

HANSER



Leseprobe

zu

Elektromagnetische Verträglichkeit

von Frank Gustrau und Holger Kellerbauer

Print-ISBN 978-3-446-47276-1

E-Book-ISBN 978-3-446-47329-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446472761>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Das vorliegende Lehr- und Praxisbuch bietet Studierenden und Ingenieurinnen und Ingenieuren einen praxisnahen Einstieg in die Disziplin der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV), deren Ziel es ist, den störungsfreien Betrieb elektrischer und elektronischer Geräte untereinander zu gewährleisten.

Bei der Entwicklung eines technischen Produktes gilt der Funktion des Gerätes nicht das alleinige Augenmerk. Die Vermeidung möglicher Wechselwirkungen mit anderen Geräten ist ein weiteres wichtiges Entwicklungsziel. Dazu müssen die Schaltungen und Geräte zum einen so entworfen werden, dass die an die Umgebung abgegebenen Störsignale gewisse Grenzwerte nicht überschreiten. Andererseits sollen auch Störungen, die in der Umgebung der Schaltung existieren, das Schaltungsverhalten nicht unzulässig beeinflussen. Diese Eigenschaften ergeben sich bei einem technischen Entwurf nicht zwangsläufig, und eine nachträgliche Berücksichtigung ist in der Regel sehr unwirtschaftlich. Es ist daher entscheidend, das Wissen über die elektromagnetische Verträglichkeit schon im Anfangsstadium der Entwicklung von Geräten und Schaltungen mit einfließen zu lassen.

Die elektromagnetische Verträglichkeit ist kein eigenständiges Fachgebiet, sondern sie durchzieht als horizontale Disziplin nahezu alle Bereiche der Elektrotechnik und Elektronik. Sie betrifft gleichermaßen energietechnische Anlagen mit ihren großen Strömen, hohen Spannungen und niedrigen Frequenzen wie auch mikroelektronische Schaltungen mit ihren kleinen Strömen, niedrigen Spannungen und hohen Frequenzen. Je nach Anwendungsszenario lassen sich die auftretenden Störphänomene auf unterschiedlich komplexe Beschreibungen zurückführen. Den meisten Ingenieurinnen und Ingenieuren sind Beschreibungen durch Ersatzschaltbilder mit konzentrierten Elementen angenehm, weil sie im Studium und Berufsleben damit vielfältige Erfahrung gesammelt haben und im Umgang mit diesen Methoden vertraut sind. Es liegt aber in der Natur elektromagnetischer Phänomene, dass sie sich oft nicht auf Ersatzschaltbilder reduzieren lassen, sondern eine feldtheoretische Betrachtung notwendig machen. Das gilt insbesondere für den Bereich höherer Frequenzen, wo es zu Resonanzen und Abstrahlungserscheinungen kommen kann. Mit der Behandlung feldtheoretischer Probleme haben die meisten Ingenieurinnen und Ingenieure in der Regel weniger Erfahrung gemacht. Die Maxwell'schen Gleichungen liefern die vollständigen mathematischen Grundlagen, wenn es um die Analyse der räumlichen Ausbreitung von Störsignalen geht. Durch den Einsatz moderner 3D-CAD-Feldsimulationssoftware und leistungsstarker PC-Arbeitsplatzrechner ist es aber möglich geworden, komplexe praxisrelevante Szenarien zu analysieren und zu optimieren. Da dieser Ansatz bei der zunehmenden Integration der Komponenten immer wichtiger wird, werden wir in einigen Beispielen die Anwendung solcher Softwarepakete demonstrieren. Die Verwendung von 3D-Feldsimulationsprogrammen stellt somit einen Schwerpunkt dieses Buches dar.

Ein weiterer Schwerpunkt des Buches liegt auf der detaillierten Darstellung von EMV-Prüfungen und Zulassungsverfahren. Während die technisch ausgebildete Ingenieurin und der technisch ausgebildete Ingenieur bei den EMV-Messverfahren in der Regel schnell einen inhalt-

lichen Zugang findet, ist er gerade bei Zulassungsfragen und -abläufen oft ratlos und auf externe Beraterinnen und Berater angewiesen. Das Buch gibt daher wichtige Anhaltspunkte für die vielfältigen Wege durch diese Zulassungsverfahren und erläutert Zusammenhänge und Begriffe, so dass sich die Zusammenarbeit mit externen Beraterinnen und Beratern effizienter gestaltet.

Wegen seiner großen praktischen Bedeutung ist das Thema der elektromagnetischen Verträglichkeit heute nahezu überall in Bachelor- und Masterstudiengängen der Elektrotechnik, der Informationstechnik und der Kommunikationstechnik vertreten. Um die Methoden und Konzepte dieses Faches zu verstehen, ist ein profundes Grundlagenwissen notwendig, so dass in Bachelorstudiengängen die Lehrinhalte in der Regel erst in der zweiten Hälfte des Studiums vermittelt werden können. Andererseits wäre es wichtig, schon sehr früh für das Thema der elektromagnetischen Verträglichkeit zu sensibilisieren, zum Beispiel, indem in Grundlagenveranstaltungen an geeigneter Stelle bereits auf Teilaspekte der EMV eingegangen wird. Um hier einen Einstieg in das Thema EMV zu geben, wird in diesem Buch auch immer wieder auf die Grundlagen verwiesen und es werden wichtige Begriffe verständlich erläutert.

An dieser Stelle bedanken wir uns bei allen Kolleginnen und Kollegen und unseren Studierenden, die durch ihre Anregungen zu diesem Buch beigetragen haben. Unseren Familien, die uns während der Entstehungszeit dieses Buches unterstützt haben, gilt unser ganz besonderer Dank.

Dortmund, im Frühjahr 2015

Frank Gustrau
Holger Kellerbauer

Vorwort zur zweiten Auflage

Die vorliegende 2. Auflage enthält einige Aktualisierungen und Ergänzungen insbesondere in den Abschnitten über Richtlinien, Normen und Zulassungsprozessen sowie im Bereich der EMV-Messtechnik.

Dortmund, im Frühjahr 2022

Frank Gustrau
Holger Kellerbauer

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 | 34 |
| 2.4.1 | Relative Pegel..... | 34 |
| 2.4.2 | Absolute Pegel..... | 37 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.5 | Schaltungskonzepte..... | 38 |
| 2.5.1 | Einfache Grundschaltung | 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 | 50 |
| 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 Kabelschirmdämpfung..... | 146 |
| 5 | Richtlinien, Normen und Zulassungsprozesse | 150 |
| 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 | 154 |
| 5.2.2 | Übersicht Normenreihe ISO 11452..... | 154 |
| 5.2.3 | Übersicht Normenreihe IEC 61000-3 | 156 |
| 5.2.4 | Übersicht Normenreihe IEC 61000-4 | 156 |
| 5.2.5 | Übersicht Normenreihe CISPR | 158 |
| 5.2.6 | Übersicht Normenreihe ISO 7637 | 158 |
| 5.2.7 | Grundnormen und Fachgrundnormen | 158 |
| 5.2.8 | Produktnormen | 160 |
| 5.2.9 | Akkreditierung von Laboren | 160 |
| 5.2.10 | Ausgabestände von Normen | 161 |
| 5.2.11 | Beispiele für Dokumententypen aus der Normenwelt | 162 |
| 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..... | 165 |
| 5.4.1 | Die Konformitätsvermutung..... | 165 |
| 5.4.2 | Rolle des Herstellers..... | 166 |
| 5.4.3 | Anwendung harmonisierter Normen | 166 |
| 5.4.4 | Dokumentenbewertung | 167 |
| 5.4.5 | Behördliche Aufsicht durch die BNetzA | 168 |
| 5.5 | Die notifizierten Stellen | 169 |
| 5.5.1 | Rechtsgrundlage der notifizierten Stelle | 169 |
| 5.5.2 | Nutzen für den Hersteller..... | 170 |
| 5.5.3 | Technischer Bericht der notifizierten Stelle..... | 170 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.5.4 | Einschränkungen für den Betrieb | 172 |
| 5.5.5 | Erklärung der notifizierten Stelle | 172 |
| 5.5.6 | Produktgruppenbildung | 172 |
| 5.6 | E-Kennzeichnung | 173 |
| 5.6.1 | Die UN ECE R10 | 174 |
| 5.6.2 | Rolle des Herstellers | 175 |
| 5.6.3 | Rolle des technischen Dienstes | 175 |
| 5.6.4 | Rolle der Behörden (KBA) | 176 |
| 5.7 | Elektromagnetische Umweltverträglichkeit | 176 |

6 Messen und Prüfen178

| | | |
|--------|--|-----|
| 6.1 | Messkette bei Störaussendungsmessungen | 179 |
| 6.1.1 | Messwandler und Transducer | 179 |
| 6.1.2 | Oszilloskope | 181 |
| 6.1.3 | Konventioneller Messempfänger | 184 |
| 6.1.4 | Zeitbereichsmessempfänger | 185 |
| 6.1.5 | Spektrumanalysator | 186 |
| 6.1.6 | Messleitungen | 187 |
| 6.1.7 | Netzwerkanalysator | 189 |
| 6.1.8 | Detektoren für Störaussendungsmessungen | 190 |
| 6.1.9 | Messzeiten für Störaussendungsmessungen | 191 |
| 6.1.10 | Bandbreiten für Störaussendungsmessungen | 192 |
| 6.2 | Messkette bei Störfestigkeitsmessungen | 193 |
| 6.2.1 | Signalgenerator | 194 |
| 6.2.2 | Modulationsarten | 195 |
| 6.2.3 | Verstärker | 196 |
| 6.2.4 | Messwandler | 197 |
| 6.2.5 | Funktionsprinzip einer Feldsonde | 202 |
| 6.2.6 | Monitoring der Messkette | 202 |
| 6.2.7 | Monitoring des Prüfmusters | 203 |
| 6.2.8 | Kalibrierung | 204 |
| 6.2.9 | Mehrpunktkalibrierungen | 205 |
| 6.2.10 | Messzeiten für Störfestigkeitsmessungen | 206 |
| 6.2.11 | Bewertung einer Störfestigkeitsmessung | 207 |
| 6.3 | Messung von sehr niederfrequenten Störaussendungen | 208 |
| 6.3.1 | Oberschwingungsströme | 208 |
| 6.3.2 | Flicker | 209 |
| 6.3.3 | Netzurückwirkungen als Störfestigkeitsprüfung | 210 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.4 | Prüfungen der Impulsfestigkeit | 211 |
| 6.4.1 | Impulserzeugung | 211 |
| 6.4.2 | Frequenzbereichsbelegung von Impulsen | 212 |
| 6.4.3 | Koppelmechanismen für Impulsprüfungen | 212 |
| 6.4.4 | Gängige Impulsformen | 213 |
| 6.4.5 | Sehr langsame impulsartige Vorgänge (Wellenformen) | 214 |
| 6.4.6 | Elektrostatische Entladung (ESD) | 215 |
| 6.4.7 | Hochtesten bei Impulsprüfungen | 216 |
| 6.4.8 | Prüfzeiten bei Impulsprüfungen | 217 |
| 6.5 | Ein Messplatz für EMV-Prüfungen: Absorberhallen | 217 |
| 6.5.1 | Schirmung | 218 |
| 6.5.2 | Reflexionsdämpfung | 220 |
| 6.5.3 | Freiraum- und Freifeldhallen | 221 |
| 6.5.4 | Öffnungen in der Schirmung | 223 |
| 6.5.5 | Störquellen und -senken innerhalb der Absorberhalle | 227 |
| 6.5.6 | Reziprozität von Messwandlern | 227 |
| 6.5.7 | Messungen in der Absorberhalle | 228 |
| 6.6 | Schirmkabinen | 231 |
| 6.6.1 | Prüfungen in der Schirmkabine | 232 |
| 6.7 | Freifeldmessungen | 236 |
| 6.8 | Die Modenverwirbelungskammer | 237 |
| 6.9 | TEM-Zelle | 238 |
| 6.9.1 | Prinzip | 238 |
| 6.9.2 | Zellentypen | 239 |
| 7 | Prüfvorbereitungen | 241 |
| 7.1 | Zeit- und Kostenbedarf einer EMV-Prüfung | 241 |
| 7.1.1 | Pre-Compliance-Tests im eigenen Betrieb | 242 |
| 7.1.2 | Compliance-Tests im eigenen Betrieb | 242 |
| 7.1.3 | Prüfungen bei einem externen Dienstleister | 243 |
| 7.2 | Die Auswahl eines Betriebszustandes | 244 |
| 7.2.1 | Anforderungen an die Repräsentanz | 244 |
| 7.2.2 | Anforderungen an die Stabilität | 244 |
| 7.2.3 | Anforderungen an die Software zum Betrieb des Prüflings | 245 |
| 7.3 | Anforderungen an die Peripherie | 245 |
| 7.3.1 | Peripherie bei Störaussendungsmessungen | 246 |
| 7.3.2 | Peripherie bei Störfestigkeitsmessungen | 247 |
| 7.3.3 | Peripherie im Prüfaufbau | 247 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 7.4 | Formulierung von Bewertungskriterien | 247 |
| 7.4.1 | Definition von Funktionsklassen und Toleranzen | 247 |
| 7.4.2 | Auswahl von sinnvollem Monitoring | 248 |
| 7.5 | Entstörung während der Prüfung | 250 |
| 7.5.1 | Identifikation des Problems | 250 |
| 7.5.2 | Modifikationen während einer Prüfreihe | 251 |
| 7.5.3 | Entstörungsmaßnahmen ohne Modifikation | 252 |
| 7.5.4 | Entstörungsmaßnahmen mit Modifikation | 252 |
| A | Anhang | 253 |
| A.1 | Koordinatensysteme | 253 |
| A.1.1 | Kartesisches Koordinatensystem | 254 |
| A.1.2 | Zylinderkoordinatensystem | 255 |
| A.1.3 | Kugelkoordinatensystem | 256 |
| A.2 | Lineare und logarithmische Größen | 257 |
| A.3 | Frequenzen und Wellenlängen | 258 |
| | Formelzeichen und Abkürzungen | 259 |
| | Literatur | 264 |
| | Index | 268 |

1

Einleitung

Dieses Kapitel liefert eine erste Annäherung an den Begriff der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV), wobei die Komplexität des Themas bereits ersichtlich wird. Die EMV ist keine in sich geschlossene Disziplin, sondern sie hat Anknüpfungspunkte in allen Bereichen der Technik und auch regulatorische Aspekte greifen mit hinein. Eine kurze Vorausschau auf die folgenden Kapitel soll deutlich machen, wie wir uns das Themengebiet der EMV erschließen wollen.

■ 1.1 Definition und Motivation

In der Norm IEC 60050 „International Electrotechnical Vocabulary“ findet sich die Definition des Begriffes „elektromagnetische Verträglichkeit“ (EMV).

Electromagnetic Compatibility – „The ability of an equipment or system to function satisfactorily in its electromagnetic environment without introducing intolerable electromagnetic disturbances to anything in that environment.“

Elektromagnetische Verträglichkeit – „Die Fähigkeit eines Gerätes oder Systems in seiner elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu funktionieren, ohne selbst unzulässige Störungen in diese Umgebung mit einzubringen.“

Die Ursprungsdisziplin der EMV ist der Funkschutz, d.h. die Gewährleistung von störungsfreier Nutzung von z.B. Behördenfunk, Radio, Fernsehübertragung, Flugnavigation, Mobil- und Amateurfunk. Funkempfänger sind die empfindlichsten Geräte im täglichen Gebrauch und daher das Maß für technische Überlegungen hinsichtlich Grenzwerten. Die störungsfreie Frequenznutzung sicherzustellen, fällt in den Aufgabenbereich der Bundesnetzagentur (BNetzA), die 1998 als „Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post“ gegründet wurde. Der diskriminierungsfreie Zugang zu Medien ist ein hohes Rechtsgut.

EMV im Speziellen ist eine Problemstellung der Neuzeit, denn seit Beginn der Elektrifizierung von Industrie und Haushalten steigt die Anzahl, die Leistungsfähigkeit und die Integrationsdichte von Bauteilen, Geräten und Systemen kontinuierlich. Durch mehr und mehr Geräte auf immer engerem Raum stieg das allgemeine Störpotential über die Jahrzehnte immer weiter an und durch kleiner werdende Steuerungselemente mit niedrigeren Logikpegeln sank die Störfestigkeit im Gegenzug in ähnlichem Maße. Ende der neunziger Jahre kam es zunehmend zu schwerwiegenden Ausfällen, da Geräte auf den Markt kamen, die mit ihrer Störumgebung nicht mehr zurechtkamen und Funktionsminderungen und -ausfälle zeigten (Bild 1.1).

Der Gesetzgeber war zum Handeln gezwungen, um das zufriedenstellende Funktionieren von Gerätschaften im Zusammenspiel sicherzustellen. Ab Ende 1995 wurde jeder Hersteller per Gesetz verpflichtet, nachzuweisen, dass das von ihm in den Handel gebrachte Gerät den Anforderungen des EMV-Gesetzes (EMVG) entspricht und „elektromagnetisch verträglich“ ist.

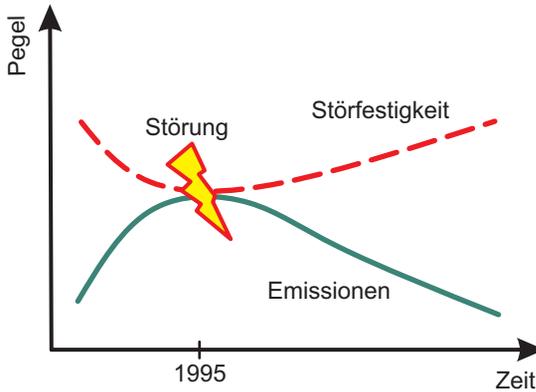


Bild 1.1 Entwicklung von durchschnittlicher Störfestigkeit (Robustheit gegen Störungen aus der Umgebung) von Geräten und Störemissionen (Aussendung von Störungen) in elektromagnetischen Umgebungen

Die 1. Novellierung des EMVG [EMVG96] vom 30.08.1995 ist die überarbeitete nationale Umsetzung der EU-Richtlinie 89/336/EG (damals noch EG) von 03.05.1989 [EMVR89]. Die Übergangsregelung zum EMVG endete am 31.12.1995 – von da an wurden Hersteller verpflichtet, die gesetzlichen Vorgaben umzusetzen.

Die EMV wurde zu einem wichtigen Bestandteil einer Produktentwicklung und zahlreiche Normen standardisierten Prüfverfahren, um die Verträglichkeit von Geräten und Systemen zu überprüfen. Diese Normen unterliegen, der technischen Entwicklung zu immer höheren Frequenzen und Packungsdichten folgend, ständigen Anpassungen und Änderungen.

■ 1.2 Elektromagnetische Verträglichkeit als horizontale Disziplin

Anders als viele andere Themenschwerpunkte, die sich stark auf bestimmte Gerätegruppen spezialisieren, also *vertikale* Disziplinen sind, ist die EMV als *horizontale* Disziplin (Bild 1.2) bei allen Entwicklungsprozessen von elektrischen und elektronischen Geräten ein zu berücksichtigender Aspekt. Die gilt gleichermaßen für so unterschiedliche Produkte wie Transformatorstation, Herz-Lungen-Maschine oder Funkfernbedienung für ein Spielzeugauto.

Aufgrund der interdisziplinären Bedeutung und der juristischen Relevanz sollten innerhalb der Elektro- und Informationstechnik jede Entwicklerin und jeder Entwickler sowie jede Projektmanagerin und jeder Projektmanager und auch schon die Studierenden dieser Fachrichtung etwas von EMV gehört haben. Dieses Buch soll helfen, einen praxisnahen und umfassenden Überblick über die Problemstellungen der EMV zu liefern. Was ist bei der Entwicklung notwendig, um EMV im späteren Einsatz sicherzustellen? Wie kann die EMV eines Gerätes verbessert werden? Welche Störphänomene sind in einer elektromagnetischen Umgebung zu berücksichtigen? Wie kann die EMV eines Gerätes überprüft werden? Welche gesetzlichen Vorgaben sind für ein Produkt bzgl. der EMV relevant?

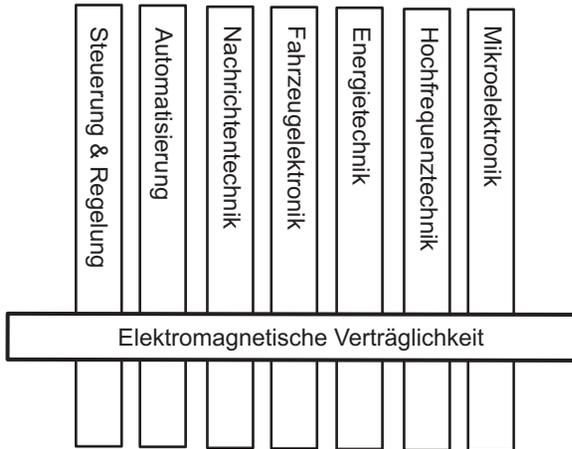


Bild 1.2 EMV als horizontale Disziplin

■ 1.3 Aufbau des Buches

Zunächst werden im zweiten Kapitel (*Grundlagen und Begriffe der EMV*) alle notwendigen elementaren Grundlagen und Begriffe erläutert, um dem Leser den Einstieg in die Materie der elektromagnetischen Verträglichkeit möglichst komfortabel zu machen und eine erste Orientierung zu geben. Störsenken, Störquellen und Kopplungsmechanismen sind die Basis aller Überlegungen zum Zusammenspiel elektrischer und elektronischer Systeme sowie Geräte und Komponenten in Hinsicht auf die EMV. Außerdem wird das Verständnis für die praktisch unvermeidliche Überlagerung von (erwünschten) Nutz- und (unerwünschten) Störgrößenprozessen innerhalb von Systemen vermittelt.

Im dritten Kapitel (*Ausbreitung von Störsignalen*) steigen wir dann tiefer in die mathematische Beschreibung der physikalischen Phänomene ein. Da die Verkopplung von elektronischen Geräten auf parasitärem Wege erfolgt und in den seltensten Fällen direkt auf dem Schaltplan ersehen werden kann, ist die Einbeziehung der Maxwell'schen Gleichungen notwendig, die alle makroskopischen elektromagnetischen Phänomene beschreibt. Ausgehend von einem anschaulichen und mathematisch fundierten Verständnis der Maxwell'schen Gleichungen werden wir die im zweiten Kapitel kurz angesprochenen Kopplungsmechanismen eingehender betrachten und anhand von Beispielen belegen, wie man mit theoretischen Überlegungen und modernen Schaltungssimulatoren und 3D-Feldsimulationsprogrammen praktische Probleme angehen kann. Aus den allgemeinen Überlegungen und den konkreten Beispielen lernen wir Möglichkeiten kennen, die Kopplungsmechanismen besser zu beherrschen.

Kapitel vier (*Komponenten und Konzepte zur Verbesserung der EMV*) erläutert einige bewährte Standardkonzepte und wirksame Komponenten, um die Aussendung von Störungen zu minimieren oder die Störfestigkeit von Schaltungen zu erhöhen. Aufgrund der fachlichen Breite der *horizontalen Disziplin* EMV kann dieses Kapitel nur einen sehr kleinen Ausschnitt aus dem großen Portfolio beleuchten. Es wird daher an dieser Stelle auch immer wieder auf externe Literatur verwiesen werden müssen.

Das fünfte Kapitel (*Richtlinien, Normen und Zulassungsprozesse*) erläutert, welche Gesetze und Normen für einzelne Hersteller im Bereich der EMV relevant sind und listet auf, zu welchen Maßnahmen die Gesetze den Hersteller verpflichten. Das Kapitel dient als Leitfaden für die unterschiedlichen Zulassungsprozesse und gibt dem Hersteller Orientierung über die Schritte, die zu gehen sind, um ein Produkt in den EU-Markt bringen.

Das sechste Kapitel (*Messen und Prüfen*) erklärt, wie man normgerecht im Laborversuch die elektromagnetische Verträglichkeit nachweisen kann. Es beschreibt unterschiedliche Prüfverfahren zur Nachbildung verschiedener Störphänomene und die dazu benötigte technische Ausstattung und deren Einschränkungen. Die Palette reicht von aufwendigen gestrahlten Messverfahren in der Absorberkammer bis hin zu schnell applizierten leitungsgebundenen Verfahren, die auf einem Büroarbeitsplatz durchgeführt werden können.

Im siebten Kapitel (*Prüfvorbereitungen*) erklären wir Schritt für Schritt, wie ein Unternehmen eine EMV-Prüfung im betriebseigenen Labor oder bei einem externen Dienstleister vorbereiten kann, um die Gefahr von unnötigen Zeitverzögerungen und Mehrkosten im Zaum zu halten. Es enthält Tipps zu Anforderungen an Prüfhilfsmittel und Vorschläge für „Quick & Dirty“-Entstörungsmaßnahmen, wenn es bei einer Prüfung mal nicht so gut läuft.

2

Grundlagen und Begriffe der EMV

Bei der Beschreibung der oft komplexen Wechselwirkung zwischen Geräten ist eine klare begriffliche Einordnung der auftretenden elektromagnetischen Phänomene hilfreich. Ausgehend von einem elementaren EMV-Modell werden daher Kopplungsarten, innere und äußere EMV, Stör- und Nutzgrößenfluss sowie Einsatzfrequenzbereiche betrachtet. In den letzten beiden Abschnitten des Kapitels arbeiten wir notwendige Grundlagen der Pegelrechnung, Leitungstheorie und EMV-relevante Grundsätze der Schaltungstechnik auf.

■ 2.1 Das EMV-Modell

Elektromagnetisch verträglich sein, heißt, dass ein Gerät, ein System, oder eine Einrichtung in einem elektromagnetisch belasteten Umfeld zufriedenstellend funktioniert und nicht übermäßig zum Störgeschehen der Umgebung beiträgt. EMV ist also eine *bidirektionale* Eigenschaft von elektrischen Systemen. Jedes Gerät kann, je nach Umstand, eine *Quelle* von elektromagnetischen Aussendungen sein oder eine *Senke* für die Aussendungen eines oder mehrerer anderer Systeme oder Phänomene (Bild 2.1). Während also z.B. ein Mobiltelefon im Sendefunkband eines Mobilfunkstandards als Störquelle wirken kann, ist es möglich, dass es im Ladezustand von leitungsgebundenen Störphänomenen aus dem öffentlichen Niederspannungsversorgungsnetz als Störsenke belastet wird.

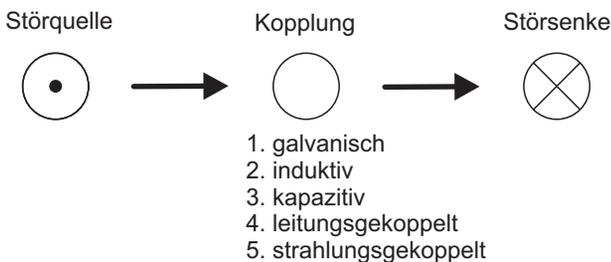


Bild 2.1 Elementares Beeinflussungsmodell: Eine Störquelle emittiert eine Störaussendung, die durch einen Kopplungsmechanismus an der Senke zur Störgröße wird.

Verbunden werden Quelle und Senke durch die fünf Kopplungsmechanismen 1. galvanisch, 2. induktiv, 3. kapazitiv, 4. leitungsgekoppelt und 5. strahlungsgekoppelt. Mit diesen Elementen lässt sich das elementare EMV-Modell in Bild 2.2 zusammensetzen.

Auch wenn jedes Gerät sowohl Senken- als auch Quelleneigenschaften hat, lassen sich die meisten Geräte aufgrund ihrer Funktion einer bestimmten Seite zuordnen. Pegelschwache Si-

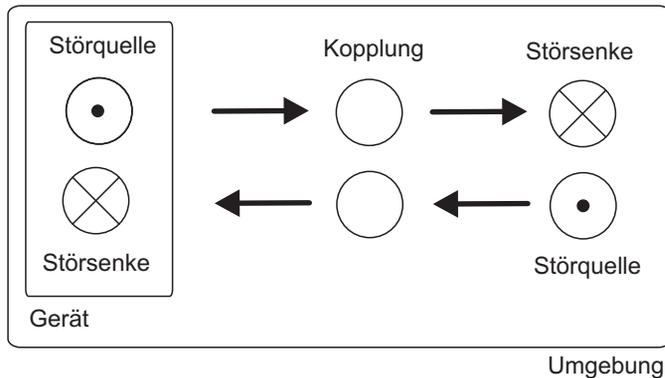


Bild 2.2 Elementares EMV-Modell: Alle Geräte sind prinzipiell Quelle und Senke für elektromagnetische Störphänomene, sie interagieren über Kopplungsmechanismen mit Quellen und Senken in ihrer Umgebung.

gnalübertragungssysteme sind öfter Opfer elektromagnetischer Phänomene, Energieübertragungssysteme mit hohen Spannungen und Strömen öfter Ursache.

Als Umgebung bzw. *EMV-Umgebung* wird dabei die Gesamtheit aller Phänomene bezeichnet, die innerhalb eines räumlich begrenzten Gebietes zugegen sind. Es gibt dabei prinzipiell keine feldfreie Umgebung auf der Erde und auch sonst nirgendwo, da stets mindestens die natürlichen elektromagnetischen Phänomene, wie z.B. das Erdmagnetfeld oder die kosmische Hintergrundstrahlung, vorhanden sind. Typische EMV-Umgebungen sind der Wohnbereich, der Industriebereich und der geschützte Bereich.

Wohnbereich – Im Wohnbereich muss mit typischen Störereignissen aus dem Niederspannungsversorgungsnetz sowie der Präsenz verschiedenster Funkdienste, wie Radio und Fernsehen, aber auch Mobilfunk und WLAN gerechnet werden. Man geht von niedriger Störfestigkeit aus, da die Geräte für den Hausgebrauch meist am Preis orientiert produziert sind, fordert aber auf der anderen Seite deshalb sehr gutes Emissionsverhalten.

Industriebereich – Im Industriebereich werden leistungsstarke, professionelle Geräte verwendet. Man muss mit der Präsenz von starken Störquellen, wie Schweißgeräten, Frequenzumrichtern und starken Elektromotoren, rechnen. Die geforderte Störfestigkeit ist größer als im Wohnbereich, die zulässige Emission aber dementsprechend auch höher.

Geschützter Bereich – Unter einem geschützten Bereich versteht man Laborumgebungen und medizinische Umgebungen, wie Arztpraxen und Krankenhäuser. Man geht von kontrollierten Bedingungen aus (d.h. z.B. dem Verbot der Nutzung von Mobiltelefonen) und muss daher wenig Störfestigkeit einfordern. Viele sehr empfindliche Messapparaturen und Sensoren bedeuten aber auch scharfe Anforderungen an das Emissionsverhalten.

Besonders kritisch wird es, wenn man für ein Betriebsmittel keine feste elektromagnetische Umgebung festlegen kann – *Fahrzeuge* z.B. können praktisch überall zum Einsatz kommen – egal, ob auf dem einsamen Bauernacker mit schwachen Störfestigkeitsanforderungen oder als Dienstfahrzeug am Flughafen, wo neben vielen Funkdiensten auch Systeme wie Radar im Einsatz sind, die mit hohen Sendepiegeln arbeiten. Bei PKW und LKW sind daher die Anforderungen besonders hoch, gerade auch deshalb, weil fast alle Primärfunktionen (Beschleunigen, Bremsen, Lenken) extrem sicherheitsrelevant sind.

2.1.1 Nutz- und Störgrößenfluss

Startet ein Entwickler ein Vorhaben, so hat er zunächst den sogenannten *Nutzgrößenfluss* im Blick – sein Gerät soll eine bestimmte Funktion haben, d.h. gewöhnlich, aus elektrischer Energie mechanische Bewegung zu erzeugen (Maschinen und Anlagen, Fahr- und Werkzeuge), Informationen zu verarbeiten (Sensorik, IKT-Geräte (Informations- und Kommunikationstechnik) und Unterhaltungselektronik) oder die Energie zu wandeln (elektrische Heizgeräte, Leistungselektronik (Umrichter, Wandler) oder Schutztechnik). Oft wird dabei im Entwicklungsprozess die Möglichkeit von externen Störungen (also Störgrößen) vernachlässigt – hierzu gehören Temperatur, Stäube, Feuchte und natürlich elektromagnetische Störsignale, um die es bei der Disziplin der elektromagnetischen Verträglichkeit geht.

Gerade elektromagnetische Störungen sind dabei eher ambivalent – eine Nutzfrequenz eines Mobilkommunikationsnetzes ist für die teilnehmenden Endgeräte ein Nutzsignal, für die Geräte in der Umgebung eher eine Störgröße (Bild 2.3). Das gilt besonders für absichtlich emittierte Funkfrequenzen, da diese oft auch einen Pegel haben, der über einen deutlichen Signal-Rausch-Abstand verfügt.

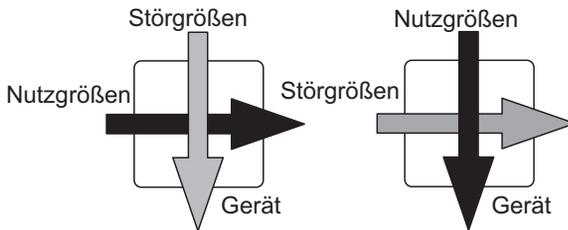


Bild 2.3 Nutz- und Störgrößenfluss: Was für das eine System eine wichtige Nutzgröße ist, kann für das benachbarte System störend wirken.

Es ist die Aufgabe der technischen Normung, Aussendungen so zu begrenzen und Störfestigkeit so einzufordern, dass alle technischen Einrichtungen in einer Umgebung störungsfrei zufriedenstellend funktionieren können. Störende Einflüsse können, wenn es sich um technisch genutzte Sendefrequenzen handelt, nicht vermieden werden, da sie Bestandteil der Funktion der Geräte sind. Ausreichende Festigkeit gegenüber Störgrößen und die Begrenzung der Abstrahlung von nicht notwendigen Signalen kann – wenn es keine Budget-, Zeit- und Bauvolumenbeschränkungen gibt – theoretisch immer sichergestellt werden.

Es ist zu beachten, dass ein System sich bezüglich der Nutzgrößen linear, bezüglich der Störgrößen aber massiv nichtlinear verhalten kann.

2.1.2 Innere und äußere EMV

In der Technik unterscheidet man zwischen „innerer EMV“ und „äußerer EMV“ – diese Unterscheidung macht auch die Gesetzgebung zum Thema EMV. Unter „innerer EMV“ (Bild 2.4) versteht man die Wechselwirkung von Komponenten innerhalb eines geschlossenen Systems, das als Gesamtsystem vom Inverkehrbringer im Handel vertrieben wird. Hier ist allein der Hersteller verantwortlich dafür, dass sich seine Systemkomponenten nicht stören und sein Gerät

einwandfrei funktioniert – das liegt in seinem ureigensten Interesse. Als Beispiel sei ein Fahrzeughersteller genannt, der in seinem PKW mehrere dutzend Steuergeräte verbaut hat – für den störungsfreien Betrieb innerhalb des Autos ist er zunächst allein verantwortlich (er verpflichtet aber seine Zulieferer vertraglich, die Komponenten vor der Zusammenführung entsprechend zu qualifizieren).

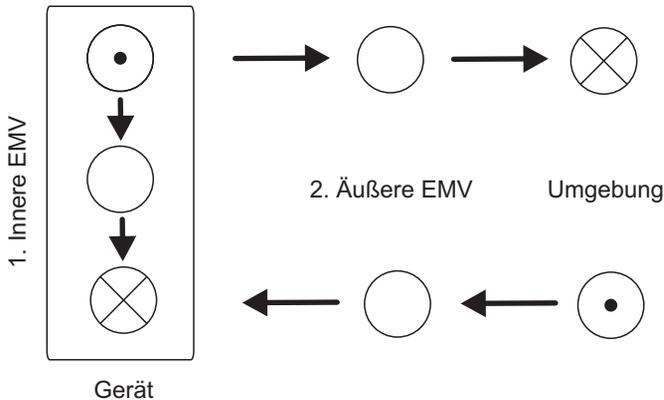


Bild 2.4 Unterscheidung innere und äußere EMV: Die EMV innerhalb eines Produktes, Systems oder Gerätes liegt allein in der Verantwortung des Herstellers, der die Funktion seines Gerätes im eigenen Interesse sicherstellen muss – die EMV zwischen einem Gerät und den anderen Geräten und Systemen in seiner Umgebung ist an die Vorgaben aus dem EMV-Gesetz gebunden und obliegt der Aufsicht durch die Bundesnetzagentur (BNetzA).

Unter „äußerer EMV“ versteht man die Wirkung zwischen einander fremden Geräten, die nicht als Gesamtsystem in den Handel kommen. Dieser Teil der EMV ist durch gesetzliche Vorgaben geregelt, um verschiedenste technische Systeme voreinander zu schützen und deren störungsfreien Betrieb sicherzustellen. Funktioniert der PKW aus dem obigen Beispiel nicht, weil ein Steuergerät das andere stört, interessiert dies den Gesetzgeber nicht – der Hersteller hat selbst vitales Interesse daran, dass alles funktioniert. Stört der PKW allerdings durch seine Störaussendungen, z.B. Mobiltelefone, in seiner Umgebung, obliegt es der zuständigen Behörde (Bundesnetzagentur, BNetzA), einzuschreiten. Um solche Störungen von vorneherein zu vermeiden, sind für die offiziellen Produktzulassungen gerätespezifische EMV-Untersuchungen vorgeschrieben.

■ 2.2 Eigenschaften von Störquellen

Störquellen finden sich überall in der elektromagnetischen Umwelt – Blitze, Sendefunkanlagen, Motoren, Bildschirme usw. Sie unterscheiden sich in Wirkungsweise, Intensität und Gefährdungspotential. Jede technische Einrichtung kann theoretisch als Störquelle wirken – leistungsstarke Geräte oder Teilsysteme sind aber die üblichen Verdächtigen.

2.2.1 Charakterisierung von Störquellen

Störquellen können in fünf Kategorien unterschieden werden, wobei nicht immer konsistent entschieden werden kann, welche der Eigenschaften auf eine Quelle genau zutrifft, da dies auch von der möglicherweise sehr unterschiedlichen Umgebung der Quelle abhängen kann. Ein Mobiltelefon könnte als intermittierende Quelle eingeordnet werden, da es nicht ständig zum Telefonieren genutzt wird. Betrachtet man aber Senken an belebten Plätzen, z.B. eine Anzeigetafel an einem Flughafen, muss man davon ausgehen, dass immer ein oder mehrere Handys in der Umgebung aktiv sind.

2.2.1.1 Natürlich/künstlich

Diese Unterscheidung lässt sich leicht treffen. Alle von elektrischen Systemen ausgesendeten Störphänomene sind als künstlich zu kategorisieren. Natürliche Phänomene wie Blitzschlag, elektrostatische Aufladung, Partikelschauer und dergleichen sind natürlich nicht künstlich.

2.2.1.2 Leitungsgebunden/gestrahlt

Werden die Störaussendungen über das Gehäuse als elektromagnetische Welle ausgesendet, spricht man von gestrahlter Störaussendung – Beispiele sind alle Arten von Funksendern, aber auch andere schlecht geschirmte Gehäuse, die intern genutzte Signale über die Luftschnittstelle nach Außen abstrahlen. Verlässt die Störgröße das System über die angeschlossenen Leitungen (Signal- und Energiekabel), spricht man von leitungsgebundener Störaussendung – Beispiele sind von Netzteilen abgegebene Oberschwingungsströme, Schaltimpulse und andere Überschwinger, wie von prellenden Relais. Der Ausbreitungsweg kann sich auf dem Pfad von Quelle zu Senke ändern – eine hochfrequente Störung, die zunächst das Gerät über ein angeschlossenes Kabel verlässt, kann bei entsprechender Leitungslänge vom Kabel durch die Luft abgestrahlt werden.

2.2.1.3 Beabsichtigt/unbeabsichtigt

Immer dann, wenn eine Aussendung als Bestandteil der technischen Funktion dient, d.h. dass ohne diese Abstrahlung keine Funktion mehr gegeben wäre, spricht man von beabsichtigter Störaussendung – Beispiele sind alle Arten von Funkdiensten, wie Mobilfunk, WLAN, Radio, Fernsehen, Bluetooth und Radar. Aufgrund der Lizenzgebühren, die für die Nutzung bestimmter Frequenzbereiche entrichtet werden müssen und dem rechtsverbindlichen Frequenznutzungsplan der Bundesnetzagentur, sind beabsichtigte Störaussendungen eigentlich immer schmalbandig, d.h. sie beanspruchen nur so wenig kostbares Spektrum wie nötig. Eine der wenigen beabsichtigten breitbandigen Anwendungen wäre z.B. ein militärischer Störsender. Unbeabsichtigte Störaussendungen entstehen als unerwünschtes Nebenprodukt von elektrischen Funktionen – Beispiele sind Oberschwingungsströme, die in Netzteilen durch den Gleichrichtungsprozess entstehen, Sinussignale von Oszillatoren auf Platinen, die durch schlecht geschirmte Gehäuse dringen. Unbeabsichtigte Störaussendungen könnten theoretisch immer vermieden werden, im Wege stehen jedoch ggf. hohe Kosten, verlängerte Entwicklungsdauer und Bauraumbegrenzungen für Entstörmaßnahmen. Einen gewissen Pegel von unbeabsichtigten Störaussendungen emittiert eigentlich jedes komplexere Gerät. Bei natürlichen Phänomenen ist es nicht sinnvoll, zwischen beabsichtigten und unbeabsichtigten Phänomenen zu unterscheiden.

2.2.1.4 Schmalbandig/breitbandig

Als schmalbandig werden solche Störphänomene klassifiziert, die einen klar identifizierbaren, begrenzten Frequenzbereich belegen – das gilt für praktisch alle Informationsübertragungen (egal, ob leitungsgebunden oder gestrahlt, ob im Basisband oder in höhere Frequenzen moduliert) und Versorgungsspannungen (50/60 Hz Drehstromnetz, 16,6 Hz Wechselstromnetz der Bahn, 0 Hz Gleichspannungsversorgungen). Eine exaktere Einordnung hängt vom Empfangsfilter¹ ab – ist das Spektrum schmäler als die Bandbreite des Filters, handelt es sich um ein schmalbandiges Signal (Bild 2.5a). Nach Norm werden alle Aussendungen als schmalbandig eingeordnet, deren Signalspitzenwert maximal doppelt so hoch ist wie der Mittelwert des gleichgerichteten Signals. Ist dieser Unterschied größer, spricht man von breitbandigen Phänomenen (Bild 2.5b). Als Faustregel gilt, dass man breitbandige Signale nicht, oder schlecht einem speziellen, eingeschränkten Frequenzbereich zuordnen kann. Beispiele sind alle Arten von Impulsen, d.h. Schaltvorgänge an induktiven Lasten, Blitzschläge, Funkenabrisse in Bürstenmotoren und elektrostatische Entladungen.

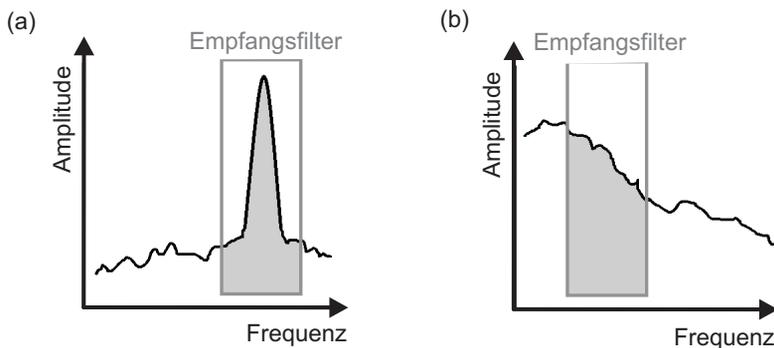


Bild 2.5 Spektrum von (a) schmalbandigen und (b) breitbandigen Störquellen: Das schmalbandige Signal kann einem beschränkten Frequenzbereich zugeordnet werden und ist schmäler als das Empfangsfilter – das breitbandige Signal belegt ein breites Spektrum und ist breiter als das Empfangsfilter.

2.2.1.5 Kontinuierlich/intermittierend

Kontinuierliche Störgrößen sind in ihrer elektromagnetischen Umgebung ständig präsent und aktiv. Beispiele sind Rundfunksender, WLAN-Router, Beleuchtungselemente, Heizungspumpen und Personalcomputer. Intermittierende Störquellen sind nur sporadisch aktiv und nicht dauerhafter Bestandteil einer elektromagnetischen Umgebung, wie z.B. Blitzeinschläge, Kontaktunterbrechungen bei Fahrdrachtsystemen durch Vereisung, Schaltimpulse in Schaltanlagen und elektromagnetische Entladungen (ESD) als Folge von Reibungsisolation.

2.2.1.6 Zeitvarianz von Störquellen

Systeme sind, je nach Funktionsumfang, nicht zu jedem Zeitpunkt gleich problematisch bzgl. ihrer elektromagnetischen Verträglichkeit. Viele Systeme haben einen intern verborgenen oder

¹ Siehe auch Abschnitt 6.1.10

Index

- 3-dB-Eckfrequenz, 114
- 3D-EM-Simulation, 59
- 5G-Frequenzen, 27

- Abblockkondensator, 111
- Abschlussnetzwerk, 46
- Absoluter Pegel, 37
- Absorber, 220, 240
- Absorberfolie, 105
- Absorberhalle, 154, 217
- Absorption, 140
- Abstrahlung, 46, 91, 111
- ADS, 66, 83, 94, 99, 102, 107, 115, 123
- Äquivalente Leitschichtdicke, 68
- Äußere EMV, 22
- Akkreditierung, 160, 242
- Akkreditierungsstelle, 160
- Aktive Filter, 124
- Ampere'sches Gesetz, 50
- Anpassung, 33, 40, 42, 115
- Anschnitt-Steuerung, 208
- Antenne, 37, 91, 169, 179, 197, 199, 228, 231
- Antennenfaktor, 37, 38, 180
- Anwendungsbereich, 160
- Arbeitsentwurf, 162
- Arbitrier-Netzgerät, 211
- Asymmetrische Spannung, 43
- Audit, 161, 175
- Augendiagramm, 31
- Ausbreitungsgeschwindigkeit, 58
- Ausbreitungskonstante, 40, 86
- Ausgabestand, 161
- Average-Detektor, 191

- Babinet'sches Prinzip, 106
- Balun, 132
- Bandbreite, 191
 - Impuls, 26, 212
- Bandpassfilter, 118
- Bandsperrfilter, 119

- BCI, 154, 199, 232, 242
- Beabsichtigte Störaussendung, 23
- Bedeckungsgrad, 148
- Beeinflussungsmodell, 19
- Best Practice, 162, 166
- Betriebssicherheit, 207
- Betriebszustand, 244
- Beugung, 93
- Bewertung, 207
- Bewertungskriterien, 247
- Bezugspotential, 40, 46, 64, 112, 129
- Bikonische Antenne, 179, 201
- Biot-Savart'sches-Gesetz, 57
- Blitzeinschlag, 26, 29, 235
- Blitzimpuls, 197
- Bluetooth, 23
- BNetzA, 15, 168
- Breitbandige Störaussendung, 24
- Breitbandige Störung, 191
- Bulk Current Injection, 232
- Bundesemissionsschutzverordnung, 28, 177
- Bundesnetzagentur, 15, 22, 26, 160, 167
- Burst, 157, 213
- Butterworth-Filter, 118

- CAD, 62
- CAN-Bus, 33, 204, 226, 250
- CDN, 155, 181, 197
- CE-Kennzeichen, 165
- CEN, 151
- CENELEC, 151
- CISPR, 153, 158
 - 11, 27
 - 25, 158, 228
- CISPR-Mittelwertdetektor, 191
- Closed-Loop-Verfahren, 233
- CMRR, 136
- Committee Draft, 162
- Common mode, 43
- Common Mode Rejection Ratio, 136

- Compliance-Test, 242
 Coulomb-Eichung, 57
 Courant-Stabilitätskriterium, 61
 Coverage, 172
 Crawford-TEM-Zelle, 239
 Cut-off-Frequenz, 42, 62, 142, 188, 225
 – Koaxialleitung, 188
 – Rundhohlleiter, 142

 Dämpfung, 93, 187
 Dämpfungskonstante, 40, 188
 DAkkS, 160
 dB, 34, 257
 dBi, 92
 dBm, 37
 Detektor, 190
 Deutsche Akkreditierungsstelle, 160
 Dezibel, 34, 257
 DFT, 25, 61, 183, 185
 Dielektrikum, 139
 Dielektrizitätszahl, 50
 Dienstleister, 243
 Differential mode, 43
 Differentialoperator, 254
 Differenzverstärker, 133
 Dipol, 91, 107, 179
 Dips, 213
 DIS, 162
 Diskrete Fouriertransformation, 25, 61, 183
 Diskretisierung, 78
 Dispersion, 61, 87, 95, 98
 Divergenz, 53, 254
 Dokumentenbewertung, 167
 Doppelleitung, 74
 Dreileitersystem, 40, 43, 111, 131, 144
 Drossel, 126
 Dualität, 106
 Durchführungskondensator, 112
 Durchflutungsgesetz, 50, 71, 73
 DVB-T, 27

 E-Kennzeichnung, 173
 Effektive relative Dielektrizitätszahl, 94
 Eindringtiefe, 68
 Einfügedämpfung, 114
 Eingangsimpedanz, 42
 Eingangsschutzbeschaltung, 216

 Einheitenvorsilben, 257
 Einheitsvektor, 254–256
 Electromagnetic co-simulation, 59
 Electromagnetic Compatibility, 15
 Elektrisch kurze Leitung, 39, 146
 Elektrische Feldstärke, 50
 Elektrische Leitfähigkeit, 50, 66
 Elektrischer Fluss, 52
 Elektrisches Potential, 56, 82
 Elektromagnetische Schirmwirkung, 137
 Elektromagnetische Umgebung, 159
 Elektromagnetische Umweltverträglichkeit,
 33, 176
 Elektromagnetische Verträglichkeit, 15
 Elektromagnetische Wellen, 91, 140
 Elektronische Unterbaugruppe, 228
 Elektrostatik, 56
 Elektrostatische Entladung, 215
 EM-Simulation, 59
 Emission, 16
 Empfangsfilter, 24
 Empire, 76, 87
 EMV, 15
 – Gesetz, 16, 150
 – Modell, 19
 – Umgebung, 20
 EMVG, 16, 150, 166
 EMVU, 33
 EN 13309, 152
 EN 55011, 27, 153, 171
 Endfertiger, 163
 Entstörfilter, 118
 Entstörkondensator, 246
 Entstörungsmaßnahmen, 252
 Entwicklungsbegleitende Messung, 241
 Entwurf zur Abstimmung, 162
 Erde, 70
 Erdpotential, 70
 Erdschleife, 70, 73
 Erklärung der notifizierten Stelle, 172
 ESD, 24, 215
 – Generator, 157
 – Pistole, 215
 Ethernet, 204
 ETSI, 151
 EUB, 228
 Even mode, 45

- Fachgrundnormen, 159
- Fahrzeuge, 20, 154, 173
- Fail safe, 30
- Faraday'sches Gesetz, 51
- FDIS, 162
- FDTD, 60, 76, 87
- Federkontakte, 224
- Feldsimulation, 56, 59
- Feldsonde, 202, 204
- Feldstärke
 - elektrisch, 37
 - Messung, 37
- Feldwellenwiderstand, 41, 86, 140
- FEM, 59, 102
- Fernfeld, 49, 92, 140
- Ferritkachel, 220
- Ferritring, 127, 189
- Ferritzange, 225
- Filter, 118, 197, 224
- Finite Differenzen im Zeitbereich, 60, 87
- Finite-Elemente-Methode, 59, 102
- Flicker, 156, 208, 209
- Fluss
 - elektrischer, 52
 - magnetischer, 51
- Fouriertransformation, 25, 183, 212
- FR4, 94
- Freifeldhalle, 181, 221
- Freifeldmessplatz, 236
- Freiraumhalle, 221
- Frequenz, 258
- Frequenznutzungsplan, 26, 171
- FSPC, 29
- FTEM-Zelle, 240
- Funkschutz, 15, 26, 168, 192, 234
- Funktionsklasse, 247
- Funktionszustand, 235

- Gültigkeitsbereich einer Erklärung, 172
- Galvanische Kopplung, 48, 64
 - Messwandler, 197
- Galvanische Trennung, 127, 128
- Gauß'sches Gesetz
 - des elektrischen Feldes, 52
 - des magnetischen Feldes, 52
- Gaußimpuls, 61
- Geflechschirm, 146

- Gegentakt, 73
- Gegentaktmode, 43
- Gegentaktstörung, 73
- Gehäuse, 112
- Gehäuseresonanz, 101, 142
- Gekoppelte Leitungen, 86
- Geschützte Umgebung, 159
- Geschützter Bereich, 20
- Gesetz, 150
 - EMVG, 16
- Gestrahlte Störaussendung, 23
- Gipskartonabsorber, 220
- Glasfaser, 225
- Gleichtakt, 71, 73
- Gleichtaktdrossel, 126, 189
- Gleichtaktmode, 43
- Gleichtaktstörung, 73, 111, 126
- Gleichtaktunterdrückung, 136
- GPS, 27
- Gradient, 56, 254
- Grenzfrequenz, 114
- Grenzwerte, 151
- Ground Shift, 214
- Grundnormen, 158, 160
- Gruppenlaufzeit, 120
- GSM, 27
- GTEM-Zelle, 240
- Güte, 124

- Halbwellendipol, 91, 106, 199, 201, 258
- Harmonisierte Normen, 152, 166
- Hauptstrahlrichtung, 92
- Herstellerspezifikationen, 162, 231
- Hochfrequente Felder, 58
- Hochfrequenzmesstechnik, 187
- Hochpassfilter, 118
- Höhenscan, 109, 222
- Hohlraumresonanz, 142, 219, 237
- Hohlraumresonator, 101, 142
- Homogenfeldkalibrierung, 206
- Horizontale Richtlinie, 151
- Hybride Simulationsverfahren, 62

- IEC 60050, 15
- IEC 61000-3, 156
- IEC 61000-4, 156
- IEC 61000-6-x, 153

- Impedanzanpassung, 246
 Impedanztransformation, 42
 Impuls, 26
 Impulserzeugung, 211
 Impulsfestigkeit, 211
 Impulsprüfung, 217
 Induktionsgesetz, 51, 72, 74, 130
 Induktive Kopplung, 48, 71
 – Messwandler, 197, 198
 Induktivität, 69, 113
 Industriebereich, 20, 159
 Innere EMV, 21
 Innere Induktivität, 69
 Instrumentenverstärker, 135
 Interferenz, 93, 222
 Intermittierende Störaussendung, 24
 Invertierender Verstärker, 134
 ISM, 158
 ISM-Frequenzen, 27
 ISO 11451, 154
 ISO 11452, 154
 ISO 11452-2, 230
 ISO 11452-x, 153
 ISO 13766, 152
 ISO 17025, 161
 ISO 61000-4, 206
 ISO 7367-2, 32, 214
 ISO 7637, 158, 175
 Isotroper Kugelstrahler, 92
- Kabelschirm, 41, 144
 Kabelschirmdämpfung, 148
 Kalibrierdatei, 204
 Kalibrierung, 204
 – Mehrpunktkalibrierung, 205
 Kamindurchführung, 142
 Kapazitive Kopplung, 49, 82
 – Messwandler, 197, 198
 Kartesisches Koordinatensystem, 254
 Kettenschaltung, 36
 Klappferrit, 127, 247
 Klassifikation von Reaktionen, 29
 Koaxiale Wanddurchführung, 227
 Koaxialleitung, 41, 81, 144, 187, 188
 Kondensator, 110
 Konformitätserklärung, 165
 Konformitätsvermutung, 152, 165
- Kontaktfederleiste, 142
 Kontinuierliche Störaussendung, 24
 Koordinatensysteme, 253
 Koplanare Leitung, 98
 Koppelimpedanz, 65
 Koppelnetzwerk, 181
 Koppelzange, 228
 Kopplung
 – galvanisch, 64
 – induktiv, 71
 – kapazitiv, 82
 – Leitungs-, 86
 – Strahlungs-, 91
 Kopplungsmechanismen, 48, 64
 Kopplungswiderstand, 146
 Kosten einer EMV-Prüfung, 241
 Kraftfahrtbundesamt, 160, 173
 Kraftfahrzeugrichtlinie, 152
 Kugelkoordinatensystem, 92, 256
 Kurzschlussring, 79, 81
- Ladung, 52, 138
 Ladungsdichte, 55
 Laplace-Operator, 56, 254
 Lastabwurf, 29, 214
 LC-Filter, 118
 Leistungsflussdichte, 140
 Leitfähigkeit, 50, 66
 Leitung, 38, 40, 129
 – Anpassung, 42
 – Cut-off-Frequenz, 142, 188
 – Dreileitersystem, 43
 – Eingangsimpedanz, 42
 – elektrisch kurz, 39
 – Impedanztransformation, 42
 – Koaxialleitung, 41
 – Leitungswellenwiderstand, 41
 – Messleitung, 187
 – Mikrostreifenleitung, 42
 – Paralleldrahtleitung, 41
 – Rundhohlleiter, 142, 225
 – Symmetrisch, 43, 129
 Leitungsfiter, 123
 Leitungsgebundene Störaussendung, 23
 Leitungskenngrößen, 39
 Leitungskopplung, 49, 86
 Leitungsstromdichte, 50

- Leitungswellenwiderstand, 39, 41, 81, 86, 132, 137, 188, 246
- Dreileitersystem, 45
- LEMP, 26
- Lenz'sche Regel, 79, 139
- Lichtgeschwindigkeit, 40
- Lichtwellenleiter, 90, 128, 226
- LIN-Bus, 204, 250
- Litze, 146
- Lizenzierte Funkbänder, 26
- Load Dump, 214
- Logarithmisch-periodische Dipolantenne, 37, 179, 201
- Logarithmische Darstellung, 34, 257
- LPDA, 37, 179, 201
- LTCC, 97
- LTE, 27
-
- Magnetische Feldstärke, 50
- Magnetische Stromdichte, 107
- Magnetischer Fluss, 51
- Magnetisches Vektorpotential, 56
- Magnetostatik, 56
- Mantelwellen, 225
- Mantelwellenunterdrückung, 189
- Maschinenrichtlinie, 152
- Masse, 33, 40, 46, 64, 121, 129, 162, 214
- Massefläche, 81
- Massekonzept, 33, 70
- Masseschleife, 70, 73, 125, 129
- Materialgleichungen, 50
- Maxwell'sche Gleichungen, 48, 49
- Differentialform, 52
 - Integralform, 50
- Mehrpunktkalibrierung, 205
- Messbandbreite, 192, 229
- Messempfänger, 25, 37, 184
- Zeitbereichs-, 25
- Messkette
- Netzurückwirkung, 208
 - Störaussendungsmessung, 179
 - Störfestigkeitsmessung, 193
- Messleitung, 187
- Messwandler, 179, 197, 227
- Messzeit, 191, 206, 228
- Metallisches Gehäuse, 102
- Methode der Finiten Differenzen im Zeitbereich, 76
- Microstrip, 123
- Mikrostreifenleitung, 42, 87, 97, 123
- Mittelwertdetektor, 191, 228
- MMIC, 97
- Mobilfunk, 23, 199
- Modenverwirbelungskammer, 155, 237
- Modulationsarten, 195
- MoM, 61
- Momentenmethode, 61, 83, 99, 107
- Monitoring, 202, 248
- Monopolantenne, 93, 201
- Mu-Metall, 139
-
- Nabla-Operator, 56, 254
- Nachrichtenkabel, 90
- Nahfeld, 49, 92
- Neper, 36
- Netznachbildung, 181, 234
- Netzurückwirkung, 208, 210
- Netzwerkanalysator, 148, 189
- Neutralleiter, 33
- Nichtinvertierender Verstärker, 134
- Normen, 16, 152
- CISPR, 158
 - CISPR 11, 27
 - CISPR 25, 158
 - EN 13309, 152
 - EN 55011, 27, 153, 170, 171
 - Fachgrundnormen, 158
 - Grundnormen, 158, 160
 - Harmonisierte, 152
 - IEC 60050, 15
 - IEC 61000-3, 156
 - IEC 61000-4, 156
 - IEC 61000-6-x, 153
 - ISO 11451, 154
 - ISO 11452, 154
 - ISO 11452-x, 153
 - ISO 13766, 152
 - ISO 17025, 161
 - ISO 7367-2, 32
 - ISO 7637, 158
 - Produktnormen, 160
 - VDE 100, 46, 70
- Notifizierte Stelle, 167–169, 248

- Numerische Verfahren
 – FDTD, 60
 – MoM, 61
 – UTD, 61
 Nutzgrößenfluss, 21
- Oberflächenladungsdichte, 55
 Oberflächenstromdichte, 55
 Oberschwingungsströme, 156, 208
 Odd mode, 45
 Öffnungswinkel, 206
 OEM, 163
 Ohm'scher Widerstand, 66
 Ohm'sches Gesetz, 64
 OJEU, 152
 Operationsverstärker, 124
 Optische Umsetzer, 225
 Optokoppler, 128
 Oszilloskop, 181
- Paralleldrahtleitung, 41, 69, 74
 Peak-Detektor, 190
 Pegel, 34, 257
 Peripherie, 245
 Permeabilitätszahl, 50
 Personenschutz, 28, 33, 233, 236
 Phasengeschwindigkeit, 40
 Phasenkonstante, 40
 Phasor, 54
 Plattenkondensator, 57, 83, 85
 Poisson-Gleichung, 56
 Polarisation, 139
 Polarisationsrichtung, 228, 231
 Potential, 56, 82
 Powerline Communication, 27, 28
 Poyntingvektor, 140
 Pre-Compliance-Test, 241
 Produktgruppenbildung, 172
 Produktnormen, 160
 Prüfkosten, 241
 Prüfling, 178
 Prüfplan, 153
 Prüfungsvorbereitung, 241
 Prüfzeit, 206, 217, 229
 Pulsmodulation, 237
- Quasi-Spitzenwertdetektor, 191, 228
- Quasi-statisches Feld, 57, 82, 138
 Quasi-TEM, 98
 Quasipeak-Detektor, 186
 Quelle, 19
 Quellendichte, 53
 Quellenfeld, 52
- Radar, 23
 Radio, 15
 Randbedingung, 54
 Ratsempfehlung 1999/519/EG, 177
 Raumkopplung, 217
 – Messwandler, 197, 199
 Raumladungsdichte, 52
 RC-Filter, 114
 Rechte-Hand-Regel, 51
 Rechtssystem, 254
 Reduktionsleiter, 81
 Reflexion, 93, 140
 – Absorber, 220
 – Filter, 111
 – Hohlraumresonanz, 144
 – Leitung, 40, 132
 Reflexionsdämpfung, 220
 Reflexionsfaktor, 42, 111
 Regulierungsbehörde, 15
 Relative Dielektrizitätszahl, 40, 50
 Relative Permeabilitätszahl, 50, 139
 Relativer Pegel, 34
 Repräsentanz, 244
 Reproduzierbarkeit, 25, 158
 Resonanz, 91, 101, 107, 111, 196, 237
 Resonanzfrequenz
 – Halbwellendipol, 91, 258
 – Hohlraumresonator, 101, 142
 – Kondensator, 110
 – Patch, 94
 – Spule, 113
 – Viertelwellenmonopol, 258
 Reziprozität, 227
 RFID, 27
 Richtcharakteristik, 92
 Richtfaktor, 92, 108
 Richtfunktion, 92
 Richtkoppler, 203
 Richtlinien, 16, 151
 – 2013/35/EU, 177

- 2014/30/EU, 150
- 89/336/EG, 16
- Ringferrit, 189
- Rotation, 52, 254
- Rundhohlleiter, 142, 225

- S-Parameter, 189
- Samplerate, 181
- Schütt, 225
- Schaltnetzteile, 208
- Schaltungssimulation, 58
- Schaumstoffabsorber, 220
- Schirmdämpfung, 137, 141, 148, 219
- Schirmkabine, 231
- Schirmung, 33, 41, 82, 86, 97, 98, 107, 112, 131, 137, 218
- Schlaglänge, 130
- Schlitzantenne, 106, 142, 223, 252
- Schmalbandige Störaussendung, 24
- Schmalbandige Störung, 191
- Schwingkreis, 116
- Scope, 160
- Semi-Rigid-Koaxialkabel, 145
- Senke, 19
- Serienschwingkreis, 116
- Shannon-Theorem, 192, 228
- SI-Funktion, 212
- Signal-Rausch-Abstand, 21, 185
- Signalgenerator, 194
- Signalverzerrungen, 120
- Simulation, 56, 59
- Skineffekt, 58, 66
- Skintiefe, 68, 141, 188
- SNR, 185
- Software
 - Prüfling, 245
 - Prüfungsüberwachung, 249
 - Simulation, 59
- Spannungseinbruch, 209
- Spannungswelle, 40
- Spektrum eines Impulses, 212
- Spektrumanalysator, 25, 186, 242
- Spezifischer Widerstand, 66
- Spitzenwertdetektor, 190
- Spule, 113
- Spulenantennen, 155
- Störemission, 16
- Störfestigkeit, 16
- Stabilität, 244
- Statische Felder, 56, 138
- Stehende Welle, 33, 46, 144, 237
- Stehende Wellen, 98
- Steigzeit, 26
- Sternvierer, 90, 131
- Stetigkeitsbedingung, 54
- Störaussendung
 - breitbandig, 24
 - gestrahlt, 23, 228
 - leitungsgebunden, 23
 - schmalbandig, 24
- Störaussendungsmessung, 156, 179, 244
- Störfestigkeit, 30, 151, 230
- Störfestigkeitsmessung, 156, 193, 203, 244
- Störgrößenfluss, 21
- Störquelle, 19, 22, 72
- Störschwelle, 31
- Störsenke, 19, 28, 72
- Strömungsfeld, 56
- Straßenverkehrszulassungsordnung, 152, 174
- Strahlungsdiagramm, 92, 107
- Strahlungskopplung, 49, 91, 197, 217
 - Messwandler, 197
- Strahlungsleistungsdichte, 92
- Streifenleitung, 42, 98, 123, 198, 228
- Streukapazität, 82
- Streuparameter, 102, 111, 115, 189
- Streuung, 93
- Stripline, 123
- Stromdichte, 50, 57, 66, 94, 139
 - Leitungsstromdichte, 50, 94
 - Magnetische Stromdichte, 107
 - Oberflächenstromdichte, 55
 - Verschiebungsstromdichte, 50
 - Wahre Stromdichte, 50
- Stromkompensierte Drossel, 126, 189
- Stromverdrängung, 58
- Stromzange, 198
- Stützkondensator, 112
- StVZO, 174
- Substitutionsmethode, 204
- Subtrahierer, 135
- Superheterodynprinzip, 185
- Superpositionsprinzip, 74, 135
- Surge, 157, 160, 197, 213, 217

- Suszeptibilität, 30
Symmetriertransformator, 126
Symmetrische Leitung, 43
Symmetrische Schaltung, 46
Symmetrische Signalübertragung, 129
Symmetrische Spannung, 43
- TDEMI, 25, 185
Technische Spezifikation, 162
Technischer Bericht, 162, 170
Technischer Dienst, 175
Telegrafengleichung, 86
TEM-Welle, 98, 188, 238
TEM-Zelle, 155, 228, 238
Testplan, 163
Third Party Approval, 241
Tiefpassfilter, 118, 224
Transducer, 180, 184
Transferadmittanz, 148
Transferimpedanz, 146, 233
Transmission, 140
Transmissionsfaktor, 115
Transversal-Elektromagnetische Welle, 98
Trenntransformator, 127
Triaxiales Messverfahren, 148
Triaxialkabel, 144
Twisted-Pair, 137
TX-Line, 94
Typgenehmigung, 176
- Übertrager, 127, 132
Übertragungsmaß, 34
UHF, 27
UKW, 27, 175
Umgebung, 20, 159, 172
UMTS, 27
UN ECE R10, 174, 230
Unbeabsichtigte Störaussendung, 23
Unsymmetrische Spannung, 43
UTD, 61
- Vakuum-Lichtgeschwindigkeit, 40
VDE 100, 46, 70
Verallgemeinerte Beugungstheorie, 61
Verpolsichere Schaltung, 246
Verschiebungsstromdichte, 50
Verseilen von Leitern, 81, 129
Versorgungsleitung, 111
Verstärker, 36, 135, 196
Vertikale Richtlinie, 151
Verursacherprinzip, 151
VHF, 27
Via fence, 99
Vierpolkondensator, 111
Viertelwellenmonopol, 93, 258
VNA, 148
Vulnerable Phase, 31, 206
- Wabenkamineinsatz, 142, 226
Wahre Stromdichte, 50
Wanddurchführung, 227
Wechselstromrechnung, 53
Wellenausbreitung, 49, 58, 86
Wellenlänge, 258
Widerstand, 66, 110
Wirbeldichte, 53
Wirbelfeld, 51
Wirbelstrom, 139, 219
Witness Test, 163
WLAN, 23, 28, 161, 199
Wohnbereich, 20, 159
Worst-Case-Betriebszustand, 244
- Yee-Gitter, 60
- Zeit- und Kostenbedarf, 241
Zeitbereichsmessempfänger, 25, 185
Zeitvarianz, 24, 32
Zulassung, 173
Zulassungsverfahren, 150
Zweileitersystem, 43
Zykluszeit, 31, 192, 244
Zylinderkoordinatensystem, 73, 255