

Hans A. Wolfsperger

Elektromagnetische Schirmung

Theorie und Praxisbeispiele

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Warum Schirmung?.....	1
1.1.1	Vorkommen elektromagnetischer Felder	1
1.1.2	Schirmung in der EMV	4
1.1.3	Schirmung in der EMVU	7
1.1.4	Schirmung zum Informationsschutz	10
1.1.5	Sonstige Anwendungen elektromagnetischer Schirmung	13
1.2	Abgrenzung des Begriffs <i>elektromagnetische Schirmung</i>	13
1.2.1	Nicht-elektromagnetische Felder, Wellen oder Strahlen	14
1.2.2	Elektromagnetische Strahlung, deren Abschirmung nicht zum Themengebiet <i>elektromagnetische Schirmung</i> gehört	16
2	Grundlagen und Begriffe	19
2.1	Der Feldbegriff.....	19
2.1.1	Die elektrische Feldstärke	20
2.1.2	Die elektrische Flussdichte	21
2.1.3	Die magnetische Flussdichte.....	22
2.1.4	Die magnetische Feldstärke	23
2.1.5	Die Materialgleichungen.....	24
2.1.6	Verhalten von elektrischen und magnetischen Feldern an Grenzflächen	26
2.2	Feldursachen	29

2.2.1	Ladungen als Ursache des elektrischen Feldes – der Satz vom H üllenfluss	30
2.2.2	Die Quellenfreiheit des magnetischen Feldes	38
2.2.3	Magnetische Wechselfelder als Ursache des elektrischen Feldes – das Induktionsgesetz	41
2.2.4	Ströme als Ursache des magnetischen Feldes – das Durchflutungsgesetz	48
2.2.5	Übersicht Material- und Maxwellgleichungen.....	52
2.3	Wellenausbreitung.....	53
2.3.1	Entstehung einer elektromagnetischen Welle	53
2.3.2	Ebene Welle	59
2.3.3	Harmonische Welle.....	63
2.3.4	Dämpfung und Absorption.....	65
2.3.5	Reflexion.....	67
2.4	Darstellung von Zeitverläufen im Frequenzbereich	72
2.4.1	Fourier-Reihenentwicklung	73
2.4.2	Fourier-Transformation.....	77
2.5	Begriffe der elektromagnetischen Schirmung	79
2.5.1	Pegel in dB	79
2.5.2	Schirmdämpfung, Schirmfaktor.....	83
2.5.3	Verweis auf weitere Begriffe der elektromagnetischen Schirmung	86
2.5.4	Begriffe der Kabelschirmung.....	86
3	Theorie der elektromagnetischen Schirmung	87
3.1	Feldtypen und deren Abschirmmechanismen	87
3.1.1	Das elektrostatische Feld – der elektrostatische Schirm	89
3.1.2	Das magnetostatische Feld – der magnetostatische Schirm	94
3.1.3	Das quasistationäre elektromagnetische Feld – der elektrodynamische Schirm	100
3.1.4	Elektromagnetische Wellen: Absorption, Reflexion und Transmission	134
3.2	Feldeinkopplung durch Öffnungen	174
3.2.1	Beschreibung der Feldeinkopplung mit Ersatzdipolen.....	176
3.2.2	Berechnung der Feldverteilung in perforierten Schirmen durch Dipol-Spiegelung.....	179

3.2.3	Schirmwirkung von Lochblechen und Drahtgeweben	192
3.2.4	Einkopplung von Feldern durch lange Schlitze	208
3.3	Theorie der Kabelschirmung	210
3.3.1	Die Kopplungsimpedanz.....	210
3.3.2	Die Kopplungsdadmittanz	219
3.3.3	Die Kopplungsdämpfung	220
3.3.4	Kopplungsimpedanz und Kopplungsdämpfung versus Schirmdämpfung.....	223
4	Praxis der elektromagnetischen Schirmung	227
4.1	Materialien und Materialeigenschaften	228
4.1.1	Materialien mit hoher Permeabilität zur Schirmung magnetostatischer Felder	230
4.1.2	Materialien mit hoher elektrischer Leitfähigkeit zur Schirmung von magnetischen Wechselfeldern und elektromagnetischen Wellen	233
4.1.3	Alternative Schirmungsmaterialien.....	235
4.1.4	Materialstärke	238
4.1.5	Leitfähigkeit, Permeabilität und Dielektrizität.....	248
4.1.6	Oberflächenverhalten und Korrosionsbeständigkeit.	249
4.2	Komponenten der elektromagnetischen Schirmung.....	252
4.2.1	HF-Dichtungen	252
4.2.2	Durchführung elektrischer Leitungen durch Schirme	267
4.2.3	Lichtwellenleiter-Durchführungen, Medienkonverter	281
4.2.4	Wabenkamineinsätze	282
4.2.5	Klebebänder	284
4.3	Gehäuseschirmung	284
4.3.1	Bauarten von Schirmgehäusen.....	286
4.3.2	IP-Schutz.....	291
4.3.3	Kontaktierung von Gehäuseteilen – Magnetfeldschirmung	294
4.3.4	Einfluss von Öffnungen	296
4.3.5	Schirmung von Luftzuführungen	299
4.3.6	Schirmung von Displays und Bedienelementen	300
4.3.7	Stromversorgung von geschirmten Gehäusen und Schränken.....	301

XIV Inhalt

4.4	Raumschirmung	302
4.4.1	Geschirmte Räume in Modulbauweise	303
4.4.2	Architektonische Raumschirmung.....	320
4.4.3	Geschweißte Schirmung	339
4.4.4	Schirmung auf den Außenwänden von Gebäuden....	340
4.4.5	Geschirmte Zelte	341
4.4.6	Schirmwirkung von Gebäuden.....	342
4.4.7	Magnetfeldschirmung von Räumen und Kabelrassen	344
4.4.8	Planung von Raumschirmungsprojekten	348
4.5	Kabelschirmung	367
4.5.1	Allgemeines zur Kabelschirmung	367
4.5.2	Koaxialkabel	368
4.5.3	Twisted-Pair Kabel / Datenkabel	374
4.5.4	Vergleich der Schirmwirkung unterschiedlicher Kabelschirme	377
4.5.5	Erdverbindung von Kabelschirmen	379
4.5.6	Geschirmte Steckverbinder	383
4.5.7	Metallschlüsse zur Schirmung von Kabeln und Kabelbündeln	385
5	Messverfahren und Normen	387
5.1	Messverfahren zur Bestimmung der Schirmdämpfung von Materialien (Intrinsic-Schirmdämpfung)	388
5.1.1	Dual-Chamber-Box nach ASTM-Norm.....	388
5.1.2	Transmission-Line-Holder nach ASTM bzw. NBS Norm	389
5.1.3	Doppel-TEM-Zelle	390
5.2	Genormte Verfahren zur Messung der Schirmdämpfung von Gehäusen	391
5.2.1	DIN EN 61000-5-7	392
5.2.2	DIN EN 61587-3	397
5.2.3	VG 95373-15	399
5.3	Genormte Verfahren zur Messung der Schirmdämpfung von geschirmten Räumen	402
5.3.1	IEEE 299	402
5.3.2	MIL-STD 285	406
5.3.3	DIN EN 50147	408

5.4	Genormte Verfahren zur Messung der Einfügungsdämpfung von Filtern.....	408
5.4.1	MIL-STD 220A	410
5.4.2	CISPR 17	410
5.5	Genormte Verfahren zur Messung der Schirmwirkung von Kabelschirmen, Schirmschläuchen und Verbindungssteckern.....	411
5.5.1	Triaxialmethode	413
5.5.2	Absorptions-Messwandlerzange	415
5.5.3	Strominjektion (Paralleldrahtverfahren)	417
5.6	Alternative Messverfahren	419
5.6.1	Schirmdämpfungsmessungen von Gehäusen in Modenverwirbelungskammern	420
5.6.2	Messung der Feldstärken an metallischen Oberflächen mit elektrisch kleinen Oberflächenstromsensoren.....	422
5.6.3	Automatisierte Messung der Feldverteilung in Gehäusen.....	423
5.6.4	Messung der Schirmdämpfung mit Strominjektion ..	425
6	Anwendungen elektromagnetischer Schirme	433
6.1	Der Schirm als EMV-Entstörmittel.....	433
6.1.1	EMV-Normung	434
6.1.2	HF-Schirmung zur Verbesserung des EMV-Verhaltens	439
6.1.3	Schirmung quasistatischer Magnetfelder zur Verbesserung des EMV-Verhaltens.....	442
6.1.4	Schirmung und Blitzschutz.....	444
6.2	Einsatz elektromagnetischer Schirme zum Schutz des Menschen	450
6.2.1	EMVU-Normung	450
6.2.2	Maßnahmen zur Einhaltung von EMVU-Grenzwerten	458
6.3	Einsatz elektromagnetischer Schirme in der Medizintechnik.....	460
6.4	Elektromagnetische Schirmung zum Informationsschutz ...	461
6.4.1	Abhörschutz	462
6.4.2	Abstrahlschutz (TEMPEST)	465

XVI Inhalt

6.4.3	Funktionsüberwachung der Raumschirmung.....	466
6.5	Schutz gegen EMP und vorsätzliche elektromagnetische Beeinflussung.....	467
6.5.1	Elektromagnetische Pulse (EMP)	467
6.5.2	HPM- / EMP-Bedrohungsszenarien.....	470
6.5.3	HPM- / EMP-Schutz	472
6.5.4	Normung des EMP-Schutz	474
7	Literaturverzeichnis.....	477
8	Stichwortverzeichnis	495