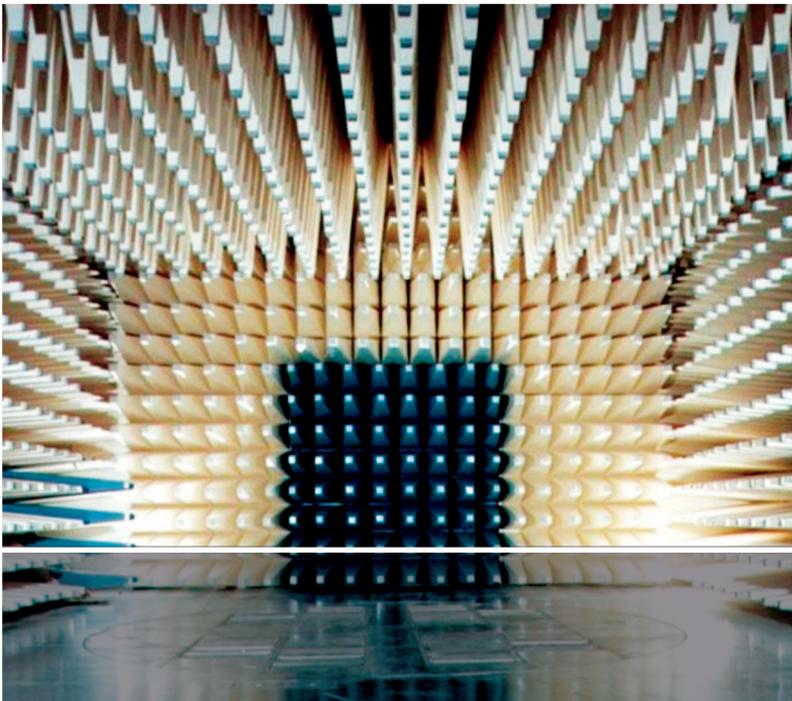


Frank Gustrau  
Holger Kellerbauer

# Elektromagnetische Verträglichkeit

Berechnung der elektromagnetischen Kopplung,  
Prüf- und Messtechnik, Zulassungsprozesse



HANSER

Gustrau/Kellerbauer  
**Elektromagnetische Verträglichkeit**



**Blieben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



Frank Gustrau, Holger Kellerbauer

# Elektromagnetische Verträglichkeit

Berechnung der elektromagnetischen Kopplung,  
Prüf- und Messtechnik, Zulassungsprozesse

Mit 180 Bildern und 23 Tabellen



**Fachbuchverlag Leipzig**  
im Carl Hanser Verlag

**Prof. Dr.-Ing. Frank Gustrau**

Fachhochschule Dortmund

**Dr. Holger Kellerbauer**

Uni Duisburg-Essen/TU Dortmund



Alle in diesem Buch enthaltenen Programme, Verfahren und elektronischen Schaltungen wurden nach bestem Wissen erstellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund ist das im vorliegenden Buch enthaltene Programm-Material mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-446-44301-3

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2015 Carl Hanser Verlag München

Internet: <http://www.hanser-fachbuch.de>

Lektorat: Franziska Jacob, M.A.

Herstellung: Dipl.-Ing. (FH) Franziska Kaufmann

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: Pustet, Regensburg

Printed in Germany

**»Der Weltuntergang steht bevor,  
aber nicht so, wie Sie denken.  
Dieser Krieg jagt nicht alles in die Luft,  
sondern schaltet alles ab.«**



**Tom DeMarco**  
**Als auf der Welt das Licht ausging**

ca. 560 Seiten. Hardcover  
ca. € 19,99 [D] / € 20,60 [A] / sFr 28,90  
ISBN 978-3-446-43960-3  
Erscheint im November 2014

**Hier klicken zur  
Leseprobe**

Sie möchten mehr über Tom DeMarco und seine Bücher erfahren.  
Einfach reinklicken unter [www.hanser-fachbuch.de/special/demarco](http://www.hanser-fachbuch.de/special/demarco)

# 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>



# 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).

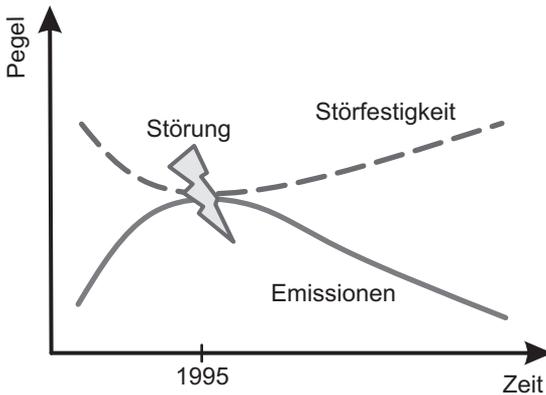
**Electromagnetic Compatibility** – „The ability of an equipment or system to function satisfactorily in its electromagnetic environment without introducing intolerable electromagnetic disturbances to anything in that environment.“

**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 schwerwiegenderen 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, ob das von ihm in den Handel gebrachte Gerät den Anforderungen des EMV-Gesetzes entspricht und „elektromagnetisch verträglich“ ist.



**Bild 1.1** Entwicklung von durchschnittlicher Störfestigkeit von Geräten und Störemissionen in elektromagnetischen Umgebungen

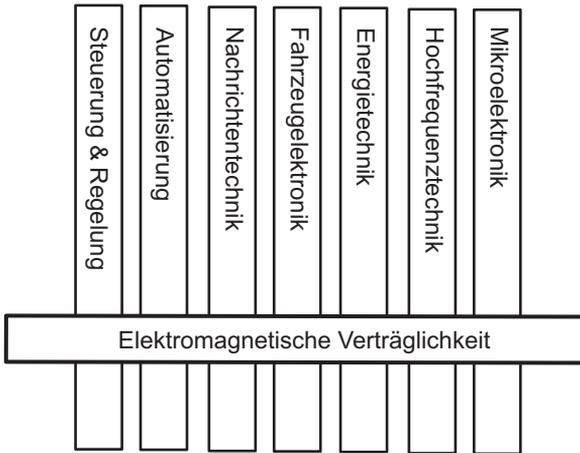
Die 1. Novellierung des EMVG [EMVG96] vom 30.08.1995 ist die überarbeitete nationale Umsetzung der EU-Richtlinie 89/336/EG (damals noch EG) von 03.05.1989 [EMVR89]. Die Übergangsregelung zum EMVG endete am 31.12.1995 – von da an wurden Hersteller verpflichtet, die gesetzlichen Vorgaben umzusetzen.

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 jeder Entwickler, 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 gesehen 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

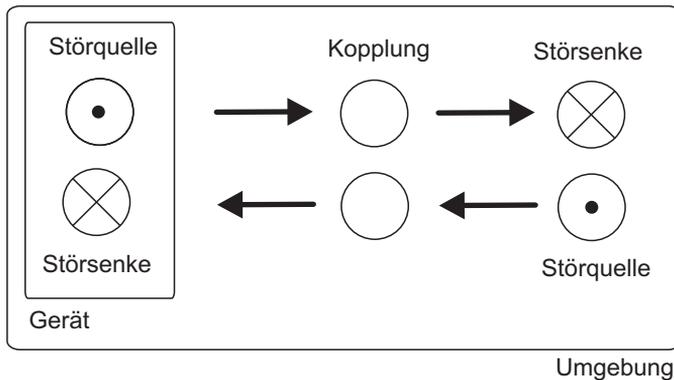
Elektromagnetisch verträglich sein, heißt, dass ein Gerät, ein System, oder eine Einrichtung in einem elektromagnetisch belasteten Umfeld zufriedenstellend funktioniert und nicht übermäßig zum Störgeschehen der Umgebung beiträgt. EMV ist also eine *bidirektionale* Eigenschaft von elektrischen Systemen.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

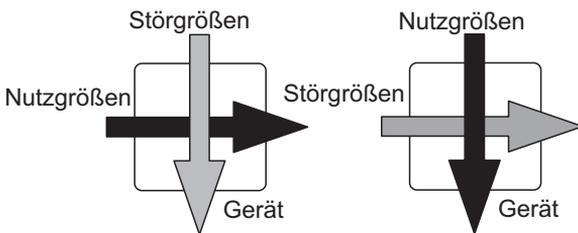
Besonders kritisch wird es, wenn man für ein Betriebsmittel keine feste elektromagnetische Umgebung festlegen kann – *Fahrzeuge* z.B. können praktisch überall zum Einsatz kommen – egal, ob auf dem einsamen Bauernacker mit schwachen Störfestigkeitsanforderungen oder als Dienstfahrzeug am Flughafen, wo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

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.

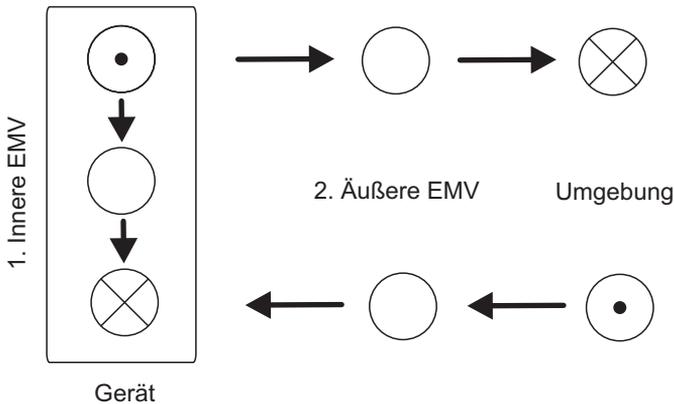
Es ist die Aufgabe der technischen Normung, Aussendungen so zu begrenzen und Störfestigkeit so einzufordern, dass alle technischen Einrichtungen in einer Umgebung störungsfrei zufriedenstellend funktionieren können. Störende Einflüsse können, wenn es sich um technisch genutzte Sendefrequenzen handelt,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

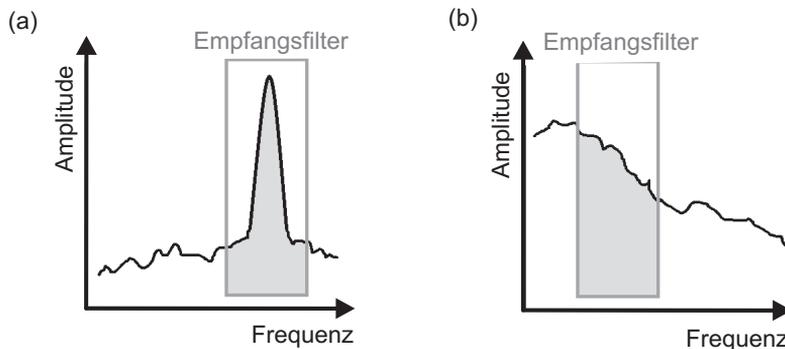
Werden die Störaussendungen über das Gehäuse als elektromagnetische Welle ausgesendet, spricht man von gestrahlter Störaussendung – Beispiele sind alle Arten von Funksendern, aber auch andere schlecht geschirmte Gehäuse, die intern genutzte Signale über die Luftschnittstelle nach Außen abstrahlen. Verlässt 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.“

**Tabelle 2.2** Übersicht über einige ISM-Frequenzbänder

Bandbezeichnung	Frequenzbereich	Beispielverwendung
ISM-Band (mit Lücken)	50 Hz ... 1 MHz	Wirbelstromformung
ISM-Band (mit Lücken)	1 MHz ... 100 MHz	Erhitzung von Dielektrika
ISM-Band (mit Lücken)	2 MHz ... 30 MHz	Powerline Communications
ISM-Band (mit Lücken)	10 MHz ... 200 MHz	Hochfrequenzbeschleuniger
ISM-Band (mit Lücken)	27 MHz ... 2,45 GHz	Wärmebehandlung
ISM-Band	433,05 ... 434,79 MHz	Funkschlüssel
ISM-Band	2,45 GHz	Mikrowellenherd
ISM-Band	2,4 ... 2,4835 GHz	WLAN (2,5G)
ISM-Band	5,15 ... 5,725 GHz	WLAN (5G)

Für industrielle, wissenschaftliche, medizinische, häusliche und ähnliche Anwendungen dürfen die in Tabelle 2.3 aufgeführten Frequenzen frei genutzt werden (selbstverständlich unter Beachtung der Vorgaben aus dem Personenschutz in der Bundesemissionsschutzverordnung (Abschnitt 5.7)).

**Tabelle 2.3** Weitere ISM-Frequenzbänder (inklusive häuslicher Anwendungen)

Frequenzbereich	
9 kHz ... 10 kHz	13,553 kHz ... 13,567 kHz
26 957 kHz ... 27 283 kHz	40,66 MHz ... 40,70 MHz
150 MHz	433,05 MHz ... 434,79 MHz
2400 MHz ... 2500 MHz	5725 MHz ... 5875 MHz
24,00 ... 24,25 GHz	

Für weitere industrielle, wissenschaftliche und medizinische Anwendungen sind noch die in Tabelle 2.4 genannten Bereiche freigegeben (man beachte, dass hier die häuslichen Anwendungen ausgeklammert sind).

**Tabelle 2.4** Weitere ISM-Frequenzbänder (ohne häusliche Anwendungen)

Frequenzbereich	
6765 kHz ... 6795 kHz	61 GHz ... 61,5 GHz
122 GHz ... 123 GHz	244 GHz ... 246 GHz

Weitere Anwendungen sind Baby-Überwachungsanlagen, Audio- und Funkmikrofon-Anwendungen, Funkbewegungsmelder, Hörhilfen und Abstandswarnsysteme.

## ■ 2.3 Eigenschaften von Störseken

Störseken finden sich überall in der elektromagnetischen Umwelt: Logikschaltungen, Sensoren, analoge Frontenden, Eingangs-Schutzbeschaltungen, Bildschirme usw. Sie unterscheiden