

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                                                    |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung in die Elektromagnetische Verträglichkeit.....</b>                                                   | <b>1</b>  |
| 1.1      | Elektromagnetische Verträglichkeit, Elektromagnetische Beeinflussung.....                                          | 1         |
| 1.2      | Störpegel – Störabstand – Grenzstörpegel – Stördämpfung.....                                                       | 7         |
| 1.2.1    | Logarithmierte bezogene Systemgrößen - Pegel.....                                                                  | 8         |
| 1.2.2    | Störpegel und Störabstand.....                                                                                     | 13        |
| 1.2.3    | Statische und dynamische Störabstände digitaler Schaltkreise .....                                                 | 16        |
| 1.2.4    | Grenzstörpegel für Emissionen.....                                                                                 | 20        |
| 1.2.5    | Prüfpegel für Immissionen .....                                                                                    | 23        |
| 1.2.6    | Stördämpfung.....                                                                                                  | 24        |
| 1.3      | Natur der elektromagnetischen Beeinflussungen und ihrer Übertragungswege.....                                      | 25        |
| 1.4      | Gegentakt- und Gleichtaktstörungen.....                                                                            | 30        |
| 1.5      | Erde und Masse .....                                                                                               | 37        |
| 1.5.1    | Erde.....                                                                                                          | 39        |
| 1.5.2    | Masse .....                                                                                                        | 41        |
| 1.6      | Beschreibung elektromagnetischer Beeinflussungen im Zeit- und<br>Frequenzbereich .....                             | 44        |
| 1.6.1    | Darstellung periodischer Zeitbereichsfunktionen im<br>Frequenzbereich durch eine Fourier-Reihe.....                | 45        |
| 1.6.2    | Darstellung <i>nicht</i> periodischer Zeitbereichsfunktionen im<br>Frequenzbereich – <i>Fourier-Integral</i> ..... | 51        |
| 1.6.3    | EMV-Tafel .....                                                                                                    | 55        |
| 1.6.3.1  | Übergang vom Zeitbereich in den Frequenzbereich .....                                                              | 55        |
| 1.6.3.2  | Rückkehr vom Frequenzbereich in den Zeitbereich .....                                                              | 58        |
| 1.6.3.3  | Berücksichtigung des Übertragungswegs .....                                                                        | 61        |
| <b>2</b> | <b>Störquellen .....</b>                                                                                           | <b>63</b> |
| 2.1      | Klassifizierung von Störquellen.....                                                                               | 65        |
| 2.2      | Schmalbandige Störquellen.....                                                                                     | 67        |
| 2.2.1    | Kommunikationssender.....                                                                                          | 67        |
| 2.2.2    | HF - Generatoren für Industrie, Forschung, Medizin und Haushalt.....                                               | 71        |

|          |                                                                           |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.2.3    | Funkempfänger – Bildschirmgeräte Rechnerysteme –<br>Schaltnetzteile ..... | 73         |
| 2.2.4    | Netzzrückwirkungen.....                                                   | 74         |
| 2.2.5    | Beeinflussungen durch Starkstromleitungen .....                           | 75         |
| 2.3      | Intermittierende Breitbandstörungen.....                                  | 76         |
| 2.3.1    | Grundstörmpegel in Städten.....                                           | 76         |
| 2.3.2    | KFZ-Zündanlagen .....                                                     | 76         |
| 2.3.3    | Gasentladungslampen.....                                                  | 78         |
| 2.3.4    | Kommutatormotoren.....                                                    | 79         |
| 2.3.5    | Hochspannungsfreileitungen .....                                          | 80         |
| 2.4      | Transiente Breitbandstörungen.....                                        | 81         |
| 2.4.1    | Elektrostatische Entladungen .....                                        | 81         |
| 2.4.2    | Geschaltete Induktivitäten .....                                          | 85         |
| 2.4.3    | Transienten in Niederspannungsnetzen .....                                | 88         |
| 2.4.4    | Transienten in Hochspannungsnetzen.....                                   | 88         |
| 2.4.5    | Transienten in der Hochspannungsprüftechnik und Plasmaphysik.....         | 92         |
| 2.4.6    | Blitze - LEMP.....                                                        | 92         |
| 2.4.7    | Nuklearer elektromagnetischer Puls - NEMP.....                            | 93         |
| 2.5      | Umgebungsklassen.....                                                     | 95         |
| 2.5.1    | Leitungsgebundene Störungen.....                                          | 95         |
| 2.5.2    | Störstrahlung .....                                                       | 97         |
| <b>3</b> | <b>Koppelmechanismen und Gegenmaßnahmen .....</b>                         | <b>99</b>  |
| 3.1      | Galvanische Kopplung.....                                                 | 99         |
| 3.1.1    | Galvanische Kopplung von Betriebsstromkreisen .....                       | 100        |
| 3.1.2    | Erdschleifen .....                                                        | 105        |
| 3.1.3    | Kopplungsimpedanz von Mess- und Signalleitungen.....                      | 118        |
| 3.1.4    | Rückwärtiger Überslag.....                                                | 125        |
| 3.2      | Kapazitive Kopplung.....                                                  | 126        |
| 3.3      | Induktive Kopplung .....                                                  | 129        |
| 3.4      | Elektromagnetische Leitungskopplung.....                                  | 134        |
| 3.4.1    | Elektromagnetische Kopplung zweier Leitungen.....                         | 135        |
| 3.4.2    | Elektromagnetisch gekoppelte Mehrleitersysteme .....                      | 138        |
| 3.5      | Strahlungskopplung.....                                                   | 142        |
| 3.5.1    | Abstrahlung durch Gleichtaktströme.....                                   | 147        |
| 3.5.2    | Abstrahlung durch Gegentaktströme .....                                   | 148        |
| 3.6      | Erdung von Kabelschirmen .....                                            | 149        |
| 3.7      | Identifikation von Kopplungsmechanismen .....                             | 151        |
| 3.8      | Beschreibung von Kopplungsmechanismen mit Hilfe numerischer Methoden..... | 154        |
| <b>4</b> | <b>Passive Entstörkomponenten .....</b>                                   | <b>157</b> |
| 4.1      | Filter.....                                                               | 157        |

|          |                                                          |            |
|----------|----------------------------------------------------------|------------|
| 4.1.1    | Wirkungsprinzip – Filterdämpfung .....                   | 157        |
| 4.1.2    | Filter für Gleich- und Gegentaktstörungen .....          | 161        |
| 4.1.3    | Filterresonanzen .....                                   | 163        |
| 4.1.4    | Dissipative Dielektrika und Magnetika .....              | 165        |
| 4.1.5    | Filterbauformen .....                                    | 168        |
| 4.1.5.1  | Kondensatoren .....                                      | 168        |
| 4.1.5.2  | Drosseln .....                                           | 170        |
| 4.1.5.3  | LC-Filter .....                                          | 173        |
| 4.2      | Überspannungsableiter .....                              | 177        |
| 4.2.1    | Varistoren .....                                         | 178        |
| 4.2.2    | Silizium-Lawinendioden .....                             | 182        |
| 4.2.3    | Funkenstrecken .....                                     | 183        |
| 4.2.4    | Hybrid-Ableiterschaltungen .....                         | 186        |
| 4.3      | Optokoppler und Lichtleiterstrecken .....                | 188        |
| 4.4      | Trenntransformatoren .....                               | 190        |
| <b>5</b> | <b>Elektromagnetische Schirme.....</b>                   | <b>195</b> |
| 5.1      | Natur der Schirmwirkung – Nahfeld, Fernfeld.....         | 195        |
| 5.2      | Schirmung statischer Felder .....                        | 205        |
| 5.2.1    | Elektrostatische Felder.....                             | 205        |
| 5.2.2    | Magnetostatische Felder .....                            | 206        |
| 5.3      | Schirmung quasistatischer Felder .....                   | 207        |
| 5.3.1    | Elektrische Wechselfelder .....                          | 207        |
| 5.3.2    | Magnetische Wechselfelder.....                           | 208        |
| 5.4      | Schirmung elektromagnetischer Wellen.....                | 210        |
| 5.5      | Schirmmaterialien .....                                  | 211        |
| 5.6      | Schirmzubehör .....                                      | 214        |
| 5.6.1    | Dichtungen für Schirmfugen .....                         | 214        |
| 5.6.2    | Kamindurchführungen, Wabenkaminfenster, Lochbleche ..... | 216        |
| 5.6.3    | Netzfilter und Erdung .....                              | 218        |
| 5.7      | Geschirmte Räume für messtechnische Anwendungen .....    | 219        |
| 5.7.1    | Reflexionsarme Schirmräume – Absorberräume.....          | 220        |
| 5.7.2    | Modenverwirbelungskammern.....                           | 222        |
| 5.7.3    | TEM-Messzellen .....                                     | 228        |
| 5.7.4    | GTEM-Zellen .....                                        | 229        |
| <b>6</b> | <b>Theorie elektromagnetischer Schirme.....</b>          | <b>233</b> |
| 6.1      | Analytische Schirmberechnung .....                       | 234        |
| 6.1.1    | Theoretische Grundlagen .....                            | 234        |
| 6.1.2    | Zylinderschirm im longitudinalen Feld .....              | 237        |
| 6.1.3    | Zylinderschirm im transversalen Feld .....               | 244        |
| 6.1.4    | Zylinderschirm im elektromagnetischen Wellenfeld.....    | 251        |

|          |                                                                                              |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.1.5    | Kugelschirm im elektromagnetischen Wellenfeld .....                                          | 260        |
| 6.2      | Impedanzkonzept .....                                                                        | 262        |
| 6.2.1    | Klassische Betrachtungsweise .....                                                           | 262        |
| 6.2.1.1  | Reflexionsdämpfung .....                                                                     | 264        |
| 6.2.1.2  | Absorptionsdämpfung .....                                                                    | 267        |
| 6.2.1.3  | Dämpfungskorrektur für multiple Reflexionen .....                                            | 268        |
| 6.2.2    | Erweitertes Impedanzkonzept .....                                                            | 269        |
| 6.2.3    | Zusammenfassung des Impedanzkonzepts .....                                                   | 276        |
| <b>7</b> | <b>EMV-Emissionsmesstechnik .....</b>                                                        | <b>279</b> |
| 7.1      | Messung von Störspannungen und -strömen .....                                                | 280        |
| 7.2      | Messung von Störfeldstärken .....                                                            | 287        |
| 7.2.1    | Antennen .....                                                                               | 287        |
| 7.2.1.1  | E-Feld Antennen .....                                                                        | 287        |
| 7.2.1.2  | Breitbandantennen .....                                                                      | 290        |
| 7.2.1.3  | H-Feld Antennen .....                                                                        | 293        |
| 7.2.1.4  | Schnüffelanntenen .....                                                                      | 294        |
| 7.2.1.5  | Feldsonden .....                                                                             | 295        |
| 7.2.1.6  | Antennen-Symmetrierübertrager .....                                                          | 295        |
| 7.2.2    | Messgelände und Messplätze .....                                                             | 297        |
| 7.3      | Messung von Störleistungen .....                                                             | 303        |
| 7.4      | EMB-Messgeräte .....                                                                         | 304        |
| 7.4.1    | Störmessempfänger .....                                                                      | 305        |
| 7.4.1.1  | Spitzenwertanzeige .....                                                                     | 306        |
| 7.4.1.2  | Quasi-Spitzenwertanzeige .....                                                               | 307        |
| 7.4.1.3  | Mittelwertanzeige .....                                                                      | 310        |
| 7.4.1.4  | Effektivwertanzeige .....                                                                    | 311        |
| 7.4.1.5  | Einfluss der Empfängerbandbreite auf die Anzeige von<br>Schmal- und Breitbandstörungen ..... | 313        |
| 7.4.2    | Spektrumanalysatoren .....                                                                   | 315        |
| 7.5      | Messunsicherheit in der EMV .....                                                            | 316        |
| 7.6      | Automatisierte EMV-Messplätze .....                                                          | 320        |
| <b>8</b> | <b>EMV-Störfestigkeitsprüftechnik .....</b>                                                  | <b>323</b> |
| 8.1      | Simulation leitungsgebundener Störgrößen .....                                               | 324        |
| 8.1.1    | Simulation von Niederfrequenzstörungen in<br>Niederspannungsnetzen (ms-Impulse) .....        | 327        |
| 8.1.2    | Simulation breitbandiger energiearmer Schaltspannungsstörungen<br>(Burst) .....              | 328        |
| 8.1.3    | Simulation breitbandiger energiereicher Überspannungen<br>(Hybridgenerator) .....            | 331        |
| 8.1.4    | Simulatoren für elektrostatische Entladungen (ESD) .....                                     | 337        |

|           |                                                                                                |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.1.5     | Simulation schmalbandiger Störungen.....                                                       | 341        |
| 8.1.6     | Kommerzielle Geräte .....                                                                      | 342        |
| 8.2       | Simulation quasistatischer Felder und elektromagnetischer Wellen .....                         | 345        |
| 8.2.1     | Simulation schmalbandiger Störfelder .....                                                     | 345        |
| 8.2.1.1   | Spezialantennen, offene und geschlossene Wellenleiter.....                                     | 347        |
| 8.2.1.2   | Verstärker .....                                                                               | 352        |
| 8.2.2     | Simulation breitbandiger elektromagnetischer Wellenfelder .....                                | 353        |
| 8.2.3     | Simulation quasistatischer Felder und elektromagnetischer Wellen<br>durch Strominjektion ..... | 355        |
| 8.2.3.1   | Strominjektionsprüfungen an Kabeln und Gehäuseschirmen .....                                   | 356        |
| 8.2.3.2   | Prüfung der Störempfindlichkeit von Geräten durch<br>Strominjektion in deren Kabelbäume.....   | 357        |
| <b>9</b>  | <b>EMV-Entstörmittelmessungen .....</b>                                                        | <b>359</b> |
| 9.1       | Schirmdämpfung von Kabelschirmen.....                                                          | 359        |
| 9.1.1     | Schirmdämpfung für quasistatische Magnetfelder<br>( <i>Kopplungsimpedanz</i> ) .....           | 359        |
| 9.1.2     | Schirmdämpfung für quasistatische elektrische Felder ( <i>Transfer-<br/>Admittanz</i> ).....   | 361        |
| 9.1.3     | Schirmdämpfung für elektromagnetische Wellen ( <i>Schirmungsmaß</i> ) .....                    | 362        |
| 9.2       | Schirmdämpfung von Gerätegehäusen und Schirmräumen .....                                       | 363        |
| 9.3       | Intrinsic-Schirmdämpfung von Schirmmaterialien.....                                            | 370        |
| 9.3.1     | Koaxiale TEM-Messzelle mit durchgehendem Innenleiter .....                                     | 370        |
| 9.3.2     | Koaxiale TEM-Messzelle mit gestoßenem Innenleiter.....                                         | 371        |
| 9.3.3     | Doppel TEM-Messzelle.....                                                                      | 372        |
| 9.4       | Schirmdämpfung von Dichtungen.....                                                             | 374        |
| 9.5       | Reflexionsdämpfung von Absorberwänden .....                                                    | 376        |
| 9.6       | Filterdämpfung.....                                                                            | 379        |
| <b>10</b> | <b>Repräsentative EMV-Probleme .....</b>                                                       | <b>383</b> |
| 10.1      | Entstörung von Magnetspulen.....                                                               | 383        |
| 10.1.1    | Beschaltung gleichstrombetriebener Magnetspulen .....                                          | 384        |
| 10.1.2    | Beschaltung wechselstrombetriebener Magnetspulen.....                                          | 385        |
| 10.2      | Funkentstörung von Universalmotoren.....                                                       | 386        |
| 10.3      | Elektrostatische Entladungen .....                                                             | 389        |
| 10.4      | Netzurückwirkungen .....                                                                       | 391        |
| 10.5      | Blitzschutz – Blitzschutz-zonen-Konzept.....                                                   | 393        |
| 10.6      | Pulse Power Technik – Hochspannungslaboratorien .....                                          | 395        |
| 10.7      | Messungen mit Differenzverstärkern .....                                                       | 403        |
| 10.8      | EMV gerechter Schaltschrankbau in der Automatisierungstechnik .....                            | 405        |
| 10.9      | EMV in der Medizintechnik .....                                                                | 409        |
| 10.10     | Wirkung elektromagnetischer Felder auf Organismen .....                                        | 412        |

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.11 Analyse von EMV-Problemen komplexer Systeme .....                  | 418        |
| <b>11 EMV gerechter Entwurf elektronischer Baugruppen .....</b>          | <b>421</b> |
| 11.1 Leiterplattenwahl .....                                             | 421        |
| 11.2 Intrasystem-Beeinflussungen .....                                   | 426        |
| 11.2.1 Störsignalverkopplungen über gemeinsame Impedanzen .....          | 426        |
| 11.2.1.1 Ausführung der Stromversorgungsleitungen .....                  | 426        |
| 11.2.1.2 Stützung der Versorgungsspannung .....                          | 427        |
| 11.2.1.3 Gestaltung der Schaltungsmasse .....                            | 430        |
| 11.2.2 Übersprechen zwischen parallelen Leiterbahnen .....               | 433        |
| 11.2.2.1 Nebensprechen und Gegensprechen .....                           | 433        |
| 11.2.2.2 Allgemeine Maßnahmen zur Reduzierung des<br>Übersprechens ..... | 436        |
| 11.2.3 Signalreflexionen auf langen Leitungen .....                      | 438        |
| 11.2.3.1 Vermeidung von Reflexionen durch Leitungsführung .....          | 439        |
| 11.2.3.2 Anpassnetzwerke .....                                           | 442        |
| 11.3 Intersystem-Beeinflussung durch Störabstrahlung .....               | 444        |
| 11.3.1 Abstrahlung von Signalstromschleifen .....                        | 444        |
| 11.3.2 Abstrahlungsprobleme bei hochintegrierten Schaltungen .....       | 446        |
| 11.3.3 Maßnahmen an Störquellen .....                                    | 449        |
| <b>12 EMV-Normung .....</b>                                              | <b>453</b> |
| 12.1 Einführung in das EMV-Vorschriftenwesen .....                       | 453        |
| 12.2 EMV-Normungsgremien .....                                           | 454        |
| 12.3 Rechtliche Grundlagen der EMV-Normung .....                         | 458        |
| 12.4 Nachweis der Konformität mit dem EMV-Gesetz .....                   | 462        |
| 12.5 Benannte Stellen .....                                              | 468        |
| 12.6 EMV-Normen .....                                                    | 470        |
| 12.6.1 EMV-Normen nach Problemkreisen geordnet .....                     | 471        |
| 12.6.2 EMV-Normen nach Europeanormen geordnet .....                      | 483        |
| 12.7 Wichtige Anschriften .....                                          | 492        |
| <b>Literatur .....</b>                                                   | <b>495</b> |
| <b>Index .....</b>                                                       | <b>521</b> |