

Hans A. Wolfsperger

# Elektromagnetische Schirmung

Theorie und Praxisbeispiele

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Begriffe .....</b>	<b>19</b>
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 Hüllenfluss .....	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
<b>3</b>	<b>Theorie der elektromagnetischen Schirmung .....</b>	<b>87</b>
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 Kopplungsadmittanz .....	219
3.3.3	Die Kopplungsdämpfung .....	220
3.3.4	Kopplungsimpedanz und Kopplungsdämpfung versus Schirmdämpfung .....	223
<b>4</b>	<b>Praxis der elektromagnetischen Schirmung .....</b>	<b>227</b>
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

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 Kabeltrassen .....	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	Metallschläuche zur Schirmung von Kabeln und Kabelbündeln .....	385
<b>5</b>	<b>Messverfahren und Normen .....</b>	<b>387</b>
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
<b>6</b>	<b>Anwendungen elektromagnetischer Schirme .....</b>	<b>433</b>
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	Abstrahlenschutz (TEMPEST) .....	465

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	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>477</b>
8	<b>Stichwortverzeichnis.....</b>	<b>495</b>