

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>15</b>
1.1	Definition und Motivation	15
1.2	Elektromagnetische Verträglichkeit als horizontale Disziplin	16
1.3	Aufbau des Buches	17
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Begriffe der EMV</b>	<b>19</b>
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
<b>3</b>	<b>Ausbreitung von Störsignalen .....</b>	<b>48</b>
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
<b>5</b>	<b>Richtlinien, Normen und Zulassungsprozesse .....</b>	<b>150</b>
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 Prüfen .....178**

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	Netzurückwirkungen 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** Prüfvorbereitungen .....241

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
<b>A</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>253</b>
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
	<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>259</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>264</b>
	<b>Index .....</b>	<b>268</b>