicht über einige lizenzierte Funkbänder	27
2.2.3.2	Übersicht über einige ISM-Frequenzbänder	27
2.3	Eigenschaften von Störsenken	28
2.3.1	Charakterisierung von Störsenken	29
2.3.1.1	Einkopplungswege	29
2.3.1.2	Klassifikation von Reaktionen	29
2.3.1.3	Störfestigkeit/Suszeptibilität von Störsenken	30
2.3.1.4	Zeitvarianz von Störsenken	31
2.3.2	Beispiele von Störsenken	32
2.4	Pegelrechnung	34
2.4.1	Relative Pegel	34
2.4.2	Absolute Pegel	37

2.5	Schaltungskonzepte	38
2.5.1	Einfache Grundschaltung	38
2.5.2	Beschreibung von Leitungen	40
2.5.3	Dreileitersysteme	43
2.5.3.1	Gleich- und Gegentaktwellen	43
2.5.3.2	Leitungswellenwiderstände und Leitungsabschluss	45
2.5.4	Symmetrische und unsymmetrische Schaltungen	46

3 Ausbreitung von Störsignalen 48

3.1	Übersicht der Kopplungsarten	48
3.2	Maxwell'sche Gleichungen	49
3.2.1	Materialgleichungen	50
3.2.2	Integralform	50
3.2.2.1	Durchflutungsgesetz	50
3.2.2.2	Induktionsgesetz	51
3.2.2.3	Gauß'sches Gesetz des elektrischen Feldes	52
3.2.2.4	Gauß'sches Gesetz des magnetischen Feldes	52
3.2.3	Differentialform für allgemeine Zeitabhängigkeit	52
3.2.4	Differentialform für harmonische Zeitabhängigkeit	53
3.2.5	Randbedingungen	54
3.3	Simulation elektromagnetischer Felder	55
3.3.1	Einteilung von Feldproblemen	56
3.3.1.1	Statische Felder	56
3.3.1.2	Quasi-statische Felder	57
3.3.1.3	Schnell veränderliche Felder	58
3.3.2	Numerische Verfahren und moderne 3D-Simulationsprogramme	58
3.3.2.1	Elektromagnetische 3D-Feldsimulation	59
3.3.2.2	Arbeitsschritte bei der EM-Simulation	62
3.4	Kopplungsmechanismen	64
3.4.1	Galvanische Kopplung	64
3.4.1.1	Modellbildung	65
3.4.1.2	Maßnahmen zur Reduzierung der galvanischen Kopplung	66
3.4.1.3	Masseschleifen	70
3.4.2	Induktive Kopplung	71
3.4.2.1	Modellbildung	71
3.4.2.2	Berechnung des magnetischen Feldes	73
3.4.2.3	Berechnung der eingekoppelten Spannung	74
3.4.2.4	Maßnahmen zur Verminderung der induktiven Kopplung	81

3.4.3	Kapazitive Kopplung	82
3.4.3.1	Modellbildung	82
3.4.3.2	Berechnung der eingekoppelten Spannung.....	82
3.4.3.3	Maßnahmen zur Verminderung der kapazitiven Kopplung	85
3.4.4	Leitungskopplung	86
3.4.4.1	Modellbildung	86
3.4.4.2	Maßnahmen zur Verminderung der Leitungskopplung	90
3.4.5	Strahlungskopplung.....	91
3.4.5.1	Modellbildung	91
3.4.5.2	Maßnahmen zur Verminderung der Strahlungskopplung	97
3.5	Feldsimulation der elektromagnetischen Kopplung	97
3.5.1	Überkopplung zwischen benachbarten Mikrostreifenleitungen	97
3.5.2	Parasitäre Gehäuseresonanzen	101
3.5.3	Abstrahlverhalten einer Schlitzantenne	106
4	Komponenten und Konzepte zur Verbesserung der EMV	110
4.1	Kondensatoren.....	110
4.1.1	Abblockkondensator	111
4.1.2	Durchführungskondensator	112
4.2	Spulen	113
4.3	Filter	114
4.3.1	RC-Filter	114
4.3.2	LC-Filter.....	118
4.3.3	Leitungsfiler	123
4.3.4	Aktive Filter	124
4.4	Gleichtaktdrossel	125
4.5	Trenntransformator	127
4.6	Optokoppler und Lichtwellenleiter	128
4.7	Symmetrische Übertragung.....	129
4.7.1	Prinzip.....	129
4.7.2	Symmetrische Leitung	129
4.7.3	Erzeugung und Auswertung symmetrischer Signale	132
4.7.3.1	Symmetrierung durch Übertrager	132
4.7.3.2	Differenzverstärker und Leitungstreiber.....	133
4.8	Schirmung.....	137
4.8.1	Schirmdämpfung	137
4.8.2	Physikalische Grundlagen der Schirmwirkung.....	138
4.8.2.1	Schirmung statischer und quasi-statischer elektrischer Felder ...	138

4.8.2.2	Schirmung statischer und quasi-statischer magnetischer Felder .	139
4.8.2.3	Schirmung hochfrequenter elektromagnetischer Wellen	140
4.8.3	Nicht vollständig geschlossene Schirmhülle	141
4.8.4	Hohlraumresonanzen	142
4.8.5	Kabelschirme	144
4.8.5.1	Leitungsvarianten und Schirmanschluss	144
4.8.5.2	Messverfahren zur Bestimmung der Kabelschirmdämpfung	146

5	Richtlinien, Normen und Zulassungsprozesse	150
5.1	Gesetze und Richtlinien	150
5.1.1	Das EMV-Gesetz	150
5.1.2	Richtlinien	151
5.2	Normen	152
5.2.1	Übersicht Normenreihe ISO 11451	154
5.2.2	Übersicht Normenreihe ISO 11452	154
5.2.3	Übersicht Normenreihe IEC 61000-3	156
5.2.4	Übersicht Normenreihe IEC 61000-4	156
5.2.5	Übersicht Normenreihe CISPR	158
5.2.6	Übersicht Normenreihe ISO 7637	158
5.2.7	Grundnormen und Fachgrundnormen	158
5.2.8	Produktnormen	160
5.2.9	Akkreditierung von Laboren	160
5.2.10	Ausgabestände von Normen	161
5.2.11	Beispiele für Dokumententypen aus der Normenwelt	162
5.3	Herstellerspezifikationen	162
5.3.1	Vertragliche EMV-Anforderungen	163
5.3.2	Testpläne	163
5.3.3	Anerkennungsverfahren für Labore	164
5.4	CE-Kennzeichnung	165
5.4.1	Die Konformitätsvermutung	165
5.4.2	Rolle des Herstellers	166
5.4.3	Anwendung harmonisierter Normen	166
5.4.4	Dokumentenbewertung	167
5.4.5	Behördliche Aufsicht durch die BNetzA	168
5.5	Die notifizierten Stellen	169
5.5.1	Rechtsgrundlage der notifizierten Stelle	169
5.5.2	Nutzen für den Hersteller	170
5.5.3	Technischer Bericht der notifizierten Stelle	170

5.5.4	Einschränkungen für den Betrieb	172
5.5.5	Erklärung der notifizierten Stelle	172
5.5.6	Produktgruppenbildung	172
5.6	E-Kennzeichnung	173
5.6.1	Die UN ECE R10	174
5.6.2	Rolle des Herstellers	175
5.6.3	Rolle des technischen Dienstes	175
5.6.4	Rolle der Behörden (KBA)	176
5.7	Elektromagnetische Umweltverträglichkeit	176

6 Messen und Prüfen178

6.1	Messkette bei Störaussendungsmessungen	179
6.1.1	Messwandler und Transducer	179
6.1.2	Oszilloskope	181
6.1.3	Konventioneller Messempfänger	184
6.1.4	Zeitbereichsmessempfänger	185
6.1.5	Spektrumanalysator	186
6.1.6	Messleitungen	187
6.1.7	Netzwerkanalysator	189
6.1.8	Detektoren für Störaussendungsmessungen	190
6.1.9	Messzeiten für Störaussendungsmessungen	191
6.1.10	Bandbreiten für Störaussendungsmessungen	192
6.2	Messkette bei Störfestigkeitsmessungen	193
6.2.1	Signalgenerator	194
6.2.2	Modulationsarten	195
6.2.3	Verstärker	196
6.2.4	Messwandler	197
6.2.5	Funktionsprinzip einer Feldsonde	202
6.2.6	Monitoring der Messkette	202
6.2.7	Monitoring des Prüfmusters	203
6.2.8	Kalibrierung	204
6.2.9	Mehrpunktkalibrierungen	205
6.2.10	Messzeiten für Störfestigkeitsmessungen	206
6.2.11	Bewertung einer Störfestigkeitsmessung	207
6.3	Messung von sehr niederfrequenten Störaussendungen	208
6.3.1	Oberschwingungsströme	208
6.3.2	Flicker	209
6.3.3	Netzzrückwirkungen als Störfestigkeitsprüfung	210

6.4	Prüfungen der Impulsfestigkeit	211
6.4.1	Impulserzeugung	211
6.4.2	Frequenzbereichsbelegung von Impulsen	212
6.4.3	Koppelmechanismen für Impulsprüfungen	212
6.4.4	Gängige Impulsformen	213
6.4.5	Sehr langsame impulsartige Vorgänge (Wellenformen)	214
6.4.6	Elektrostatische Entladung (ESD)	215
6.4.7	Hochtesten bei Impulsprüfungen	216
6.4.8	Prüfzeiten bei Impulsprüfungen	217
6.5	Ein Messplatz für EMV-Prüfungen: Absorberhallen	217
6.5.1	Schirmung	218
6.5.2	Reflexionsdämpfung	220
6.5.3	Freiraum- und Freifeldhallen	221
6.5.4	Öffnungen in der Schirmung	223
6.5.5	Störquellen und -senken innerhalb der Absorberhalle	227
6.5.6	Reziprozität von Messwandlern	227
6.5.7	Messungen in der Absorberhalle	228
6.6	Schirmkabinen	231
6.6.1	Prüfungen in der Schirmkabine	232
6.7	Freifeldmessungen	236
6.8	Die Modenverwirbelungskammer	237
6.9	TEM-Zelle	238
6.9.1	Prinzip	238
6.9.2	Zellentypen	239

7 Prüfvorbereitungen241

7.1	Zeit- und Kostenbedarf einer EMV-Prüfung	241
7.1.1	Pre-Compliance-Tests im eigenen Betrieb	242
7.1.2	Compliance-Tests im eigenen Betrieb	242
7.1.3	Prüfungen bei einem externen Dienstleister	243
7.2	Die Auswahl eines Betriebszustandes	244
7.2.1	Anforderungen an die Repräsentanz	244
7.2.2	Anforderungen an die Stabilität	244
7.2.3	Anforderungen an die Software zum Betrieb des Prüflings	245
7.3	Anforderungen an die Peripherie	245
7.3.1	Peripherie bei Störaussendungsmessungen	246
7.3.2	Peripherie bei Störfestigkeitsmessungen	247
7.3.3	Peripherie im Prüfaufbau	247

7.4	Formulierung von Bewertungskriterien	247
7.4.1	Definition von Funktionsklassen und Toleranzen	247
7.4.2	Auswahl von sinnvollem Monitoring	248
7.5	Entstörung während der Prüfung	250
7.5.1	Identifikation des Problems	250
7.5.2	Modifikationen während einer Prüfreihe	251
7.5.3	Entstörungsmaßnahmen ohne Modifikation	252
7.5.4	Entstörungsmaßnahmen mit Modifikation	252
A	Anhang	253
A.1	Koordinatensysteme	253
A.1.1	Kartesisches Koordinatensystem	254
A.1.2	Zylinderkoordinatensystem	255
A.1.3	Kugelkoordinatensystem	256
A.2	Lineare und logarithmische Größen	257
A.3	Frequenzen und Wellenlängen	258
	Formelzeichen und Abkürzungen	259
	Literatur	264
	Index	268