

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Übersicht	1
1.1	Zu den im Buch aufgeführten Programmen	5
1.2	Zu den Abbildungen des Buches	5
2	Das Denken in Spannungen, Strömen, Feldern und Impedanzen.....	7
3	Elektrische Felder	17
3.1	Wirkung elektrischer Felder und ihre Berechnung	19
4	Magnetische Felder	27
4.1	Wirkung magnetischer Felder.....	27
4.2	Berechnung der magnetischen Feldstärke von Ein- und Mehrleitern	29
4.3	Magnetfelder von Geofoltrafos.....	31
4.4	Magnetische Streufelder beliebiger Anordnungen dünner Drähte	32
4.4.1	Magnetfeld einer Vierleiteranordnung	33
4.4.2	Magnetfeld eines verdrillten Kabels.....	34
4.4.3	Beispiel für die Berechnung mit dem mitgelieferten Programm	36
4.4.4	Besonderheiten von Magnetfeldern verdrillter Kabel	38
5	Elektromagnetische Felder	41
5.1	Wirkung elektromagnetischer Felder	45
5.2	Die Elementardipole	49
5.2.1	Abstandsumrechnung	56
5.2.2	Die Feldwellenwiderstände	60
5.3	Effektive Höhe, wirksame Fläche und Strahlungswiderstand	62
5.4	Feldstärkeabschätzungen für Flächenantennen	69
5.4.1	Leistungsdichte und elektrische Feldstärke im Fernfeld	70
5.4.2	Leistungsdichte und elektrische Feldstärke im Nahfeld.....	71
5.4.3	Quellcode des Programms APERTUR.....	73

6	Das Beeinflussungsmodell	75
6.1	Galvanische Kopplung	82
6.1.1	Maßnahmen gegen eine galvanische Beeinflussung bzw. Kopplung	84
6.2	Kapazitive Kopplung	86
6.2.1	Maßnahmen zur Verringerung der kapazitiven Kopplung	88
6.3	Induktive Kopplung	90
6.3.1	Magnetische Entkopplung	92
6.3.2	Definition einer effektiven Gegeninduktivität für Mehrphasenkabel	93
6.3.3	Maßnahmen zur Verringerung der induktiven Kopplung	96
6.4	Elektromagnetische Kopplung	98
6.4.1	Maßnahmen zur Verringerung der elektromagnetischen Kopplung	99
6.4.2	Das $\lambda/2$ -Kopplungsmodell	100
6.4.3	Zur Abschätzung der elektromagnetischen Kopplung	103
7	Intrasytemmaßnahmen.....	111
7.1	Allgemeines zur Massung, Schirmung, Verkabelung und Filterung	113
7.1.1	Massung	113
7.1.2	Schirmung	114
7.1.3	Verkabelung	116
7.1.4	Filterung	119
7.2	Schirmung gegen elektrische Felder – Gitterschirme	128
7.3	Schirmung gegen Magnetfelder	130
7.3.1	Schirmung gegen magnetische Gleichfelder und sehr niederfrequente Felder	130
7.3.2	Schirmung gegen mittelfrequente magnetische Felder	137
7.3.3	Zwei Parallelle Platten gegen magnetische Wechselfelder	137
7.3.4	Hohlkugel gegen Magnetfelder	138
7.3.5	Hohlzylinder im magnetischen Querfeld	138
7.3.6	Hohlzylinder im magnetischen Längsfeld	139
7.4	Schirmung nach Schelkunoff – kurz und knapp	141
7.4.1	Quellcode des Programms SCHIRM	145
7.5	Leckagen, Durchgriffe, Hohlraumresonanzen	160
7.5.1	Leckagen, Durchgriffe	162
7.5.2	Niederfrequente Resonanzen; Hohlraumresonanzen	169

7.6	Kabelkopplung und Kabeltransferimpedanz	173
7.6.1	Kabelkopplung	174
7.6.2	Einkopplung in verdrillte und unverdrillte Zweileiter hinein	176
7.6.3	Ein- und Überkopplung bei geschirmten Leitungen	178
7.6.3.1	Berechnung der Einkopplung.....	178
7.6.4	Kabelschirmauflegung am Geräteeingang	200
8	Natürliche Rauschquellen, elektromagnetische Umwelt und Grenzwerte.....	205
8.1	Natürliche Rauschquellen, elektromagnetische Umwelt	206
8.2	Umrechnung von Grenzwerten.....	217
8.2.1	Abstandsumrechnung	217
8.2.2	Umrechnung $E \rightarrow H$ und $H \rightarrow E$	219
9	EMV-Planung und Analysen	225
9.1	Entstehungsphasen eines komplexen Systems	227
9.1.1	Konzeptphase	227
9.1.2	Definitionsphase.....	228
9.1.3	Konstruktions- und Bauphase	230
9.2	EMV- Prüfplanung	232
9.3	Durchführung von Analysen.....	240
10	Numerische Verfahren zur Feldberechnung.....	245
10.1	Zur Auswahl des geeigneten Verfahrens	247
10.2	Plausibilitätskontrollen	253
10.3	Analysebeispiele	263
10.3.1	Resonanzuntersuchungen an einem PKW	263
10.3.2	Einfluss des Dielektrikums auf die Abstrahlung von einer Platine (PCB = printed circuit board).....	265
10.3.3	Abstrahlungen von einem Mobiltelefon.....	265
10.3.4	Elektromagnetisches Feld auf einer Fregatte	266
10.4	Hinweise zum Einsatz numerischer Verfahren.....	268
10.5	Anwendung: Antennenkopplung	273
10.5.1	Allgemeines zur N-Tor-Theorie	273
10.5.2	Zweitorparameter	274
10.5.3	Berechnung einer Antennenkopplung	276
10.5.4	Quellcode des Programms ANPASS	281
11	Modellierung und Bewertung von Störfestigkeitsnachweisen ...	283
11.1	Standardisierte Störfestigkeitsnachweise.....	284
11.2	Statistische Modellierung der Störfestigkeit.....	286
11.2.1	Störwahrscheinlichkeit	287

11.2.2	Störverhaltensfunktion	290
11.2.3	Interpretation von Störfestigkeitsnachweisen	293
11.3	Zeitvariante Störfestigkeit	294
11.3.1	Modellierung	295
11.3.2	Verhalten von Mikroprozessorschaltungen	300
A1	Elektrische Felder von Stabanordnungen	303
A1.1	Potentialkoeffizienten und Teilkapazitäten	304
A1.2	Potentiale, elektrische Feldstärken und Teilkapazitäten von Horizontalleitern	305
A1.2.1	Quellcode des Programms HLEITER	311
A1.3	Potentiale, elektrische Feldstärken und Teilkapazitäten von endlich langen Vertikalstäben	315
A1.3.1	Quellcode des Programms VSTAB	320
A2	Magnetische Streufelder	325
A2.1	Streufeldarme Verlegung	325
A2.1.1	Das Einleiterkabel (Fall a aus 4.2)	325
A2.1.2	Kabel mit einem Hin- und einem Rückleiter (Fall b aus 4.2)	326
A2.1.3	Verwendung von zwei Hin- und zwei Rückleitern (Fall c1 aus Kap. 4.2)	327
A2.1.4	Verlegung von Hin- und Rückleiter über einer Massefläche (Fall c2 aus Kap. 4.2)	328
A2.1.5	Verwendung von vier Hin- und vier Rückleitern (Fall d aus Kap. 4.2)	329
A2.2	Rechenprogramm zur Bestimmung magnetischer Streufelder	330
A2.2.1	Feld eines endlich langen Drahtes	330
A2.2.2	Feld einer einlagigen Spule	332
A2.2.3	Berücksichtigung von Phasenbeziehungen	336
A2.2.4	Quellcode des Programms SFELD	338
A3	Eigen- und Gegeninduktivitäten	359
A3.1	Gegeninduktivität zwischen einem endlich langen Leiter auf der y- Achse und einer Trapezfläche in der xy- Ebene	359
A3.2	Zerlegung einer durch Geraden begrenzten Fläche in der xy- Ebene	361
A3.3	Behandlung von beliebigen Leiterschleifen im Raum	363
A3.4	Gegeninduktivität zwischen 2 Kreisschleifen mit seitlicher Verschiebung	365
A3.5	Quellcode des Programms GEGEN	367

A4 Elementardipole	381
A4.1 Hertzscher Dipol.....	381
A4.2 Stromschleife (Rahmenantenne).....	386
A4.3 Gegenüberstellung der Wellenimpedanzen	392
A5 Die Polarisationsellipse.....	393
A5.1 Zweidimensionaler Fall ($E_z=0$)	394
A5.2 Dreidimensionaler Fall – Lösungen im Zeitbereich	396
5.2.1 Betrachtungen zur Ebene der Polarisationsellipse ..	399
A5.3 Dreidimensionaler Fall – Lösungen im Bildbereich.....	406
A6 Skineffekt und Schirmungstheorie von Schelkunoff	409
A6.1 Skineffekt beim leitfähigen Halbraum.....	409
A6.1.1 Starker Skineffekt.....	411
A6.1.2 Schwacher Skineffekt.....	411
A6.2 Schirmungstheorie nach Schelkunoff	412
A6.2.1 Einleitung	412
A6.2.2 Notwendige Gleichungen	412
A6.2.3 Schirmungsmechanismus	413
A6.2.4 Schirmdämpfung	415
A6.2.5 Einfache Anwendung von Schelkunoff's Theorie ..	416
A6.2.6 Verfahren zur grafischen Bestimmung der Schirmdämpfung	418
A6.2.7 Fehlerbetrachtungen	422
A6.2.8 Zusammenfassung	423
A7 Muster einer EMV- Designrichtlinie für Systeme	425
A7.1 Massung, Erdung	425
A7.2 Systemfilterung.....	427
A7.3 Schirmung.....	427
A7.4 Verkabelung.....	428
A8 25 Regeln für den EMV-gerechten Platinen- und Geräteaufbau	433
A9 Einfache Bestimmung von Kabeltransferimpedanzen	441
A9.1 Bestimmung des Spannungsverhältnisses mit einem Oszilloskop	445
A9.2 Bestimmung des Verhältnisses mit einem Netzwerkanalysator	447
A10 Kapazitäten und Induktivitäten einiger grundsätzlicher Anordnungen.....	453

A11 Berichte von elektromagnetischen Unverträglichkeiten	461
A12 Lösungen der Aufgaben	465
A13 Physikalische Konstanten und Umrechnungsbeziehungen.....	483
A13.1 Physikalische Größen und Konstanten	483
A13.2 Umrechnungstabelle Druck	484
A13.3 Umrechnungstabelle Energie.....	485
A13.4 Umrechnung für elektrische und magnetische Größen.....	485
A13.5 Umrechnung logarithmischer Größen	486
A13.6 Abkürzungen	487
A14 Literaturverzeichnis	489
14.1 Literatur zum Kapitel 11.....	492
Sachverzeichnis	493