

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	33
2.4.1	Relative Pegel.....	34
2.4.2	Absolute Pegel.....	36

2.5	Schaltungskonzepte.....	38
2.5.1	Einfache Grundschialtung	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	49
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 EMV110

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 Dämpfung durch Kabelschirme	146

5 Richtlinien, Normen und Zulassungsprozesse150

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	153
5.2.2	Übersicht Normenreihe ISO 11452	153
5.2.3	Übersicht Normenreihe IEC 61000-3	155
5.2.4	Übersicht Normenreihe IEC 61000-4	155
5.2.5	Übersicht Normenreihe CISPR	156
5.2.6	Übersicht Normenreihe ISO 7637	156
5.2.7	Fachgrundnormen	159
5.2.8	Produktnormen	159
5.2.9	Akkreditierung von Laboren	160
5.2.10	Ausgabestände von Normen	160
5.2.11	Andere Dokumententypen aus der Normenwelt	161
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	164
5.4.1	Die Konformitätsvermutung	164
5.4.2	Rolle des Herstellers	165
5.4.3	Anwendung harmonisierter Normen	166
5.4.4	Dokumentenbewertung	166
5.4.5	Behördliche Aufsicht durch die BNetzA	167
5.5	Die Benannte Stelle	168
5.5.1	Rechtsgrundlage der Benannten Stelle	169
5.5.2	Nutzen für den Hersteller	169

5.5.3	Technischer Bericht der Benannten Stelle	169
5.5.4	Einschränkungen für den Betrieb	171
5.5.5	Erklärung der Benannten Stelle.....	171
5.5.6	Produktgruppenbildung	172
5.6	E-Kennzeichnung	172
5.6.1	Die Kraftfahrzeugrichtlinie	173
5.6.2	Rolle des Herstellers	174
5.6.3	Rolle des technischen Dienstes	174
5.6.4	Rolle der Behörden (KBA)	175
5.7	Elektromagnetische Umweltverträglichkeit	175

6 Messen und Prüfen177

6.1	Messkette bei Störaussendungsmessungen	178
6.1.1	Messwandler und Transducer	178
6.1.2	Oszilloskope	180
6.1.3	Messempfänger	183
6.1.4	Spektrumanalysator	184
6.1.5	Messleitungen.....	185
6.1.6	Netzwerkanalysator	188
6.1.7	Detektoren für Störaussendungsmessungen	189
6.1.8	Messzeiten für Störaussendungsmessungen	190
6.1.9	Bandbreiten für Störaussendungsmessungen	191
6.2	Messkette bei Störfestigkeitsmessungen	192
6.2.1	Signalgenerator	193
6.2.2	Modulationsarten	193
6.2.3	Verstärker	194
6.2.4	Messwandler	195
6.2.5	Funktionsprinzip einer Feldsonde	200
6.2.6	Monitoring der Messkette	201
6.2.7	Monitoring des Prüfmusters	202
6.2.8	Kalibrierung	203
6.2.9	Mehrpunktkalibrierungen.....	204
6.2.10	Messzeiten für Störfestigkeitsmessungen	205
6.2.11	Bewertung einer Störfestigkeitsmessung.....	205
6.3	Messung von sehr niederfrequenten Störaussendungen	206
6.3.1	Oberschwingungsströme	207
6.3.2	Flicker	208
6.3.3	Netzzrückwirkungen als Störfestigkeitsprüfung.....	208

6.4	Prüfungen der Impulsfestigkeit	209
6.4.1	Impulserzeugung	209
6.4.2	Frequenzbereichsbelegung von Impulsen	210
6.4.3	Koppelmechanismen für Impulsprüfungen	210
6.4.4	Gängige Impulsformen	211
6.4.5	Sehr langsame impulsartige Vorgänge (Wellenformen)	212
6.4.6	Elektrostatische Entladung (ESD)	213
6.4.7	Hochtesten bei Impulsprüfungen	215
6.4.8	Prüfzeiten bei Impulsprüfungen	215
6.5	Ein Messplatz für EMV-Prüfungen: Absorberhallen	216
6.5.1	Schirmung	217
6.5.2	Reflexionsdämpfung	218
6.5.3	Freiraum- und Freifeldhallen	219
6.5.4	Öffnungen in der Schirmung	222
6.5.5	Störquellen und -senken innerhalb der Absorberhalle	225
6.5.6	Reziprozität von Messwandlern	226
6.5.7	Messungen in der Absorberhalle	226
6.6	Schirmkabinen	230
6.7	Freifeldmessungen	234
6.8	Die Modenverwirbelungskammer	235
6.9	TEM-Zelle	236
6.9.1	Prinzip	236
6.9.2	Zellentypen	237

7 **Prüfvorbereitungen** **239**

7.1	Zeit- und Kostenbedarf einer EMV-Prüfung	239
7.1.1	Pre-Compliance-Tests im eigenen Betrieb	240
7.1.2	Compliance-Tests im eigenen Betrieb	240
7.1.3	Prüfungen bei einem externen Dienstleister	241
7.2	Die Auswahl eines Betriebszustandes	242
7.2.1	Anforderungen an die Repräsentanz	242
7.2.2	Anforderungen an die Stabilität	242
7.2.3	Anforderungen an die Software zum Betrieb des Prüflings	243
7.3	Anforderungen an die Peripherie	243
7.3.1	Peripherie bei Störaussendungsmessungen	244
7.3.2	Peripherie bei Störfestigkeitsmessungen	245
7.3.3	Peripherie im Prüfaufbau	245

7.4	Formulierung von Bewertungskriterien	245
7.4.1	Definition von Funktionsklassen und Toleranzen	245
7.4.2	Auswahl von sinnvollem Monitoring	246
7.5	Entstörung während der Prüfung	248
7.5.1	Identifikation des Problems	248
7.5.2	Modifikationen während einer Prüfreihe	249
7.5.3	Entstörungsmaßnahmen ohne Modifikation	250
7.5.4	Entstörungsmaßnahmen mit Modifikation	250

A	Anhang	251
A.1	Koordinatensysteme	251
A.1.1	Kartesisches Koordinatensystem	252
A.1.2	Zylinderkoordinatensystem	253
A.1.3	Kugelkoordinatensystem	254
A.2	Lineare und logarithmische Größen	255
A.3	Frequenzen und Wellenlängen	256

Formelzeichen und Abkürzungen	257
--	------------

Literatur	262
------------------------	------------

Index	266
--------------------	------------