



Leseprobe

Frank Gustrau, Holger Kellerbauer

Elektromagnetische Verträglichkeit

Berechnung der elektromagnetischen Kopplung, Prüf- und Messtechnik,  
Zulassungsprozesse

ISBN (Buch): 978-3-446-44301-3

ISBN (E-Book): 978-3-446-44398-3

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44301-3>

sowie im Buchhandel.

# Vorwort

Das vorliegende Lehr- und Praxisbuch bietet Studierenden 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 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 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 der technisch ausgebildete Ingenieur bei den EMV-Messverfahren in der Regel schnell einen inhaltlichen Zugang findet, ist er gerade bei Zulas-

sungsfragen und -abläufen oft ratlos und auf externe 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 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 Kollegen und 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

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>15</b>
1.1	Definition und Motivation	15
1.2	Elektromagnetische Verträglichkeit als horizontale Disziplin	16
1.3	Aufbau des Buches	17
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Begriffe der EMV</b>	<b>19</b>
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	33
2.4.1	Relative Pegel	34
2.4.2	Absolute Pegel	36

2.5	Schaltungskonzepte .....	38
2.5.1	Einfache Grundschialtung .....	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 .....	49
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 EMV .....110**

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 Dämpfung durch Kabelschirme ..... 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 ..... 153
  - 5.2.2 Übersicht Normenreihe ISO 11452..... 153
  - 5.2.3 Übersicht Normenreihe IEC 61000-3 ..... 155
  - 5.2.4 Übersicht Normenreihe IEC 61000-4 ..... 155
  - 5.2.5 Übersicht Normenreihe CISPR ..... 156
  - 5.2.6 Übersicht Normenreihe ISO 7637 ..... 156
  - 5.2.7 Fachgrundnormen ..... 159
  - 5.2.8 Produktnormen ..... 159
  - 5.2.9 Akkreditierung von Laboren ..... 160
  - 5.2.10 Ausgabestände von Normen ..... 160
  - 5.2.11 Andere Dokumententypen aus der Normenwelt..... 161
- 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..... 164
  - 5.4.1 Die Konformitätsvermutung ..... 164
  - 5.4.2 Rolle des Herstellers ..... 165
  - 5.4.3 Anwendung harmonisierter Normen ..... 166
  - 5.4.4 Dokumentenbewertung ..... 166
  - 5.4.5 Behördliche Aufsicht durch die BNetzA ..... 167
- 5.5 Die Benannte Stelle ..... 168
  - 5.5.1 Rechtsgrundlage der Benannten Stelle ..... 169
  - 5.5.2 Nutzen für den Hersteller..... 169

5.5.3	Technischer Bericht der Benannten Stelle .....	169
5.5.4	Einschränkungen für den Betrieb .....	171
5.5.5	Erklärung der Benannten Stelle.....	171
5.5.6	Produktgruppenbildung .....	172
5.6	E-Kennzeichnung .....	172
5.6.1	Die Kraftfahrzeugrichtlinie .....	173
5.6.2	Rolle des Herstellers .....	174
5.6.3	Rolle des technischen Dienstes .....	174
5.6.4	Rolle der Behörden (KBA) .....	175
5.7	Elektromagnetische Umweltverträglichkeit .....	175

## **6 Messen und Prüfen .....177**

6.1	Messkette bei Störaussendungsmessungen .....	178
6.1.1	Messwandler und Transducer .....	178
6.1.2	Oszilloskope .....	180
6.1.3	Messempfänger .....	183
6.1.4	Spektrumanalysator .....	184
6.1.5	Messleitungen.....	185
6.1.6	Netzwerkanalysator .....	188
6.1.7	Detektoren für Störaussendungsmessungen .....	189
6.1.8	Messzeiten für Störaussendungsmessungen .....	190
6.1.9	Bandbreiten für Störaussendungsmessungen.....	191
6.2	Messkette bei Störfestigkeitsmessungen .....	192
6.2.1	Signalgenerator .....	193
6.2.2	Modulationsarten .....	193
6.2.3	Verstärker .....	194
6.2.4	Messwandler .....	195
6.2.5	Funktionsprinzip einer Feldsonde .....	200
6.2.6	Monitoring der Messkette .....	201
6.2.7	Monitoring des Prüfmusters .....	202
6.2.8	Kalibrierung .....	203
6.2.9	Mehrpunktkalibrierungen.....	204
6.2.10	Messzeiten für Störfestigkeitsmessungen .....	205
6.2.11	Bewertung einer Störfestigkeitsmessung.....	205
6.3	Messung von sehr niederfrequenten Störaussendungen .....	206
6.3.1	Oberschwingungsströme .....	207
6.3.2	Flicker .....	208
6.3.3	Netzurückwirkungen als Störfestigkeitsprüfung .....	208



6.4	Prüfungen der Impulsfestigkeit.....	209
6.4.1	Impulserzeugung .....	209
6.4.2	Frequenzbereichsbelegung von Impulsen .....	210
6.4.3	Koppelmechanismen für Impulsprüfungen .....	210
6.4.4	Gängige Impulsformen .....	211
6.4.5	Sehr langsame impulsartige Vorgänge (Wellenformen) .....	212
6.4.6	Elektrostatische Entladung (ESD) .....	213
6.4.7	Hochtesten bei Impulsprüfungen .....	215
6.4.8	Prüfzeiten bei Impulsprüfungen .....	215
6.5	Ein Messplatz für EMV-Prüfungen: Absorberhallen .....	216
6.5.1	Schirmung .....	217
6.5.2	Reflexionsdämpfung .....	218
6.5.3	Freiraum- und Freifeldhallen .....	219
6.5.4	Öffnungen in der Schirmung .....	222
6.5.5	Störquellen und -senken innerhalb der Absorberhalle .....	225
6.5.6	Reziprozität von Messwandlern .....	226
6.5.7	Messungen in der Absorberhalle .....	226
6.6	Schirmkabinen.....	230
6.7	Freifeldmessungen .....	234
6.8	Die Modenverwirbelungskammer .....	235
6.9	TEM-Zelle .....	236
6.9.1	Prinzip.....	236
6.9.2	Zellentypen .....	237

## **7** Prüfvorbereitungen .....**239**

7.1	Zeit- und Kostenbedarf einer EMV-Prüfung .....	239
7.1.1	Pre-Compliance-Tests im eigenen Betrieb .....	240
7.1.2	Compliance-Tests im eigenen Betrieb .....	240
7.1.3	Prüfungen bei einem externen Dienstleister .....	241
7.2	Die Auswahl eines Betriebszustandes .....	242
7.2.1	Anforderungen an die Repräsentanz.....	242
7.2.2	Anforderungen an die Stabilität .....	242
7.2.3	Anforderungen an die Software zum Betrieb des Prüflings .....	243
7.3	Anforderungen an die Peripherie .....	243
7.3.1	Peripherie bei Störaussendungsmessungen .....	244
7.3.2	Peripherie bei Störfestigkeitsmessungen .....	245
7.3.3	Peripherie im Prüfaufbau.....	245

---

7.4	Formulierung von Bewertungskriterien .....	245
7.4.1	Definition von Funktionsklassen und Toleranzen .....	245
7.4.2	Auswahl von sinnvollem Monitoring .....	246
7.5	Entstörung während der Prüfung .....	248
7.5.1	Identifikation des Problems .....	248
7.5.2	Modifikationen während einer Prüfreihe .....	249
7.5.3	Entstörungsmaßnahmen ohne Modifikation .....	250
7.5.4	Entstörungsmaßnahmen mit Modifikation .....	250
<b>A</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>251</b>
A.1	Koordinatensysteme .....	251
A.1.1	Kartesisches Koordinatensystem .....	252
A.1.2	Zylinderkoordinatensystem .....	253
A.1.3	Kugelkoordinatensystem .....	254
A.2	Lineare und logarithmische Größen .....	255
A.3	Frequenzen und Wellenlängen .....	256
	<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>257</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>262</b>
	<b>Index .....</b>	<b>266</b>

# 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

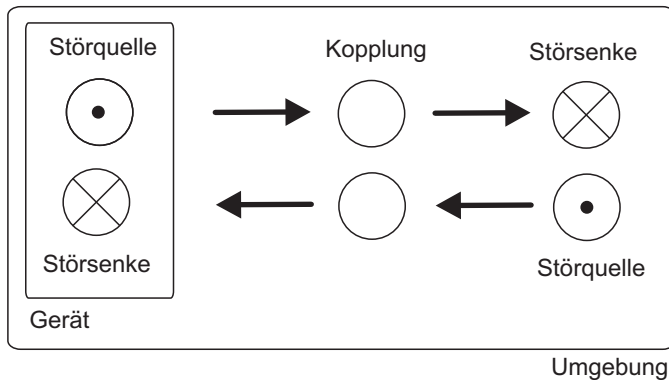
Elektromagnetisch verträglich sein, heißt, dass ein Gerät, ein System, oder eine Einrichtung in einem elektromagnetisch belasteten Umfeld zufriedenstellend funktioniert und nicht übermäßig zum Störgeschehen der Umgebung beiträgt. EMV ist also eine *bidirektionale* Eigenschaft von elektrischen Systemen. 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 von GSM 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 GSM und (seit einigen Jahren) 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.

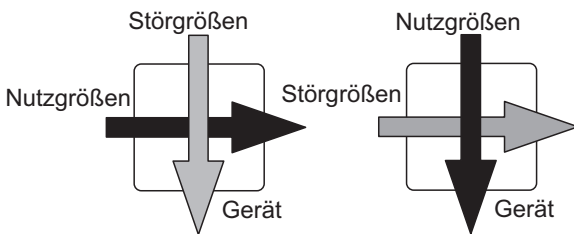
Besonders kritisch wird es, wenn man für ein Betriebsmittel keine feste elektromagnetische Umgebung festlegen kann – *Fahrzeuge* z.B. können praktisch überall zum Einsatz kommen – egal, ob auf dem einsamen Bauernacker mit schwachen Störfestigkeitsanforderungen oder als Dienstfahrzeug am Flughafen, wo neben vielen Funkdiensten auch Systeme wie Radar im Einsatz sind, die mit hohen Sendepiegeln arbeiten. Bei PKW und LKW sind daher die Anforde-

rungen 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.

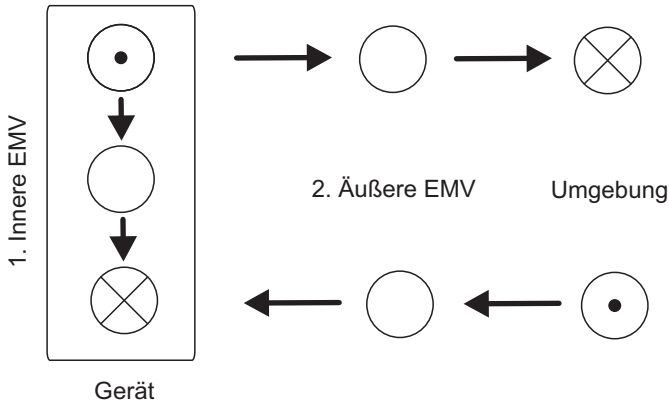
Es ist die Aufgabe der technischen Normung, Aussendungen so zu begrenzen und Störfestigkeit so einzufordern, dass alle technischen Einrichtungen in einer Umgebung störungsfrei zufriedenstellend funktionieren können. Störende Einflüsse können, wenn es sich um technisch genutzte Sendefrequenzen handelt, 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 vornherein 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

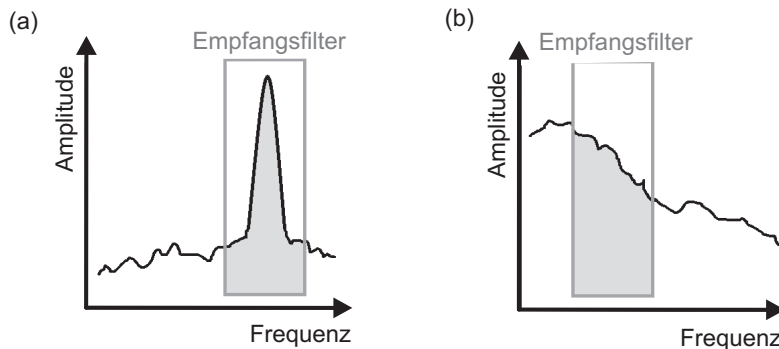
Werden die Störaussendungen über das Gehäuse als elektromagnetische Welle ausgesendet, spricht man von gestrahlter Störaussendung – Beispiele sind alle Arten von Funksendern, aber auch andere schlecht geschirmte Gehäuse, die intern genutzte Signale über die Luftschnittstelle nach Außen abstrahlen. Verlässt 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 GSM, WLAN, Radio, Fernsehen, Bluetooth, UMTS und Radar. Aufgrund der Lizenzgebühren, die für die Nutzung bestimmter Frequenzbereiche entrichtet werden müssen und dem strikten Frequenznutzungsplan der Bundesnetzagentur, sind beabsichtigte Störaussendungen eigentlich immer schmalbandig, d.h. sie beanspruchen nur so wenig Spektrum wie nötig. Eine der wenigen beabsichtigten breitbandigen Anwendungen wäre z.B. ein militärischer Störsender. Unbeabsichtigte Störaussendungen entstehen als unerwünschtes Nebenprodukt von Systemfunktionen – Beispiele sind die Oberwellen, die von Netzteilen durch den Gleichrichtungsprozess entstehen, Sinussignale von Oszillatoren auf Platinen, die durch schlecht geschirmte Gehäuse dringen und dergleichen. Unbeabsichtigte Störaussendungen können prinzipiell immer vermieden werden, im Wege stehen jedoch hohe Kosten und Bauraumbegrenzungen für Entstörmaßnahmen. Ein gewisser Pegel von unbeabsichtigten Störaussendungen emittiert eigentlich jedes Gerät. Bei natürlichen Phänomenen ist es unsinnig, 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 Empfangsfilter 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 Bürstentmotoren 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, Schaltimpulse und nuklear-elektromagnetische Impulse.

### 2.2.1.6 Zeitvarianz von Störquellen

Systeme sind, je nach Funktionsumfang, nicht zu jedem Zeitpunkt gleich problematisch bzgl. ihrer Störaussendung. Viele Systeme haben eine interne oder sichtbare Zykluszeit, in der es kritische Phasen gibt, in denen die Systemkomponenten besonders viele Störungen erzeugen, oder besonders empfindlich gegen externe Störungen sind. Ein einfaches und aus dem Alltag bekanntes Beispiel wäre ein Kühlschrank, der verschiedene Zustände hat – „Kompressor läuft“



und „Kompressor läuft nicht“, die sich zeitlich abwechseln. In dem Moment, wo der Kompressor zugeschaltet wird, entstehen der Erfahrung nach besonders viele breitbandige Störungen durch den laufenden Motor.

Die Zeitvarianz hat dabei einen großen Einfluss auf die Messbarkeit der Störaussendung in Laborversuchen. Will man jeden Systemzustand abprüfen, muss die Messzeit pro Frequenzschritt dabei mindestens der doppelten Zykluszeit des zu prüfenden Systems entsprechen, damit sichergestellt ist, dass in jedem Messschritt alle Zustände abgespult wurden. Bei langen Zykluszeiten erweist sich dies zum Teil als völlig unpraktikabel, was die Reproduzierbarkeit von Messungen besonders stark einschränken kann.

Eine Lösung kann sein, das Messgerät in den „Turbomodus“ zu versetzen. Bei Messempfängern – dem zentralen Messmittel in der EMV – unterscheidet man den hochpräzisen Schrittbetrieb „stepped“ (bei dem es zu den oben genannten Problemen kommen kann) und den schnellen Analysebetrieb „swept“, den auch die weniger präzisen Spektrumanalysatoren beherrschen. Der Frequenzbereich wird schnellstmöglich hundertfach hintereinander überstrichen und ein Messwert nur dann aktualisiert, wenn er größer als der bisher gespeicherte Wert bei einer jeden Frequenz ist. Man wartet nun ab, bis die Ergebnisse stabil sind, d.h. trotz weiterer Durchläufe keine noch höheren Pegel mehr gefunden werden. Aufgrund der schlechteren Pegelpräzision sind oft noch händische Nachmessungen erforderlich.

Eine noch präzisere Lösung dieses Problems für die Emissionsseite bieten sogenannte Zeitbereichs-Messempfänger (TDEMI – „Time Division Emission Measurement Instrument“), die das Zeitsignal mit großer Präzision, Bandbreite und Speichertiefe abtasten und dann via diskreter Fouriertransformation (DFT) die Frequenzbereichsbelegung berechnen. Der Beobachtungszeitraum muss dann für den gesamten Messbereich nur noch der doppelten Zykluszeit entsprechen. Jedoch sind, nach aktuellem Stand der Technik, diese Geräte noch nicht völlig etabliert und sehr hochpreisig. Das größte Problem, was bei dieser mathematisch eigentlich simplen Vorgehensweise in der Vergangenheit im Wege stand, war eine ausreichende Messbandbreite (um alle Bestandteile des Zeitsignales bis zu sehr schnellen Änderungen aufzeichnen zu können) und die Nachbildung der durch die Normen vorgeschriebenen Detektoren (vgl. dazu Abschnitt 6.1.3 zum Thema „Messempfänger“). Eine Befürchtung der Hersteller, man würde so etwas zu genau (und wirklich alles) messen und jeder Prüfling würde schon bei irgendeiner Frequenz durchfallen, könnte ein Grund für die zögerliche Haltung der Industrie mit Blick auf dieses Messinstrument sein.

Für die Störfestigkeitsmessungen muss man mit der teilweise schlechten Reproduzierbarkeit leben oder spezielle Prüfprogrammabläufe für das zu prüfende System festlegen, die die Zustände schneller hintereinander abspulen, als dies normalerweise im späteren Betrieb der Fall wäre. Eine breitbandige Messung mit anschließender Fouriertransformation ist prinzipiell nicht möglich, da auf diese Weise kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Funktionsminderungen und einzelnen Frequenzen bzw. exakten Störpegeln hergestellt werden kann.

## 2.2.2 Beispiele von Störquellen

Störquellen sind meist in der Leistungselektronik zu finden, da hier die vorherrschenden Pegel hoch sind und es zu vielen Schalthandlungen kommt. Häufig vorkommende Phänomene sind Oberschwingungsströme, Flicker, breitbandige Störaussendungen auf Leitungen und vom Gehäuse sowie Überspannungsimpulse.

**Mobiltelefon** Ein Mobiltelefon produziert eine schmalbandige, beabsichtigte, intermittierende, gestrahlte und künstliche Störaussendung. Das Mobiltelefon steht hier stellvertretend für alle nicht dauerhaft genutzten Funksender bzw. Funkempfänger.

**Blitzschlag** Ein direkter Blitzeinschlag ist eine breitbandige, gewöhnlich leitungsgebundene, natürliche und intermittierende Störquelle. Allerdings produziert der Plasmakanal wegen seiner enormen räumlichen Ausdehnung auch einen elektromagnetischen, gestrahlten Impuls, den sogenannten LEMP („lightning electromagnetic pulse“).

**Lastabwurf** Werden große, induktive Verbraucher im Netz hart abgeschaltet, entstehen leitungsgebundene, künstliche, breitbandige, intermittierende und unbeabsichtigte Störimpulse mit hohen Amplituden und kurzen Steigzeiten. Je härter geschaltet wird, desto breitbandiger ist das Spektrum des Impulses – als Faustregel kann die Steigzeit invertiert werden, d.h. ns entsprechen GHz,  $\mu$ s entsprechen MHz und ms entsprechen kHz.

**Taktgeber** Auf Leiterkarten oder in integrierten Schaltungen können Taktgeber unbeabsichtigte, schmalbandige, kontinuierliche, künstliche Störungen über das Gehäuse (gestrahlt) oder die angeschlossenen Leitungen (leitungsgebunden) aussenden.

### 2.2.3 ISM-Bänder contra lizenzierte Funkbänder

Schmalbandige beabsichtigte Störaussendungen müssen noch in zwei Kategorien unterteilt werden, die rechtlich einen unterschiedlichen Stand haben. Funkdienste in lizenzierten Funkbändern nutzen das ihnen zugewiesene Frequenzspektrum exklusiv – der Funknetzbetreiber hat dafür teilweise hohe Lizenzgebühren bezahlt und verpflichtet gewöhnlich alle Nutzer zu Netznutzungsentgelten – ein Beispiel hierfür ist der Mobilfunk im GSM-Band (900 MHz D-Netz und 1800 MHz E-Netz). Andere Dienste dürfen die Frequenzbänder technisch nicht nutzen und sind an Grenzwerte für die Emission gebunden – diese Grenzwerte dienen dann dem sogenannten *Funkschutz*. Andere Beispiele hierfür sind Radio- und Fernsehgrundfunk – der Staat hat Lizenzgebühren erhalten und verpflichtet sich im Gegenzug dazu, die Spektren durch geeignete Maßnahmen vor unberechtigter Nutzung oder willkürlicher Störung (unbeabsichtigte Störaussendungen) zu schützen. Die hoheitliche Aufgabe des Funkschutzes nimmt die Bundesnetzagentur wahr.

Die Pflicht zur Sicherstellung von ungestörtem Radio- und Fernsehempfang ist dabei der Ursprung aller modernen EMV.

Im *Frequenznutzungsplan* (der im Internet frei einsehbar ist) existieren neben den lizenzierten Bändern (Tabelle 2.1) noch sogenannte ISM-Bänder („industriell, wissenschaftlich, medizinisch“), die lizenzkostenfrei von technischen Geräten uneingeschränkt genutzt werden können, hierzu gehören z.B. 2,4 GHz, wo WLAN<sup>1</sup>, Bluetooth und Mikrowellenherde operieren (Tabelle 2.2). Hierbei ist der Nutzer rechtlich nicht vor Störungen geschützt – funktioniert WLAN nicht, weil ein Nachbar in der Umgebung die 2,4 GHz anderweitig nutzt und die Signale interferieren, gibt es keinen Anspruch auf Funkschutz. Andere Beispiele für Geräte, die ISM-Frequenzen (kostenfrei) nutzen sind Funkkopfhörer, Modellfahrzeugfernbedienungen, Fahrzeugfunkschlüssel und RFID (Funketiketten).

---

<sup>1</sup> Nun wird auch klar, warum Mobiltelefonie kostet, WLAN aber nicht.

Überschneiden sich lizenzierte und freie Funkbänder, so kann dies dennoch funktionieren, indem die freien Services leistungsbegrenzt und lokal eingeschränkt verwendet werden. Ein Beispiel hierfür sind der geschützte Amateurfunk und die breitbandige Powerline-Communication (PLC), die zur Wohnungsvernetzung genutzt wird. In der Vergangenheit hat es viele Rechtsstreits wegen des gemeinsam genutzten Funkbandes gegeben, da die eigentlich leitungsgebundenen Signale der Powerline-Communications von Leitungen in der Wand in den Luftraum abgestrahlt wurden. Dieses Problem wurde technisch gelöst, indem neuere PLC-Endgeräte ihr Sendeband mit präzisen Lücken nutzen und so die bekannten Funkdienste umschiffen.

### 2.2.3.1 Übersicht über einige lizenzierte Funkbänder

In der EN 55011 „Industrielle, wissenschaftliche und medizinische Geräte Funkstörungen – Grenzwerte und Messverfahren“ bzw. der CISPR 11 (internationales Pendant) finden sich im Anhang G und F Listen zu den sogenannten schützenswerten und empfindlichen Funkdiensten. Ein kurzer Überblick zu einigen dieser Dienste sei in Tabelle 2.1 präsentiert.

**Tabelle 2.1** Übersicht über einige lizenzierte Funkbänder

Bandbezeichnung	Anwendung	Frequenzbereich
GSM 900	<i>Global System for Mobile Communication (2G)</i>	880...960 MHz
GSM 1800	<i>Global System for Mobile Communication (2G)</i>	1,71...1,88 GHz
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System (3G)</i>	1,92...2,17 GHz
LTE	<i>Long Term Evolution (4G)</i>	801...862 MHz (E-UTRA Band 2); 1,71...1,88 GHz (E-Utra Band 3); 2,5... 2,69 GHz (E-Utra-Band 7)
GPS	<i>Global Positioning System</i>	1,2276 GHz (L2); 1,57542 GHz (L1)
UKW-Rundfunk	Analoge Radiosender	76...108 MHz
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting – Terrestrial</i>	177,5...226,5 MHz (VHF Band III); 474...786 MHz (UHF Band IV+V)
CB-Funk	CB-Funk	26,965...27,405 MHz
Amateurfunk	Amateurfunk	0,2...30 MHz

### 2.2.3.2 Übersicht über einige ISM-Frequenzbänder

Tabelle 2.2 zeigt einige ISM Funkbänder. Aus dem Informationsblatt der Bundesnetzagentur zu Funkanwendungen auf den ISM-Bändern:

„In der Regel sind die ISM-Frequenzen anderen Funkdiensten auf primärer und sekundärer Basis zugewiesen. Primär- und Sekundärnutzer dürfen durch ISM-Funkanwendungen nicht gestört werden. Umgekehrt haben ISM-Anwender Störungen durch andere Funkdienste hinzunehmen.“

# Index

- 26. BImSchV, 176
- 3-dB-Eckfrequenz, 114
- 3D-EM-Simulation, 59
  
- Abblockkondensator, 111
- Abschlussnetzwerk, 46
- Absoluter Pegel, 36
- Absorber, 218, 237
- Absorberfolie, 105
- Absorberhalle, 154, 216
- Absorption, 140
- Abstrahlung, 46, 91, 111
- ADS, 66, 83, 94, 99, 102, 107, 115, 123
- Äquivalente Leitschichtdicke, 68
- Äußere EMV, 22
- Akkreditierung, 160, 240
- Akkreditierungsstelle, 160
- Aktive Filter, 124
- Ampere'sches Gesetz, 50
- Anpassung, 33, 39, 42, 115
- Anschnitt-Steuerung, 207
- Antenne, 37, 91, 168, 178, 195, 197, 227, 228
- Antennenfaktor, 37, 38, 179
- Anwendungsbereich, 159
- Arbeitsentwurf, 161
- Arbitrier-Netzgerät, 209
- Asymmetrische Spannung, 43
- Audit, 160, 174
- Augendiagramm, 31
- Ausbreitungsgeschwindigkeit, 58
- Ausbreitungskonstante, 39, 86
- Ausgabestand, 160
- Average-Detektor, 189
  
- B2B, 163
- Babinet'sches Prinzip, 106
- Balun, 132
- Bandbreite, 189
  - Impuls, 26, 210
- Bandpassfilter, 118
  
- Bandsperrfilter, 119
- Basisanforderungen, 152
- BCI, 153, 197, 231, 240
- Beabsichtigte Störaussendung, 23
- Bedeckungsgrad, 148
- Beeinflussungsmodell, 19
- Benannte Stelle, 166–168, 246
- Berufsgenossenschaftliche Vorschrift, 176
- Best practice, 166
- Betriebssicherheit, 205
- Betriebszustand, 242
- Beugung, 93
- Bewertung, 205
- Bewertungskriterien, 245
- Bezugspotential, 40, 46, 64, 112, 129
- BGV B11, 176
- Bikonische Antenne, 178, 199
- Biot-Savart'sches-Gesetz, 57
- Blitzeinschlag, 26, 29, 233
- Blitzimpuls, 196
- BNetzA, 15, 167
- Breitbandige Störaussendung, 24
- Breitbandige Störung, 189
- Bulk Current Injection, 230
- Bundesemissionsschutzverordnung, 28, 176
- Bundesnetzagentur, 15, 22, 26, 160, 166
- Burst, 157, 211
- Butterworth-Filter, 118
  
- CAD, 62
- CAN-Bus, 33, 202, 224, 248
- CDN, 155, 180, 196
- CE-Kennzeichen, 164
- CENELEC, 151
- CISPR, 151, 156
- CISPR 11, 27, 153
- CISPR 25, 226
- CISPR-Mittelwertdetektor, 190
- Closed-Loop-Verfahren, 232
- Common mode, 43

- Compliance-Test, 240  
 Coulomb-Eichung, 57  
 Courant-Stabilitätskriterium, 61  
 Crawford-TEM-Zelle, 237  
 Cut-off-Frequenz, 42, 62, 142, 186, 223  
 – Koaxialleitung, 186  
 – Rundhohlleiter, 142  
  
 Dämpfung, 93, 185  
 Dämpfungskonstante, 39, 187  
 DAkkS, 160  
 dB, 34, 183, 255  
 dBi, 92  
 dBm, 37  
 Detektor, 189  
 Deutsche Akkreditierungsstelle, 160  
 Dezibel, 34, 255  
 DFT, 25, 61, 182  
 Dielektrikum, 139  
 Dielektrizitätszahl, 50  
 Dienstleister, 241  
 Differential mode, 43  
 Differentialoperator, 252  
 Differenzverstärker, 133  
 Dipol, 91, 107, 178  
 Dips, 211  
 Diskrete Fouriertransformation, 25, 61, 182  
 Diskretisierung, 78  
 Dispersion, 61, 87, 95, 98  
 Divergenz, 53, 252  
 Dokumentenbewertung, 166  
 Doppelleitung, 74  
 Dreileitersystem, 40, 43, 111, 131, 144  
 Drossel, 126  
 Dualität, 106  
 Durchführungskondensator, 112  
 Durchflutungsgesetz, 50, 71, 73  
 DVB-T, 27  
  
 E-Kennzeichnung, 172  
 Effektive relative Dielektrizitätszahl, 94  
 Eindringtiefe, 68  
 Einfügedämpfung, 114  
 Eingangsimpedanz, 42  
 Eingangsschutzbeschaltung, 215  
 Einheitenvorsilben, 255  
 Einheitsvektor, 252–254  
  
 Electromagnetic co-simulation, 59  
 Electromagnetic Compatibility, 15  
 Elektrisch kurze Leitung, 39, 146  
 Elektrische Feldstärke, 49  
 Elektrische Leitfähigkeit, 50, 66  
 Elektrischer Fluss, 52  
 Elektrisches Potential, 56, 82  
 Elektromagnetische Schirmwirkung, 138  
 Elektromagnetische Umweltverträglichkeit, 33, 175  
 Elektromagnetische Verträglichkeit, 15  
 Elektromagnetische Wellen, 91, 140  
 Elektronische Unterbaugruppe, 226  
 Elektrostatik, 56  
 Elektrostatische Entladung, 213  
 EM-Simulation, 59  
 Empire, 76, 87  
 EMV, 15  
 EMV-Gesetz, 16, 150  
 EMV-Modell, 19  
 EMV-Umgebung, 20  
 EMVG, 16, 150, 165  
 EMVU, 33, 175  
 EN 13309, 152, 173  
 EN 55011, 27, 153, 160, 170  
 Entstörfilter, 118  
 Entstörkondensator, 244  
 Entstörungsmaßnahmen, 250  
 Entwicklungsbegleitende Messung, 239  
 Erde, 70  
 Erdpotential, 70  
 Erdschleife, 70, 73  
 Erklärung der Benannten Stelle, 171  
 ESD, 213  
 ESD-Generator, 157  
 ESD-Pistole, 213  
 Ethernet, 202  
 ETSI, 161  
 EUB, 226  
 Even mode, 45  
  
 Fachgrundnormen, 159  
 Fahrzeug, 20  
 Fahrzeuge, 172  
 Fail safe, 30  
 Faraday'sches Gesetz, 51  
 FDTD, 60, 76, 87

- Federkontakte, 222
- Feldsimulation, 56, 59
- Feldsonde, 200, 203
- Feldstärke
  - elektrisch, 37
  - Messung, 37
- Feldwellenwiderstand, 86, 140
- FEM, 102
- Fernfeld, 49, 92, 140
- Ferritkachel, 218
- Ferritring, 127, 187
- Ferritzange, 223
- Filter, 118, 195, 222
- Finite Differenzen im Zeitbereich, 60, 87
- Finite-Elemente-Methode, 102
- Flicker, 155, 206, 208
- Fluss
  - elektrischer, 52
  - magnetischer, 51
- Fouriertransformation, 25, 182, 210
- FR4, 94
- Freifeldhalle, 180, 220
- Freifeldmessplatz, 234
- Freiraumhalle, 219
- Frequenz, 256
- Frequenznutzungsplan, 26, 170
- FSPC, 29
- FTEM-Zelle, 237
- Funkschutz, 15, 26, 167, 191, 232
- Funktionsklasse, 245
- Funktionszustand, 233
  
- Galvanische Kopplung, 48, 64
  - Messwandler, 195
- 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
- Geschützter Bereich, 20
  
- Gesetz, 150
  - EMVG, 16
- Gestrahlte Störaussendung, 23
- Gipskartonabsorber, 218
- Glasfaser, 222
- Gleichtakt, 71, 73
- Gleichtaktdrossel, 126, 187
- Gleichtaktmode, 43
- Gleichtaktstörung, 73, 111, 126
- Gleichtaktunterdrückung, 136
- GPS, 27
- Gradient, 56, 252
- Grenzfrequenz, 114
- Grenzwerte, 151
- Ground Shift, 213
- Grundnormen, 160
- Gruppenlaufzeit, 120
- GSM, 23, 27
- GTEM-Zelle, 237
- Güte, 124
  
- Halbwellendipol, 91, 106, 198, 199, 256
- Harmonisierte Normen, 152, 166
- Hauptstrahlrichtung, 92
- Herstellerspezifikationen, 162, 229
- Hochfrequente Felder, 58
- Hochfrequenzmesstechnik, 185
- Hochpassfilter, 118
- Höhenscan, 109, 221
- Hohlraumresonanz, 142, 217, 235
- Hohlraumresonator, 101, 142
- Homogenfeldkalibrierung, 204
- Horizontale Richtlinie, 151
- Hybride Simulationsverfahren, 62
  
- IEC, 151
- IEC 60050, 15
- IEC 61000-3, 155
- IEC 61000-4, 152, 155
- Impedanzanpassung, 244
- Impedanztransformation, 42
- Impuls, 26
- Impulserzeugung, 209
- Impulsfestigkeit, 209
- Impulsprüfung, 215
- Induktionsgesetz, 51, 72, 74, 130
- Induktive Kopplung, 48, 71

- Messwandler, 195, 196
- Induktivität, 69, 113
- Industriebereich, 20
- Innere EMV, 21
- Innere Induktivität, 69
- Instrumentenverstärker, 135
- Interferenz, 93, 221
- Intermittierende Störaussendung, 24
- Invertierender Verstärker, 134
- ISM, 158
- ISM-Frequenzen, 27
- ISO, 151
- ISO 11451, 153
- ISO 11452, 153
- ISO 11452-2, 228
- ISO 13766, 152
- ISO 17025, 160
- ISO 61000-4, 204
- ISO 7367-2, 32, 211
- ISO 7637, 156, 173
- Isotroper Kugelstrahler, 92
  
- Kabelschirm, 41, 144
- Kabelschirmdämpfung, 148
- Kalibriedatei, 203
- Kalibrierung, 203
  - Mehrpunktkalibrierung, 204
- Kamindurchführung, 142
- Kapazitive Kopplung, 48, 82
  - Messwandler, 195, 196
- Kartesisches Koordinatensystem, 252
- Kettenschaltung, 36
- Klappferrit, 127, 245
- Klassifikation von Reaktionen, 29
- Koaxiale Wanddurchführung, 224
- Koaxialleitung, 41, 81, 144, 185, 186
- Kondensator, 110
- Konformitätserklärung, 161, 164
- Konformitätsvermutung, 165
- Kontaktfederleiste, 142
- Kontinuierliche Störaussendung, 24
- Koordinatensysteme, 251
- Koplanare Leitung, 98
- Koppelimpedanz, 65
- Koppelnetzwerk, 180
- Koppelzange, 226
- Kopplung
  - galvanisch, 64
  - induktiv, 71
  - kapazitiv, 82
  - Leitungs-, 86
  - Strahlungs-, 91
- Kopplungsmechanismen, 48
- Kopplungsmechanismus, 64
- Kopplungswiderstand, 146
- Kosten einer EMV-Prüfung, 239
- Kraftfahrtbundesamt, 160, 172
- Kraftfahrzeugrichtlinie, 151, 173
- Kugelkoordinatensystem, 92, 254
- Kurzschlussring, 79, 81
  
- Ladung, 52, 138
- Ladungsdichte, 55
- Laplace-Operator, 56, 252
- Lastabwurf, 29, 212
- LC-Filter, 118
- Leistungsflussdichte, 140
- Leitfähigkeit, 50, 66
- Leitung, 38, 40, 129
  - Anpassung, 42
  - Cut-off-Frequenz, 142, 186
  - Dreileitersystem, 43
  - Eingangsimpedanz, 42
  - Elektrisch kurz, 39
  - Impedanztransformation, 42
  - Koaxialleitung, 41
  - Leitungswellenwiderstand, 41
  - Messleitung, 185
  - Mikrostreifenleitung, 41
  - Paralleldrahtleitung, 41
  - Rundhohlleiter, 142, 223
  - Symmetrisch, 43, 129
- Leitungsfilter, 123
- Leitungsgebundene Störaussendung, 23
- Leitungskopplung, 49, 86
- Leitungsstromdichte, 50
- Leitungswellenwiderstand, 39, 40, 81, 86, 132, 137, 187, 244
  - Dreileitersystem, 45
- LEMP, 26
- Lenz'sche Regel, 79, 139
- Lichtgeschwindigkeit, 40
- Lichtwellenleiter, 90, 128, 224
- LIN-Bus, 202, 248

- Litze, 146
- Lizenzierte Funkbänder, 26
- Load Dump, 212
- Logarithmisch-periodische Dipolantenne, 37, 178, 199
- Logarithmische Darstellung, 33, 255
- LPDA, 37, 178, 199
- LTCC, 97
- LTE, 27
  
- Magnetische Feldstärke, 49
- Magnetische Stromdichte, 107
- Magnetischer Fluss, 51
- Magnetisches Vektorpotential, 56
- Magnetostatik, 56
- Mantelwellen, 223
- Mantelwellenunterdrückung, 187
- Maschinenrichtlinie, 152
- Masse, 33, 40, 46, 64, 121, 129, 162, 213
- Massefläche, 81
- Massekonzept, 33, 70
- Masseschleife, 70, 73, 125, 129
- Materialgleichungen, 49
- Maxwell'sche Gleichungen, 48, 49
  - Differentialform, 52
  - Integralform, 50
- Mehrpunktkalibrierung, 204
- Messbandbreite, 191, 228
- Messempfänger, 25, 37, 183
  - Zeitbereichs-, 25
- Messkette
  - Netzrückwirkung, 206
  - Störaussendungsmessung, 178
  - Störfestigkeitsmessung, 192
- Messleitung, 185
- Messwandler, 178, 195, 226
- Messzeit, 190, 205, 226
- Metallisches Gehäuse, 102
- Methode der Finiten Differenzen im Zeitbereich, 76
- Microstrip, 123
- Mikrostreifenleitung, 41, 87, 97, 123
- Mittelwertdetektor, 189, 226
- MMIC, 97
- Mobilfunk, 198
- Modenverwirbelungskammer, 155, 235
- Modulationsarten, 193
  
- MoM, 61
- Momentenmethode, 61, 83, 99, 107
- Monitoring, 201, 246
- Monopolantenne, 93, 199
- Mu-Metall, 139
  
- Nabla-Operator, 56, 252
- Nachrichtenkabel, 90
- Nahfeld, 49, 92
- Neper, 36
- Netznachbildung, 180, 232
- Netzurückwirkung, 206, 208
- Netzwerkanalysator, 148, 188
- Neutralleiter, 33
- Nichtinvertierender Verstärker, 134
- Normen, 16, 152
  - CISPR, 156
  - CISPR 11, 27, 153
  - EN 13309, 152
  - EN 55011, 27, 153, 160
  - Fachgrundnormen, 159
  - Grundnormen, 160
  - Harmonisierte, 152
  - IEC 60050, 15
  - IEC 61000-3, 155
  - IEC 61000-4, 155
  - ISO 11451, 153
  - ISO 11452, 153
  - ISO 13766, 152
  - ISO 17025, 160
  - ISO 7367-2, 32
  - ISO 7637, 156
  - Produktnormen, 159
  - VDE 100, 46, 70
- Numerische Verfahren
  - FDTD, 60
  - MoM, 61
  - UTD, 61
- Nutzgrößenfluss, 21
  
- Oberflächenladungsdichte, 55
- Oberflächenstromdichte, 55
- Oberschwingungsströme, 155, 207
- Odd mode, 45
- Öffnungswinkel, 204
- OEM, 162
- Ohm'scher Widerstand, 66



- Ohm'sches Gesetz, 64  
Operationsverstärker, 124  
Optische Umsetzer, 223  
Optokoppler, 128  
Oszilloskop, 180
- Paralleldrahtleitung, 41, 69, 74  
Peak-Detektor, 189  
Pegel, 33, 255  
Peripherie, 243  
Permeabilitätszahl, 50  
Personenschutz, 28, 33, 232, 235  
Phasengeschwindigkeit, 40  
Phasenkonstante, 39  
Phasor, 54  
Plattenkondensator, 57, 82, 85  
Poisson-Gleichung, 56  
Polarisation, 139  
Polarisationsrichtung, 227, 228  
Potential, 56, 82  
Powerline Communication, 27, 28  
Poyntingvektor, 140  
Pre-Compliance-Test, 239  
Produktgruppenbildung, 172  
Produktnormen, 159  
Prüfkosten, 239  
Prüfling, 177  
Prüfplan, 152  
Prüfungsvorbereitung, 239  
Prüfzeit, 205, 215, 228  
Pulsmodulation, 236
- Quasi-Spitzenwertdetektor, 190, 226  
Quasi-statisches Feld, 57, 82, 138  
Quasi-TEM, 98  
Quasipeak-Detektor, 185  
Quelle, 19  
Quellendichte, 53  
Quellenfeld, 52
- Radar, 23  
Radio, 15  
Randbedingung, 54  
Ratsempfehlung 1999/519/EG, 176  
Raumkopplung, 216  
– Messwandler, 195, 197  
Raumladungsdichte, 52
- RC-Filter, 114  
Rechte-Hand-Regel, 50  
Rechtssystem, 252  
Reduktionsleiter, 81  
Reflexion, 93, 140  
– Absorber, 218  
– Filter, 111  
– Hohlraumresonanz, 144  
– Leitung, 39, 132  
Reflexionsdämpfung, 218  
Reflexionsfaktor, 42, 111  
Regulierungsbehörde, 15  
Relative Dielektrizitätszahl, 40, 50  
Relative Permeabilitätszahl, 50, 139  
Relativer Pegel, 34  
Repräsentanz, 242  
Reproduzierbarkeit, 25  
Resonanz, 91, 101, 107, 111, 194, 235  
Resonanzfrequenz  
– Halbwellendipol, 91, 256  
– Hohlraumresonator, 101, 142  
– Kondensator, 110  
– Patch, 94  
– Spule, 113  
– Viertelwellenmonopol, 256  
Reziprozität, 226  
RFID, 26  
Richtcharakteristik, 92  
Richtfaktor, 92, 108  
Richtfunktion, 92  
Richtkoppler, 201  
Richtlinien, 16, 151  
– 2004/40/EG, 176  
– 89/336/EG, 16  
Ringferrit, 187  
Rotation, 52, 252  
Rundhohlleiter, 142, 223
- S-Parameter, 188  
Samplerate, 180  
Schütt, 223  
Schaltnetzteile, 207  
Schaltungssimulation, 58  
Schaumstoffabsorber, 218  
Schirmdämpfung, 137, 141, 148, 217  
Schirmkabine, 230

- Schirmung, 33, 41, 82, 86, 97, 98, 107, 112, 131, 137, 217
- Schlaglänge, 130
- Schlitzantenne, 106, 142, 222
- Schmalbandige Störaussendung, 24
- Schmalbandige Störung, 189
- Schwingkreis, 116
- Scope, 159
- Semi-Rigid-Koaxialkabel, 145
- Senke, 19
- Serienschwingkreis, 116
- Shannon-Theorem, 191, 226
- SI-Funktion, 210
- Signal-Rausch-Abstand, 21, 184
- Signalgenerator, 193
- Signalverzerrungen, 120
- Simulation, 56, 59
- Skinneffekt, 58, 66
- Skintiefe, 68, 141, 187
- SNR, 184
- Software
  - Prüfling, 243
  - Prüfungsüberwachung, 247
  - Simulation, 59
- Spannungseinbruch, 208
- Spannungswelle, 40
- Spektrum eines Impulses, 210
- Spektrumanalysator, 25, 184, 240
- Spitzenwertdetektor, 189
- Spule, 113
- Spulenantennen, 155
- Stabilität, 242
- Statische Felder, 56, 138
- Stehende Welle, 33, 46, 98, 144, 235
- Steigzeit, 26
- Sternvierer, 90, 131
- Stetigkeitsbedingung, 54
- Störaussendung
  - breitbandig, 24
  - gestrahlt, 23, 226
  - leitungsgelassen, 23
  - schmalbandig, 24
- Störaussendungsmessung, 155, 178, 242
- Störfestigkeit, 30, 151, 228
- Störfestigkeitsmessung, 155, 192, 202, 242
- Störgrößenfluss, 21
- Störquelle, 19, 22, 72
- Störschwelle, 30
- Störsenke, 19, 28, 72
- Strömungsfeld, 56
- Straßenverkehrszulassungsordnung, 151, 173
- Strahlungsdiagramm, 92, 107
- Strahlungskopplung, 49, 91, 195, 216
  - Messwandler, 195
- Strahlungsleistungsdichte, 92
- Streifenleitung, 41, 98, 123, 196, 226
- Streukapazität, 82
- Streuparameter, 102, 111, 115, 188
- 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, 187
- Stromverdrängung, 58
- Stromzange, 196
- Stützkondensator, 112
- StVZO, 173
- Substitutionsmethode, 203
- Subtrahierer, 135
- Superheterodynprinzip, 184
- Superpositionsprinzip, 74, 135
- Surge, 157, 160, 196, 211, 215
- Suszeptibilität, 30
- Symmetriertransformator, 126
- Symmetrische Leitung, 43
- Symmetrische Schaltung, 46
- Symmetrische Signalübertragung, 129
- Symmetrische Spannung, 43
- TDEMI, 25
- Technische Spezifikation, 161
- Technischer Bericht, 161, 169
- Technischer Dienst, 174
- Telegrafengleichung, 86
- TEM-Welle, 98, 187, 237
- TEM-Zelle, 155, 226, 236
- Testplan, 163
- Third Party Approval, 239
- Tiefpassfilter, 118, 222

- Transducer, 179, 183  
Transferadmittanz, 148  
Transferimpedanz, 146, 232  
Transmission, 140  
Transmissionsfaktor, 115  
Trenntransformator, 127  
Triaxiales Messverfahren, 148  
Triaxialkabel, 144  
Twisted-Pair, 137  
TX-Line, 94  
Typgenehmigung, 175
- Übertrager, 127, 132  
Übertragungsmaß, 34  
UHF, 27  
UKW, 27, 174  
Umgebung, 20, 159, 171  
UMTS, 27  
Umweltverträglichkeit, 175  
UN ECE R10, 173, 228  
Unbeabsichtigte Störaussendung, 23  
Unsymmetrische Spannung, 43  
UTD, 61
- Vakuum-Lichtgeschwindigkeit, 40  
VDE 100, 46, 70  
Verallgemeinerte Beugungstheorie, 61  
Verpolsichere Schaltung, 244  
Verschiebungsstromdichte, 50  
Verseilen von Leitern, 81, 129  
Versorgungsleitung, 111  
Verstärker, 35, 135, 194  
Vertikale Richtlinie, 151
- Verursacherprinzip, 151  
VHF, 27  
Via fence, 99  
Vierpolkondensator, 111  
Viertelwellenmonopol, 93, 256  
VNA, 148  
Vulnerable Phase, 31, 205
- Wabenkamineinsatz, 142, 223  
Wahre Stromdichte, 50  
Wanddurchführung, 224  
Wechselstromrechnung, 53  
Wellenausbreitung, 49, 58, 86  
Wellenlänge, 256  
Widerstand, 66, 110  
Wirbeldichte, 53  
Wirbelfeld, 51  
Wirbelstrom, 139, 217  
WLAN, 23, 28, 161, 198  
Wohnbereich, 20  
Worst-Case-Betriebszustand, 242
- Yee-Gitter, 60
- Zeit- und Kostenbedarf, 239  
Zeitbereichs-Mesempfänger, 25  
Zeitvarianz, 24, 31  
Zulassung, 172  
Zulassungsverfahren, 150  
Zweileitersystem, 43  
Zykluszeit, 31, 190, 242  
Zylinderkoordinatensystem, 73, 253