

Dieter Stotz

# Elektromagnetische Verträglichkeit in der Praxis

Design-Analyse – Interpretation  
der Normen – Bewertung der Prüfergebnisse

*3. Auflage*

MOREMEDIA



Springer Vieweg

---

# Elektromagnetische Verträglichkeit in der Praxis

---

Dieter Stotz

# Elektromagnetische Verträglichkeit in der Praxis

Design-Analyse – Interpretation der  
Normen – Bewertung der Prüfergebnisse

3. Auflage

Dieter Stotz  
Babenhausen/Bayern, Deutschland

ISBN 978-3-662-62220-9      ISBN 978-3-662-62221-6 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-62221-6>

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2013, 2019, 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

*Meiner Frau Karin Smiley gewidmet*

---

*Zum Gedenken an meinen Vater*

---

## Vorwort zur ersten Auflage

*Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)* hat heute nicht mehr den Status eines Kunstwortes. Es ist vielmehr allgegenwärtig – allerdings häufig sehr zum Leidwesen der Firmen. Denn die Einhaltung der Richtlinien und Gesetze ist formal betrachtet nicht gewinnbringend, sondern erst einmal mit enormen Kosten verbunden. Die fatale Konsequenz daraus ist oftmals die Vernachlässigung der EMV bei der Entwicklung von Produkten. Spätestens beim Einsatz im Feld respektive beim Kunden wirken sich derartige Mankos kostenintensiv aus – manche dadurch notwendig gewordenen Rückholaktionen können gar die Existenz der Herstellerfirma gefährden. Zumindest geht ein enormer Image-Schaden mit einem solchen Vorfall einher, und dieser Schaden äußert sich früher oder später stets negativ in den Umsatzzahlen.

Die Einhaltung der EMV-Richtlinie hat natürlich nicht nur eine rechtliche Motivation, sondern auch eine technische. Letztlich soll ja eine Steigerung der Zuverlässigkeit erzielt werden – und dies im Zusammenspiel mit anderen, möglicherweise unbekanntem Komponenten. Der technische Fortschritt bringt leider selten Erleichterung bezüglich der Forderungen an Störfestigkeit oder Störaussendungspotenzial.

Bereits Ende der 80er-Jahre wurde von der Europäischen Gemeinschaft eine offizielle Richtlinie (die EMV-Richtlinie) aufgestellt. Das Ziel war eine Harmonisierung zwischen unterschiedlichen Forderungen einzelner Länder.

Der Leser wird intuitiv mit dem Thema vertraut gemacht. Bereits während der Entwicklungsphase bietet das Buch als Nachschlagewerk Hilfe für Fragen zum Design. Doch auch dann, wenn bereits Probleme aufgetaucht sind, wird man hier eine strukturierte Hilfe finden. Somit ist auch nach einem Störfall noch Rettung in Sicht.

Bei der Verfassung und Aufbereitung kam es mir vor allem darauf an, dem Leser den Praxisbezug des Stoffes zu vermitteln. Somit liegt der Schwerpunkt nicht auf der detaillierten mathematischen Beschreibung, sondern auf der Anschauung. Der Leser soll ein Gespür für EMV und die einhergehenden Wellen- und Feldeffekte bekommen, sodass das Einschätzen von Problemen und passender Lösungen möglich wird. Dieser Praxisbezug geht sogar so weit, dass der ambitionierte Leser durchaus eigene Hilfsmittel für EMV-Messungen herstellen können. Die Begleitung in ein EMV-Testhaus erfolgt nach der Lektüre mit einem gesteigerten Kritikbewusstsein, sodass das EMV-Personal nicht nur

einen Kunden vor sich sieht, sondern einen kompetenten Partner, der in der EMV-Problematik mitreden kann. Auf diese Weise ist auch gewährleistet, dass Tipps zur Verbesserung besser verstanden und umgesetzt werden können.

Das Vakuum zwischen Firmenkundschaft und EMV-Firmen muss verschwinden und mit Entwickler-Knowhow aufgefüllt werden, auf diese Weise wird sich die EMV-Struktur noch weiter verfeinern und an echten und realistischen Bedürfnissen ausrichten.

Schwerpunkte dieses Buches sind die Analyse von EMV-Problemen auf Simulationsebene und die Durchführung praktischer Messungen – jedoch nicht nur EMV-Messungen nach Norm.

Viele Entwickler empfinden häufig die Anwendung der korrekten, relevanten Normen als Unsicherheitsfaktor. Die richtige Interpretation der Norm ist dabei ebenso wichtig wie die Bewertung der Prüfergebnisse. Normen-Ausgaben ändern sich zwar, jedoch hat man hier auch einen Weg aufgezeigt, wie man an die richtige Norm kommt.

Wer eigenes Equipment anschaffen möchte, dem wird dieses Buch eine hilfreiche Stütze sein für den Einstieg, den adäquaten Betrieb der Messgeräte sowie den korrekten Messaufbau. Doch auch für Leser ohne teuren Messgerätepark gibt es in diesem Buch einige Tipps, wie mit einfachen Mitteln reproduzierbare Trendmessungen anzustellen sind.

Bei der Darlegung von komplexer und zum Teil etwas trockener Themen findet oft eine Auflockerung durch Praxisbezüge statt, die in eingerückter Sonderschrift erscheinen. Zum einen soll damit die Thematik etwas transparenter werden – außerdem spornt der beabsichtigte Aha-Effekt zum Weiterlesen an. Dem Leser mag vielleicht die Aufteilung der Kapitel etwas ungewöhnlich erscheinen – es war jedoch durchaus beabsichtigt, nicht nur an Themen orientiert zu strukturieren, sondern daran, welche Voraussetzungen beim individuellen Leser bestehen (z. B. will er nur Grundlagen zu EMV-Messungen erwerben oder möchte er mit geringstem Aufwand Eigenmessungen durchführen, hat er gar spezifische Probleme mit seinem Mikrocontroller-Konzept?).

Das Gesamtwerk ist unterteilt in zwei Teile: Grundlagen und Festlegungen einerseits und praktische Tipps und Vorgehensweisen andererseits. Diese Separation scheint sinnvoll, so kann sich der Leser orientieren an Gegebenheiten, Standards und Richtlinien, er kann aber auch seiner eigenen Inspiration folgen und Anregungen befolgen oder intuitive Grenzen überschreiten.

Das Literaturverzeichnis am Ende des Buches korrespondiert mit Stellen im Text, die am Ende von Absätzen durch [nn] bezeichnet sind. Dabei handelt es sich teils um Basisliteratur und teils um weiterführende Werke (da ja manche Details hier nur ein wenig tangiert werden).

Das Buch entstand unter Aufbringung großer Sorgfalt. Trotzdem sind natürlich Fehler oder Unklarheiten nicht ganz auszuschließen. Für die Aufdeckung von Sach- und Rechtschreibfehlern bzw. für die Darlegung von Verbesserungen sind Verlag und Autor dankbar.

Mein Dank gilt nachstehenden Personen und Firmen (in alphabetischer Reihenfolge), die mir mit ihren Bereitstellungen große Dienste geleistet haben. Natürlich habe ich auch nicht zuletzt dem Springer-Verlag zu danken, denn ohne ihn wäre es kaum möglich, solch qualitative Werke der Wissenschaft und Technik herzustellen.

- 
- EM Software & Systems GmbH, Herr René Fiedler – Simulations-Programm *FEKO*
  - EM Test GmbH
  - Ing.-Büro FRIEDRICH – Layout-Programm *TARGET*
  - Langer, EMV-Technik GmbH
  - mikes-testingpartners gmbh
  - Schwarzbeck Mess Elektronik OHG
  - Tera Analysis – Simulations-Programm *Quickfield*

Babenhausen/Schwaben, Deutschland  
August 2012

Dieter Stotz



---

## Vorwort zur zweiten, verbesserten und erweiterten Auflage

Mit wachsender Industrialisierung in puncto IoT (Internet of Things) und der damit zusammenhängenden Automatisierung und Sensorik sind die Anforderungen weiterhin gewachsen. Dies gilt sowohl in Bezug auf Störfestigkeit als auch auf Störaussendung. Sensoren werden immer empfindlicher, die Störkulisse immer hartnäckiger – da fällt es schwer, für Geräte einen sicheren und störungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Hersteller von solchen Geräten müssen dies jedoch, und sie müssen dies sogar messtechnisch und dokumentarisch belegen können.

Die aktuelle Richtlinie 2014/30/EU (EMV-Richtlinie) hat sich in einem Punkt gegenüber der bisherigen Fassung 2004/108/EG markant geändert: Es ist vom Hersteller eine Risikoanalyse und -bewertung zu erstellen, die einer Überprüfungsbehörde ggf. vorzulegen sind. Es genügt demnach nicht mehr, die EMV-Konformität anhand von Prüfberichten zu belegen, sondern es sind weitreichende Mehrarbeiten an Dokumentation zu bewältigen. Wie eine solche Analyse auszusehen hat, darüber ist derzeit im Internet noch relativ wenig zu recherchieren. Ein Grund, dies zum Thema der Neuauflage dieses Buches zu erklären. Ein ganzes Unterkapitel wurde hierzu verfasst.

Ergänzungen bezüglich entwicklungsbegleitender Tests, Koppelmechanismen und Normenaktualisierungen sowie Diskussionen bei Nichterfüllung einer Prüfung erhielten ebenfalls besonderes Augenmerk.

Mein Dank gilt Tobias Kauer der *Fa. tobka Electronics*, der mir freundlicherweise einen Datenlogger zur Verfügung stellte und Anpassungen am Programm durchführte.

Dem Springer-Verlag habe ich zu danken, namentlich Frau Bromby, für die Lenkung des Organisatorischen und die hochqualitative Aufbereitung des Buches.

Babenhausen/Schwaben, Deutschland  
Januar 2019

Dieter Stotz

---

## Vorwort zur dritten, verbesserten und erweiterten Auflage

Es sind tatsächlich keinerlei neuen physikalischen Effekte zu erwarten, wenn die tägliche EMV-Testpraxis scheinbar neue, merkwürdig anmutende Symptome zutage treten lässt. Die hohe Kunst bei der Analyse von EMV-Problematiken ist jene, von spezifischen Erscheinungen auf deren Ursache zu schließen. Und die zugrunde liegenden Ursachen sind hier häufig alles andere als offensichtlich.

Um also primär merkwürdig erscheinende Symptome zu beurteilen, sind Erfahrungen mit neuen Fällen unerlässlich. Solche Fallstudien wurden in dieser vorliegenden Auflage aufgenommen. Weiterhin kam ein Bauvorschlag für einen Generator samt Vorerstärker mit in die Ergänzung, sodass kleinere Firmen für bestimmte Precompliance-Messungen keine teuren Geräte anschaffen müssen. Vieles von dem, was Unsicherheit erzeugt, könnte vermieden werden, wenn nicht unbekanntes Mess-Equipment nötig ist. Stattdessen ist der Einsatz selbstgebauter Geräte geeignet, nicht nur, um Geld zu sparen, sondern sich mit der Materie noch besser auseinanderzusetzen.

Ergänzt wurde das Buch ferner durch eine Kurzbeschreibung der Simulations-Software *Multisim* von National Instruments, das sich bestens zur Bauteile-Dimensionierung und auch zum Nachstellen von Störungsphänomenen eignet.

Wie immer danke ich dem Springer-Verlag für die reibungslose Zusammenarbeit, selbst in Zeiten der Corona-Krise.

Babenhausen/Schwaben, Deutschland  
August 2020

Dieter Stotz

---

# Inhaltsverzeichnis

## Teil I Grundlagen und Festlegungen

1	Grundlagen zur Messtechnik und Wellenausbreitung	3
1.1	Absolutpegel und Bezugsgrößen	3
1.2	RMS-Wert	5
1.3	Relativpegel	5
1.4	Signalüberlagerung und Einzelpegel	7
1.5	Pegel-Rechenbeispiele	8
1.5.1	Eingangsspannung für einen HF-Verstärker	9
1.5.2	Ausgangsleistung eines HF-Verstärkers	9
1.5.3	Pegelberechnung bei Signalüberlagerung	10
1.6	Feldstärke	10
1.7	Modulation	11
1.7.1	Amplituden-Modulation	11
1.7.2	Frequenz-Modulation	11
1.8	Pegelbewertung	14
1.8.1	Messempfänger – Aufbau und Wirkungsweise	14
1.8.2	Quasi-Spitzenwert	15
1.8.3	Mittelwert	16
1.8.4	CISPR-Mittelwert	16
1.8.5	Spitzenwert	17
1.8.6	Gegenüberstellung der Bewertungsfilter	17
1.8.7	Demodulation im Messempfänger	18
1.9	Wellenfortpflanzung	19
1.9.1	Nahfeld	20
1.9.2	Fernfeld	23
1.9.3	Wellenüberlagerung	24
1.9.4	Polarisation	24
1.9.5	Wellenausbreitung auf Leitungen	25
1.9.6	Wellenreflexion	28

1.9.7	Angepasste Leitung – Wellenwiderstand .....	30
1.9.8	Stehwellenverhältnis .....	33
1.9.9	Skin-Effekt .....	37
1.9.10	Verkürzungsfaktor .....	38
1.10	Kleine Praxistipps zum Umgang mit Messgeräten .....	38
1.10.1	Gebrauch eines Spektrum-Analyzers .....	39
1.10.2	Gebrauch eines Oszilloskops .....	41
1.10.3	Gebrauch eines Messempfängers .....	41
1.10.4	Gebrauch eines Stehwellen-Messgeräts .....	42
1.10.5	Überlastung von Messeingängen .....	42
	Literatur .....	43
<b>2</b>	<b>Arten der Störfestigkeit .....</b>	<b>45</b>
2.1	Schnelle Transienten (Burst) .....	45
2.1.1	Entstehung und Eigenschaften schneller Transienten .....	46
2.1.2	Einkopplung schneller Transienten .....	46
2.1.3	Auswirkungen schneller Transienten .....	48
2.2	Leitungsgeführte Störspannung .....	48
2.2.1	Entstehung und Eigenschaften von leitungsgeführter Störspannung .....	48
2.2.2	Einkopplung leitungsgeführter Störspannungen .....	49
2.2.3	Auswirkungen leitungsgeführter Störspannungen .....	50
2.3	HF-Störfeld .....	51
2.3.1	Entstehung und Eigenschaften des HF-Störfeldes .....	51
2.3.2	Einkopplung des HF-Störfeldes .....	52
2.3.3	Auswirkungen des HF-Störfeldes .....	53
2.4	Elektrostatische Entladung (ESD = Electrostatic Discharge) .....	53
2.4.1	Entstehung und Eigenschaften von ESD .....	54
2.4.2	Einkopplung des ESD .....	55
2.4.3	Auswirkungen von ESD .....	56
2.5	Stoßspannungen und Stoßströme .....	58
2.5.1	Entstehung und Eigenschaften des Surge .....	58
2.5.2	Einkopplung des Surge .....	59
2.5.3	Auswirkungen des Surge .....	60
2.6	Niederfrequente Magnetfelder .....	60
2.6.1	Entstehung und Eigenschaften von niederfrequenten Magnetfeldern .....	61
2.6.2	Einkopplung von Magnetfeldern .....	61
2.6.3	Auswirkungen von Magnetfeldern .....	63
2.7	Spannungseinbrüche .....	64
2.7.1	Entstehung und Eigenschaften von Spannungseinbrüchen .....	64
2.7.2	Auswirkungen von Spannungseinbrüchen .....	65

---

2.8	Allgemeines zur Störeinkopplung	65
2.8.1	Störeinkopplung über Versorgung	66
2.8.2	Störeinkopplung durch kapazitive Ableitung	66
2.8.3	Störeinkopplung über Leitungsfelder	67
	Literatur	67
<b>3</b>	<b>Arten der Störaussendung</b>	<b>69</b>
3.1	Leitungsgeführte Störspannung	69
3.1.1	Entstehung und Eigenschaften von Störspannungen	69
3.1.2	Auskopplung von Störspannungen	70
3.2	HF-Störfeld	70
3.2.1	Entstehung und Eigenschaften von HF-Feldern	70
3.2.2	Auskopplung von HF-Feldern	71
3.3	Eigenerzeugte Magnetfelder	71
3.4	Spannungsschwankungen – Rückwirkungen ins Netz	74
3.4.1	Einschaltströme bei Beleuchtungen	75
3.4.2	Einschaltströme bei induktiven Komponenten	76
3.4.3	Einschaltströme bei Motoren	77
3.4.4	Einschaltströme bei Schaltnetzteilen	78
3.4.5	Wechselbelastung durch Phasenanschnittschaltungen	79
3.4.6	Wechselbelastung durch Frequenzumrichter	81
	Literatur	81
<b>4</b>	<b>Messungen zur Prüfung der Störfestigkeit</b>	<b>83</b>
4.1	Ungünstigster Betriebsfall	83
4.2	Messungen zur Burst-Störfestigkeit	85
4.2.1	Burst-Equipment	85
4.2.2	Messaufbau zur Burst-Störfestigkeit	85
4.2.3	Durchführung der Messungen zur Burst-Störfestigkeit	88
4.3	Messungen zur Störspannungsfestigkeit	90
4.3.1	Equipment zur Messung der Störspannungsfestigkeit	91
4.3.2	Messaufbau zur Störspannungsfestigkeit	92
4.3.3	Weitere Anschlüsse und Zusatzgeräte des Prüflings	94
4.3.4	Durchführung der Messungen zur Störspannungsfestigkeit	95
4.4	Messungen zur Störstromfestigkeit	96
4.5	Messungen zur Störfeldfestigkeit	97
4.5.1	Equipment zur Messung der Störfeldfestigkeit	97
4.5.2	Messaufbau zur Störfeldfestigkeit	101
4.5.3	Durchführung der Messungen zur Störfeldfestigkeit	103
4.6	G-TEM-Zelle – Möglichkeiten und Grenzen	104
4.7	Messungen zu ESD	104
4.7.1	Equipment zur ESD-Messung	104
4.7.2	Messaufbau zur ESD-Messung	105
4.7.3	Durchführung der ESD-Messungen	106

4.8	Messungen zur Stoßspannung .....	107
4.8.1	Equipment zur Surge-Messung .....	108
4.8.2	Messaufbau zur Surge-Messung .....	108
4.8.3	Durchführung der Surge-Messungen .....	109
4.9	Messungen zu niederfrequenten Magnetfeldern .....	109
4.9.1	Equipment zur Messung mit niederfrequenten Magnetfeldern ...	109
4.9.2	Messaufbau zur Messung mit niederfrequenten Magnetfeldern ...	111
4.9.3	Durchführung der Messung mit niederfrequenten Magnetfeldern .....	111
<b>5</b>	<b>Messungen zur Prüfung der Störaussendung .....</b>	<b>113</b>
5.1	Messung leitungsgebundener Störaussendung .....	113
5.1.1	Equipment für die Messung leitungsgebundener Störaussendung .....	114
5.1.2	Messaufbau zur leitungsgebundenen Störaussendung .....	115
5.1.3	Durchführung der Messung zur leitungsgebundenen Störaussendung .....	116
5.2	Messung HF-Feld .....	117
5.2.1	Equipment zur Messung der Feldabstrahlung .....	117
5.2.2	Messaufbau zur Feldabstrahlung .....	117
5.2.3	Durchführung der Messung zur Feldabstrahlung .....	118
	Literatur .....	118
<b>6</b>	<b>Messungen im Testhaus .....</b>	<b>119</b>
6.1	Terminplanung und Dokumente für den Gang ins Testhaus .....	119
6.2	Wahl des Testhauses .....	120
6.3	Vorbereitungen .....	121
6.4	Eigenes Equipment für den Besuch im Testhaus .....	123
6.5	Reihenfolge der Tests – ein Zeitkriterium .....	123
6.6	Interpretation und Bewertung der Ergebnisse .....	124
6.7	Grenzwerte nicht eingehalten – was nun? .....	124
<b>7</b>	<b>Dokumentation .....</b>	<b>127</b>
7.1	Inhalt einer EMV-Dokumentation .....	127
7.2	Form der Dokumentation .....	128
7.3	Konformitätserklärung .....	129
7.4	Konformitätserklärung in englischer Sprache .....	129
7.5	EMV-Risikoanalyse und -bewertung .....	129
<b>8</b>	<b>Normen und Rechtliches .....</b>	<b>133</b>
8.1	Auswahl der Normen .....	133
8.2	Bewertungskriterien .....	134
8.2.1	Bewertungskriterium A .....	134
8.2.2	Bewertungskriterium B .....	135

8.2.3	Bewertungskriterium C .....	135
<b>Teil II</b>	<b>Praxis und Erfahrungsbasis</b>	
<b>9</b>	<b>Untersuchungen und Verbesserungen zur Störfestigkeit</b> .....	139
9.1	Untersuchungen und Verbesserungen zur Burst-Störfestigkeit .....	139
9.1.1	Ausbreitung von Burst-Störungen .....	140
9.1.2	Gegenmaßnahmen bei Burst-Störungen .....	140
9.1.3	Schaltungskomponenten für die Burst-Störfestigkeit .....	142
9.2	Untersuchungen und Verbesserungen zur Störspannungsfestigkeit .....	142
9.2.1	Maßnahmen zur Verbesserung der Störspannungsfestigkeit .....	143
9.2.2	Identifizierung der Störwege .....	144
9.3	Untersuchungen und Verbesserungen zur Störfeldfestigkeit .....	145
9.3.1	Maßnahmen zur Verbesserung der Störfeldfestigkeit .....	145
9.4	Untersuchungen und Verbesserungen zur ESD-Störfestigkeit .....	147
9.4.1	Umleiten von ESD .....	147
9.4.2	Entschärfen durch Verzögerung von ESD .....	148
9.5	Untersuchungen und Verbesserungen zur Stoßspannungsfestigkeit .....	148
9.6	Untersuchungen zu niederfrequenten Magnetfeldern .....	149
9.7	Fallbeispiele .....	149
9.7.1	Burst und Funkenbildung .....	149
9.7.2	Burst und Kondensatorschluss .....	151
9.7.3	Störspannungsfestigkeit und Leitungsresonanz .....	151
9.7.4	Störspannungsfestigkeit und unerwünschte Demodulation .....	153
9.7.5	Störspannungsfestigkeit und schwebende Masse in Datenleitungen .....	155
9.7.6	Störfeldfestigkeit und nichtkonsistenter Leitungsschirm .....	157
9.7.7	Störungssymptomatik im unteren Frequenzbereich .....	159
9.8	Symptom-Chart (Differenzialdiagnostik nach Frequenzkriterien) .....	163
<b>10</b>	<b>Untersuchungen und Verbesserungen zur Störaussendung</b> .....	165
10.1	Untersuchungen und Verbesserungen zur leitungsgeführten Aussendung .....	165
10.2	Untersuchungen und Verbesserungen zur Feldaussendung .....	169
10.3	Fallbeispiele .....	169
10.3.1	Motorstörung .....	169
10.3.2	Störung bei der Gleichrichtung von Wechselspannungen .....	173
10.3.3	Leitungsgeführte Störaussendung bei Schaltnetzteilen .....	176
	Literatur .....	179
<b>11</b>	<b>Eigene Tests ohne normgerechtes Equipment</b> .....	181
11.1	Improvisierter Burst-Test .....	182
11.1.1	Mögliche Burst-Anordnung .....	182
11.1.2	Praxismessungen .....	183

11.2	Improvisierter Störspannungstest . . . . .	185
11.2.1	Mögliche Anordnung zum Störspannungstest. . . . .	186
11.2.2	Praxismessungen zum Störspannungstest . . . . .	187
11.2.3	Störspannungstest mit Eigenbau-Generator . . . . .	190
11.3	Improvisierter Störfeldtest . . . . .	191
11.3.1	Mögliche Anordnung zum Störfeldtest . . . . .	193
11.3.2	Praxismessungen zum Störfeldtest . . . . .	193
11.4	Störspannungs-Emission mit einfachen Mitteln . . . . .	194
11.5	Störfeld-Emission mit einfachen Mitteln . . . . .	195
	Literatur . . . . .	195
<b>12</b>	<b>Entwicklungsbegleitendes Equipment . . . . .</b>	<b>197</b>
12.1	Immunität: Schnelle Transienten . . . . .	197
12.2	Immunität: Leitungsgebundene Störspannung . . . . .	198
12.3	Immunität: Elektrostatische Entladung (ESD) . . . . .	199
12.4	Immunität: Einstrahlung . . . . .	199
12.5	Immunität: Stoßspannung/Stoßstrom . . . . .	202
12.6	Emission: Störspannung . . . . .	202
12.7	Emission: Messempfänger oder Spektrumanalyzer . . . . .	204
12.8	Zusätzliche Hilfsmittel . . . . .	207
12.8.1	EMV-Tisch . . . . .	207
12.8.2	Holzbrücke . . . . .	208
12.8.3	Netzteil und Akkuversorgung . . . . .	208
12.8.4	Trenntransformator . . . . .	209
12.8.5	Multimeter . . . . .	209
12.8.6	Datenlogger ADX-24 . . . . .	210
<b>13</b>	<b>Designregeln . . . . .</b>	<b>213</b>
13.1	Allgemeines zur Anordnung von Schaltungsbereichen. . . . .	213
13.1.1	Anordnung von Versorgungs-, Ein- und Ausgangsanschlüssen . . . . .	213
13.1.2	Anordnung von Quarzen an Mikrocontrollern . . . . .	214
13.2	Schutz- und Bypass-Elemente . . . . .	216
13.2.1	Gegentakt-Schutz . . . . .	216
13.2.2	Gleichtakt-Schutz . . . . .	219
13.3	Masseführung . . . . .	223
13.3.1	Sternförmige Masse . . . . .	223
13.3.2	Masseflächen . . . . .	226
13.3.3	Kapazität zwischen Leiterbahnen und Kupferflächen. . . . .	229
13.3.4	Stützkondensatoren . . . . .	230
13.4	Gehäuse-Anbindung und Erdung . . . . .	232
13.4.1	Gehäuseanbindung für Kleinspannung . . . . .	232
13.4.2	Gehäuseanbindung für größere Spannungen (Niederspannung) . . . . .	233



---

13.5	Ein- und ausgehende Signalleitungen	234
13.5.1	Hochfrequente Datenleitungen	234
13.5.2	Empfindliche Datenleitungen	236
13.6	Schutz diskreter Halbleiter	237
13.6.1	Schutz von Sperrschicht-Transistoren	237
13.6.2	Schutz von MOS-Transistoren	238
13.6.3	Schutz von Leuchtdioden	238
13.7	Schirmung von Kabeln und Spalten	238
13.7.1	Betrachtungen zur Leitungsabschirmung	239
13.7.2	Materialien zum Abschirmen	240
	Literatur	240
<b>14</b>	<b>Mikrocontroller-Steuerungen</b>	<b>241</b>
14.1	Programmablauf und Verhinderung von Abstürzen	241
14.1.1	NOP im Programmcode	241
14.1.2	Watchdog setzen	243
14.1.3	Grundinitialisierung und Parametrierung	244
14.1.4	Routinen-Überwachung	244
14.1.5	Redundante A/D-Wandlung	245
14.2	Externe Schaltung	246
14.2.1	Port-Ausgänge	246
14.2.2	Port-Eingänge	247
14.2.3	Reset-Eingang und Interrupts	247
14.3	Programmierbare Flankensteilheit	248
<b>15</b>	<b>Signalverarbeitung</b>	<b>251</b>
15.1	Störungssichere Sensorspannungen	251
15.1.1	Filter-Verfahren	252
15.1.2	Modulations-Verfahren	254
15.1.3	Rauschimpuls-Verfahren	257
15.1.4	Lock-in-Verfahren	257
15.1.5	Sweep-Verfahren zur Immunitäts-Steigerung	258
15.1.6	Synchron-Gleichrichtung	259
15.1.7	Amplituden-Sampling-Verfahren	260
15.1.8	Koinzidenz-Vermeidung	261
15.2	Konzepte für Sensoren mit geringer Emission	262
15.2.1	Sweep-Methoden	262
15.2.2	Chopper-Methoden	264
15.2.3	Begrenzungsmethoden	264
15.3	Konzepte für Potenzialtrennung	266
15.3.1	Optische Trennung	267
15.3.2	Induktive Trennung	269
15.3.3	Akustische Trennung	270

---

15.3.4 Trennung durch HF-Übertragung .....	272
15.3.5 Trennung der Versorgung .....	273
Literatur .....	274
<b>Anhang</b> .....	275
<b>Glossar</b> .....	315
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	321

---

**Teil I**

**Grundlagen und Festlegungen**



# Grundlagen zur Messtechnik und Wellenausbreitung

# 1

## Zusammenfassung

Im EMV-Bereich gehört Messtechnik zum unverzichtbaren Werkzeug bei der Arbeit mit den zu untersuchenden Geräten oder Komponenten. Ein Schwerpunkt bildet dabei das Messen und Bewerten von Pegeln. Deshalb liegt dort auch das Augenmerk bei den nachfolgenden Ausführungen. Gemeinsam mit den theoretischen Festlegungen sind ein paar Beispielrechnungen eine Einführung in die praktische Messtechnik.

Die Wellenausbreitung ist ein weiterer grundlegender Bereich. Alle theoretischen Grundlagen können wir hier jedoch nicht darlegen, lediglich solche zum Verständnis der Zusammenhänge im EMV-Bereich. Gerade für Einstrahlung und Abstrahlung sind Strukturen vorausgesetzt, die die Ursachen in einem klareren Licht erscheinen lassen können.

Da es in diesem Kapitel um allgemeine Fragen der Messung geht, ist ein kleiner Bereich dem Umgang mit Messmitteln gewidmet. Hier im Grundlagenkapitel sind diese Hilfestellungen ganz gut platziert, denn sie bilden das Bindeglied zu den Detailmessungen in den folgenden Kapiteln, die durch Handhabungstipps nicht allzu sehr gestört werden sollten.

## 1.1 Absolutpegel und Bezugsgrößen

Pegel sind Angaben zur Stärke eines Signals. Genauer gesagt, wird beim Pegel der Logarithmus eines Verhältnisses gebildet, welches sich aus der auszudrückenden Größe  $A$  zu einer Bezugsgröße  $A_0$  ergibt. Da der Zehnerlogarithmus selbst keine Einheit hat, hat man zur Kennzeichnung des Pegelmaßes dennoch eine Pseudoeinheit angefügt, nämlich das *Bel*. Dies ist historisch bedingt und bezieht sich auf *A. G. Bell*.

$$a = \log \frac{A}{A_0} \quad (1.1)$$

Anfänglich waren bei jeglichen Pegelberechnungen hauptsächlich Leistungen beteiligt. Wenn die Bezugsgröße beispielsweise  $P_0 = 1 \text{ mW}$  ist, so hätte die Leistung  $P$  von 2 W folgenden Pegel in Bel:

$$\log \frac{P}{P_0} = \log \frac{2 \text{ W}}{1 \text{ mW}} \approx 3,3 \text{ B(el)} \quad (1.2)$$

Da die Zahlenwerte für diese Rechnung etwas unhandlich schienen, entschied man sich dafür, mit dem zehnten Teil, dem *Dezibel*, zu rechnen. Für das obige Zahlenbeispiel ergibt sich dann:

$$10 \cdot \log \frac{P}{P_0} = 10 \cdot \log \frac{2 \text{ W}}{1 \text{ mW}} \approx 33 \text{ dBm} \quad (1.3)$$

Das **m** in der Einheit **dBm** deutet darauf hin, dass die Bezugsgröße 1 mW ist. Neben der Leistung gibt es noch viele weitere Bezugsgrößen in der Elektrotechnik und Elektronik, nämlich Spannung und Strom. Um nun bei einer definierten Last von der Leistung auf die Spannung bzw. auf den Strom zu schließen, sind folgende Umrechnungsgleichungen erforderlich:

$$P = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R \quad (1.4)$$

Setzt man den Term mit dem Spannungsquadrat von Gl. 1.4 in Gl. 1.3 ein, so ergibt sich:

$$10 \cdot \log \frac{\frac{U^2}{R}}{\frac{U_0^2}{R}} = 20 \cdot \log \frac{U}{U_0} \quad (1.5)$$

Der Exponent **2** bewirkt die Verdopplung des Logarithmus', aus der **10** wird die **20** als vorangestellter Faktor. Die Größe des Lastwiderstands fällt heraus, solange dieser beim Schritt von Leistungspegel nach Spannungspegel konstant bleibt.

Faktor 10 bedeutet für Spannungen und Ströme 20 dB, für Leistungen jedoch nur 10 dB. In Tab. 1.1 sind einige spezielle Werte dargestellt.

Für ein und dieselbe Situation – genauer gesagt für dieselbe Last ( $R$ ) – ist es gleichgültig, ob man zur Berechnung des Pegels die Leistungswerte oder die Spannungswerte heranzieht. Lediglich bei Leistungspegeln beträgt der Skalierungsfaktor **10**, bei einfachen Größen wie Strom und Spannung beträgt er **20**, damit die Pegelmaße übereinstimmen.

**Tab. 1.1** Spezielle Pegelwerte

Wert	Bezugsgröße	Bedingungen	Pegel
0,775 V	1 mW	Lastimpedanz 600 $\Omega$	0 dBm
1 $\mu$ V	1 mW	Lastimpedanz 50 $\Omega$	-107 dBm
0,775 V	1 V	keine def. Last	-2,2 dBu
0,224 V	1 mW	Lastimpedanz 50 $\Omega$	0 dBm
0,224 V	1 $\mu$ V	Lastimpedanz 50 $\Omega$	107 dB $\mu$ V

Speziell in der EMV-Technik sind Pegelangaben vornehmlich für Feldstärken wichtig. Dabei unterscheidet man zwischen elektrischer  $E$  und magnetischer Feldstärke  $H$ . Bezugsgrößen sind hierbei  $\mu$ V/m und  $\mu$ A/m. Also:

$$E - \text{Feld} - \text{Pegel} : a_E = 20 \cdot \log \frac{E}{E_0} = 20 \cdot \log \frac{E}{1 \mu\text{V/m}} \left[ \text{dB} \frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \right] \quad (1.6)$$

$$H - \text{Feld} - \text{Pegel} : a_H = 20 \cdot \log \frac{H}{H_0} = 20 \cdot \log \frac{H}{1 \mu\text{A/m}} \left[ \text{dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}} \right] \quad (1.7)$$

## 1.2 RMS-Wert

Der RMS-Wert (RMS = **R**oot **M**ean **S**quare) einer Wechselspannung (auch Effektivwert genannt) entspricht derjenigen Gleichspannung, die an einem ohmschen Verbraucher dieselbe Leistung umsetzen würde wie im zeitlichen Mittel die Wechselspannung.

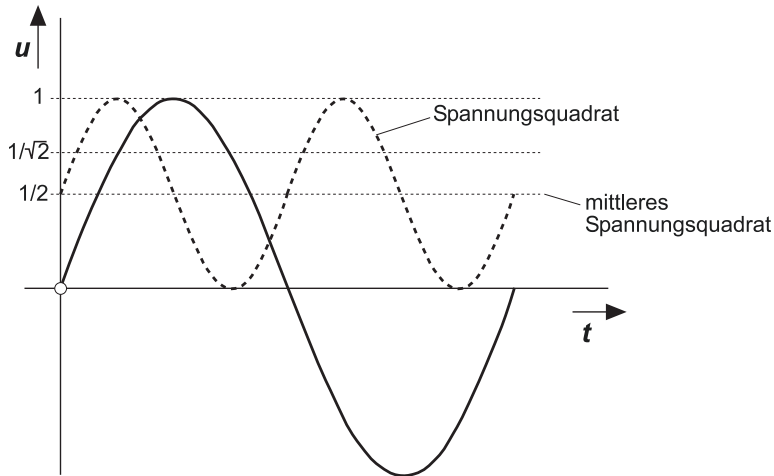
Somit ergibt sich der RMS-Wert aus der Wurzel des zeitlichen Mittels des Spannungsquadrates. Man betrachte hierzu Abb. 1.1.

Natürlich gibt es für Wechselströme oder Felder ebenfalls Effektivwerte. In Abschn. 1.8 weiter unten werden wir sehen, dass der Effektivwert zwar als Bewertung eines Störsignals wenig Bedeutung hat, allerdings beziehen sich alle Bewertungsarten auf diesen.

## 1.3 Relativpegel

Bei den im letzten Abschnitt erwähnten Absolutpegeln gibt es stets eine Bezugsgröße mit definiertem Wert. Stellt man dagegen zwei unabhängige Werte gegenüber, so ergibt sich ein relatives Pegelmaß dieser beiden zueinander. In diesem Falle steht nach der Pseudoeinheit dB keine weitere Deklaration. Beispielsweise sei vor einem Verstärker eine Spannung von  $U_1 = 1$  V gemessen, am Verstärkerausgang seien  $U_2 = 10$  V vorhanden. Damit ergibt sich analog zu Gl. 1.5:

$$a_U = 20 \cdot \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \cdot \log \frac{10\text{V}}{1\text{V}} = 20 \text{ dB} \quad (1.8)$$



**Abb. 1.1** Zur Herleitung des RMS-Wertes. Er ist abgeleitet vom mittleren Leistungsumsatz, also ist aus dem Signalverlauf (hier Sinus) zunächst die Leistungskurve zu bilden. Bei rein ohmschen Verbrauchern ist diese komplett im Positiven, also auch der Verlauf des Spannungsquadrates, welches ja bei  $U_2/R$  die einzige Veränderliche ist. Die normierte Darstellung bewirkt bei beiden Sinuskurven die Position des Maximalwertes bei **1**. Der Mittelwert des Spannungsquadrates liegt bei  $1/2$ . Die Wurzel daraus liefert somit die normierte Effektivspannung  $1/\sqrt{2}$ . Nicht zu verwechseln ist dieser Wert mit dem arithmetischen Mittel des Gleichrichtwerts, der nämlich bei  $2/\pi$  liegt

Dieser Wert entspricht der Verstärkung von  $U_2$  gegenüber  $U_1$ . Das auf Leistung bezogene *Verstärkungsmaß* beträgt ebenfalls 20 dB (damit das so ist, gibt es die beiden verschiedenen Skalierfaktoren 10 und 20 – siehe oben).

Dagegen ist das Dämpfungsmaß der Spannung  $U_2$  gegenüber  $U_1$ :

$$a_U = 20 \cdot \log \frac{U_1}{U_2} = -20 \cdot \log \frac{U_2}{U_1} \quad (1.9)$$

Die Betrachtung des Dämpfungsmaßes gegenüber dem Verstärkungsmaß und umgekehrt bedeutet verständlicherweise stets eine Negation der dB-Werte.

Der Vorteil, mit Pegeln anstatt mit Spannungen oder Leistungen zu rechnen, liegt klar auf der Hand: Die Werte sind durch einfache Addition bzw. Subtraktion miteinander zu verrechnen, denn es handelt sich ja Logarithmen, also um Exponenten zur einheitlichen Basis 10. Viele Komponenten in einer Kette sind meist mit logarithmischen Werten für Verstärkung oder Abschwächung spezifiziert, sodass eine schnelle und einfache Berechnung von resultierenden Pegeln möglich ist.

## 1.4 Signalüberlagerung und Einzelpegel

Überlagern sich mehrere Signale wie in Abb. 1.2, so addieren sich deren Einzelleistungen zur Gesamtleistung. Eine Rückrechnung auf Pegel muss stets über die Kenntnis der Einzelleistungen erfolgen:

$$P_{\text{ges}} = P_1 + P_2 \quad (1.10)$$

Oftmals sind Gesamtleistung und eine der Einzelleistungen (z. B.  $P_1$ ) über deren Pegel messbar, dann ergibt sich:

$$P_{\text{ges}} = 1 \text{ mW} \cdot 10^{\frac{a_{\text{ges}}}{10}} \quad (1.11)$$

$$P_1 = 1 \text{ mW} \cdot 10^{\frac{a_1}{10}}$$

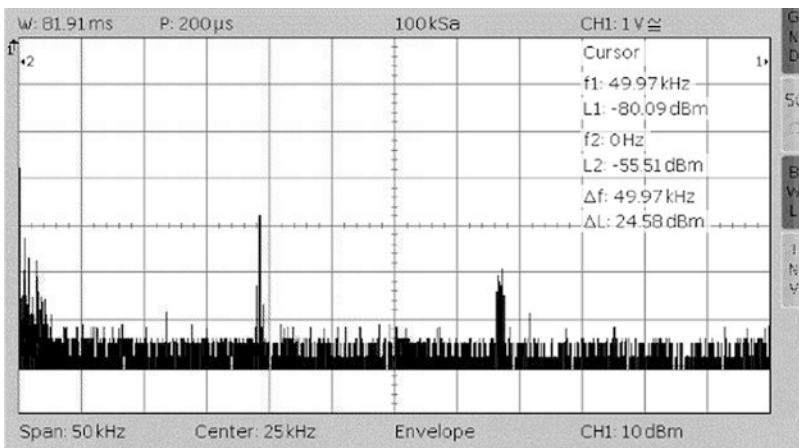
Nach Gl. 1.10 ergibt sich für  $P_2$ :

$$P_2 = P_{\text{ges}} - P_1 \quad (1.12)$$

Und dann für den gesuchten Pegel  $a_2$ :

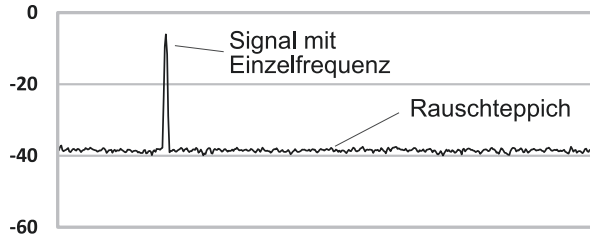
$$a_2 = 10 \cdot \log \frac{P_2}{1 \text{ mW}} \quad (1.13)$$

Bei einem Spektrogramm kann für *Rauschsignale* nicht angegeben werden, wie hoch der Pegel innerhalb eines bestimmten Frequenzintervalls ist. Hierzu muss der Analyzer eine Berechnung anstellen und den RMS-Wert oder -Pegel als Zahlenwert ausgeben. Die



**Abb. 1.2** Rauschsignal und herausragender Peak. Je nachdem, wie weit der Peak aus dem Hintergrundrauschen herausragt, ist seine Spannung genau bestimmbar





**Abb. 1.3** Rauschteppich und Tonsignal. Beide Signale ergeben für sich gesehen dieselbe Spannung, obwohl der Rauschteppich im Spektrum wesentlich niedriger liegt. Nach Gl. 1.15 haben die Spannungen ein Verhältnis von 64:1 zueinander, die Pegel sollten ca. 36 dB auseinanderliegen. Die tatsächlichen Anzeigen hängen jedoch noch etwas vom *Bewertungsfenster* sowie vom *Crest-Faktor* des Rauschens ab

sich ergebende Spannung  $u_r$  eines Rauschsignals ist mit  $D_r$  als *Rauschspannungsdichte* und *Bandbreite*  $B$ :

$$u_r = D_r \cdot \sqrt{B} \quad (1.14)$$

Auf welchem Niveau sich der Rauschpegel bei einem Spektrum bewegt, lässt sich nicht vorhersagen, denn dies hängt von den genannten Werten der Rauschspannungsdichte und der Bandbreite ab. Wir werden weiter unten bei der Beschreibung des Messempfängers sehen, dass die Bandbreite durch diesen bzw. durch die Normen definiert ist. Auch bei einem Spektrumanalyzer ist die Bandbreite wählbar. Durch Ablesen des Rauschniveaus und bekannter Bandbreite lässt sich die Rauschspannungsdichte ermitteln. Siehe auch Abb. 1.3.

Bei digitalen Systemen, bei denen keine feste Bandbreite vorgegeben ist, sondern die bei der FFT (**F**ast **F**ourier **T**ransformation) eine Strichzahl  $q$  aufweisen (meist Zweierpotenz), kann für das Spannungsniveau  $u_{\text{hor}}$  des Rauschteppichs geschrieben werden:

$$u_{\text{hor}} = D_r \cdot \sqrt{\frac{B}{q}} \quad \text{und} \quad u_r = u_{\text{hor}} \cdot \sqrt{q} \quad (1.15)$$

Sind also Strichzahl  $q$  und Bandbreite  $B$  des Spektrums bekannt, so lässt sich aus der Höhe des abgelesenen Spannungsniveaus  $u_{\text{hor}}$  die Rauschspannungsdichte  $D_r$  errechnen. Ferner lässt sich die tatsächliche Rauschspannung  $u_r$  aus Strichzahl  $q$  und abgelesenem Niveau  $u_{\text{hor}}$  bestimmen.

## 1.5 Pegel-Rechenbeispiele

Ein paar Berechnungen aus der Praxis sollen hier helfen, gängige Situationen an Messaufgaben zu bewältigen.

### 1.5.1 Eingangsspannung für einen HF-Verstärker

Ein HF-Verstärker sei mit einer Verstärkung von +29 dB angegeben. Außerdem sei der Maximalpegel am Ausgang +30 dBm. Wir benötigen für eine Messaufgabe eine Spannung von 5 V an einer Impedanz von 50 Ω.

Wir können die Spannung für 0 dBm an 50 Ω nach Gl. 1.4 ausrechnen oder aber aus Tab. 1.1 entnehmen. Dies entspricht dem Pegel von 0 dBm. Der zulässige Pegel am Verstärkerausgang liegt laut Angabe um 30 dB höher. Um daraus die Maximalspannung zu ermitteln, benötigt man die Umkehrgleichung zu Gl. 1.8:

$$\frac{U_{\max}}{0,224 \text{ V}} = 10^{\frac{30}{20}} \Rightarrow U_{\max} = 0,224 \text{ V} \cdot 31,6 = 7,08 \text{ V} \quad (1.16)$$

Das bedeutet, der Verstärker ist noch in der Lage, ohne Beschädigung die geforderten 5 V zu liefern. Jetzt kann die erforderliche Eingangsspannung ermittelt werden:

$$\frac{5 \text{ V}}{U_{\text{in}}} = 10^{\frac{29}{20}} \Rightarrow U_{\text{in}} = \frac{5 \text{ V}}{28,2} = 0,177 \text{ V} \quad (1.17)$$

Wenn ausgangsseitig Effektivspannung gemeint ist, muss für die Eingangsspannung dasselbe gelten.

Es ist erwähnenswert, dass bei Amplituden-Modulation die mittlere Leistung ansteigt. Weiter unten werden wir sehen, wie sich die Spannung unter Modulation verändern muss. Außerdem ist bezüglich der Belastung des Verstärkers zu bedenken, dass die maximale Dauerleistung meist unter der Maximalleistung liegt. Bei Messaufbauten kommt dieses Problem noch zur Sprache.

### 1.5.2 Ausgangsleistung eines HF-Verstärkers

Nehmen wir das Beispiel von oben, so lässt sich die Verstärkerausgangsleistung einfach berechnen:

$$30 \text{ dBm} = 10 \cdot \log \frac{P_{\max}}{1 \text{ mW}} \Rightarrow P_{\max} = 1 \text{ mW} \cdot 10^{\frac{30}{10}} = 1 \text{ W} \quad (1.18)$$

Die tatsächliche Leistung ist über die gegebenen Werte von 5 V und 50 Ω einfach zu berechnen (siehe Gl. 1.4):

$$P = \frac{(5 \text{ V})^2}{50 \text{ Ω}} = 0,5 \text{ W} \quad (1.19)$$

Wie gefordert liegt Wert unter dem maximalen.

### 1.5.3 Pegelberechnung bei Signalüberlagerung

Bei relativ kleinen Nutzsignalen, die sich nur wenig vom Rauschpegel des Messgeräts herausheben, spiegelt der nach Abb. 1.2 dargestellte Peak nicht genau den Pegel des zu untersuchenden Signals wider, sondern einen etwas höheren Pegel.

Ein Messempfänger registriert ein verrauschtes Signal mit der Pegelhöhe von  $-78$  dBm, während das Niveau des Rauschens ohne Eingangssignal bei  $-85$  dBm liegt (Eingang abgeschlossen mit  $50 \Omega$ ). Daraus ergeben sich folgende Leistungen (lt. Gl. 1.11):

$$P_{\text{ges}} = 1 \text{ mW} \cdot 10^{\frac{-78}{10}} = 15,8 \cdot 10^{-12} \text{ W} \quad (1.20)$$

$$P_1 = 1 \text{ mW} \cdot 10^{\frac{-85}{10}} = 3,16 \cdot 10^{-12} \text{ W}$$

Nach Gl. 1.12 ergibt sich eine Leistung für das zu bestimmende Signal zu:

$$P_2 = P_{\text{ges}} - P_1 = (15,8 - 3,16) \cdot 10^{-12} \text{ W} = 12,64 \cdot 10^{-12} \text{ W} \quad (1.21)$$

Und damit der Pegel:

$$a_2 = 10 \cdot \log 12,64 \cdot 10^{-9} = -79 \text{ dBm} \quad (1.22)$$

Der ermittelte Pegel ist somit immerhin um ca. 1 dB geringer als das abgelesene Niveau am Peak. Ein Spektrumanalyzer würde übrigens die Leistung eines Peak genauer anzeigen, weil das Rauschen normalerweise breitbandig ist und somit im Bereich des Peak nur wenig Leistung produziert. Allerdings ist diese Methode nur für sehr schmalbandige Messsignale geeignet, andernfalls ist der Pegel nicht ablesbar. Wir werden aber bei den praktischen Messungen noch genauer darauf zu sprechen kommen.

---

## 1.6 Feldstärke

Sowohl für die Störemission als auch für die Immunität ist die Größe der *Feldstärke* von entscheidender Bedeutung. Die Feldstärke  $E$  verhält sich dabei wie die zeitliche Abhängigkeit der Sinusfunktion der Spannung, die zwischen zwei Punkten im Raum mit dem Abstand  $d$ :

$$E = \frac{U_0}{d} \cdot \sin(\omega t) \quad (1.23)$$

Da sich die Distanz  $d$  im Raum befindet, ist die Feldstärke natürlich auch als Raumvektor darstellbar, was für spätere Betrachtungen noch in Kap. 9 behandelt wird.

Die elektrischen Feldvektoren sind in Begleitung mit magnetischen, wobei diese senkrecht auf den ersteren und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Wellen stehen.

## 1.7 Modulation

Während Modulation in der Nachrichtentechnik essenziell wichtig ist, um Informationen zu übertragen, spielt sie in der EMV-Technik hauptsächlich die Rolle der Authentizität einer Störumgebung. Manche Schaltungen von Prüflingen demodulieren ein Signal, so dass die Nachfolgeschaltung mit dem Modulationssignal zurechtkommen muss. Mit konstantem Träger wäre die Störunterdrückung einfach mit kapazitiver Entkopplung möglich.

Während ein unmodulierter Träger im Frequenzbereich nur einen diskreten Strich im Spektrum ausmacht, wird jegliche Art von Modulation eine Verbreiterung der Geometrie zur Folge haben.

### 1.7.1 Amplituden-Modulation

Viele Geräteschaltungen bilden unabsichtlich einfache Hüllkurvendemodulatoren an, also im Grunde genommen Gleichrichter plus Glättung, denn eine einfache BE-Strecke eines Transistors bildet bereits den Gleichrichter. Aber auch Operationsverstärker werden auf Hochfrequenzspannungen gleichrichtend reagieren. Bei Immunitätsprüfungen mittels schmalbandiger Einstrahlung wird die Spannung bzw. das Feld deshalb mit einer Amplituden-Modulation versehen. Die Modulationsfrequenz  $f_m$  ist hierbei 1 kHz, die Modulationstiefe 80 %, siehe Abb. 1.4.

Rein rechnerisch ergibt sich für eine amplitudenmodulierte Spannung mit der Amplitude des Trägers  $U_0$ , der Modulationstiefe  $k$ , der Trägerfrequenz  $f_0$  und der Modulationsfrequenz  $f_m$ :

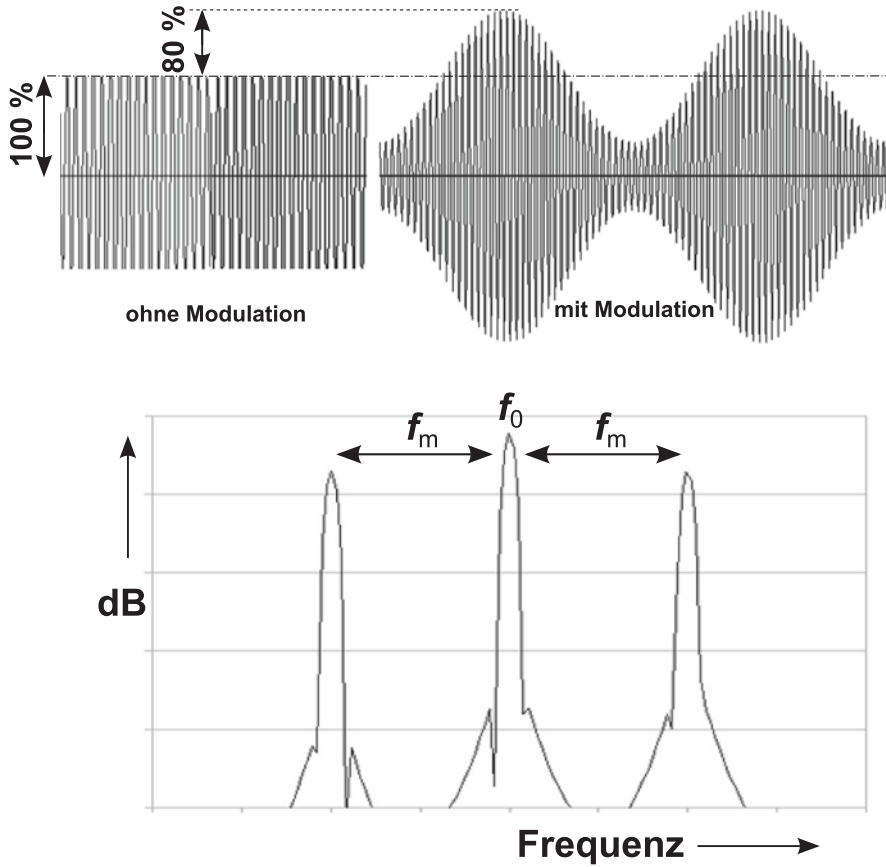
$$u = [1 + k \cdot \sin(2\pi f_m t)] \cdot U_0 \cdot \sin(2\pi f_0 t) \quad (1.24)$$

Das Ziel der Modulation ist nicht etwa, etwas breitbandiger zu werden, sondern dem zu testenden Gerät (Device under Test = DUT) eine Störung anzubieten, die durch Demodulation besonders wirksam wird. Wie bereits erwähnt, bilden viele Schaltungsbereiche ungewollt Demodulatoren. Wir kommen in Kap. 9 noch näher darauf zu sprechen. In der Praxis sind die Störer ebenfalls meist nicht mit konstanter Amplitude.

Bei EMV-Messungen ist man übereingekommen, mit einer AM mit 80 % Modulationsgrad und einer Modulationsfrequenz von 1 kHz zu arbeiten.

### 1.7.2 Frequenz-Modulation

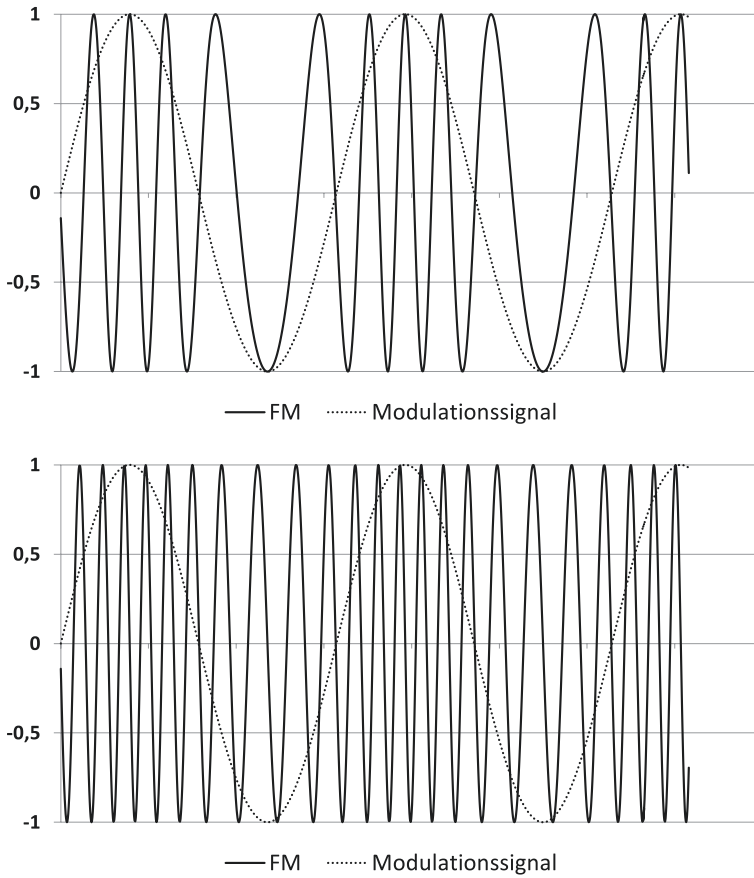
Obwohl bei EMV-Messungen eigentlich Frequenz-Modulation (FM) nicht vorkommt, ist sie dennoch zu erwähnen, denn spezielle Störer arbeiten mit FM, und auch Geräte für Datenübertragung sind bei Verwendung dieser Modulationsmethode besser gefeit gegenüber „normalen“ Störsignalen. Siehe hierzu auch Abschn. 9.3.



**Abb. 1.4** Amplitudenmoduliertes Signal mit einem Modulationsgrad von 0,8, Zeitbereich und Frequenzbereich. Es zeigen sich drei Peaks, nämlich der der Trägerfrequenz und die der beiden Seitenfrequenzen, die durch Addition und Subtraktion der Modulationsfrequenz  $f_m$  bezüglich der Trägerfrequenz  $f_0$  entstehen. Bei einem Modulationsgrad von 1,0 sind die Seitenschwingungen halb so groß wie die Trägerschwingung

Ein FM-Signal sei in Abb. 1.5 dargestellt. Vereinfacht gesprochen unterliegt eine Trägerfrequenz einer Größe, die mit der Elongation des modulierenden Signals proportional zusammenhängt. Mathematisch spiegelt sich die Zeitfunktion einer FM so wider:

$$u_{\text{FM}} = U_0 \cdot \cos \left[ 2\pi f_0 t + \frac{\Delta f_0}{\frac{f_m}{k}} \cdot \sin(2\pi f_m t) \right] \quad 1.25)$$



**Abb. 1.5** Frequenzmoduliertes Signal im Zeitbereich. Je nach Modulationsindex kann das Spektrum so entarten, dass der Träger gänzlich verschwindet. Dargestellt sind zwei unterschiedliche Verhältnisse von Trägerfrequenz zu Modulationsfrequenz, aber bei konstant gehaltenem Modulationsindex

Darin sind  $U_0$  die Amplitude des Trägers,  $k$  der Modulationsindex,  $f_0$  die Trägerfrequenz und  $f_m$  die Modulationsfrequenz.

Der Modulationsindex  $k$  ist das Verhältnis aus maximalem Frequenzhub des Trägers und der Frequenz des Modulationssignals. Ist die Amplitude des Modulationssignals konstant und variiert die Frequenz, so ändert sich auch der Modulationsindex.

Auch bei dieser Modulationsart verteilt sich die Leistung auf eine größere Bandbreite, was u. U. dazu führt, dass nachher bei der Messung der Störemission ein zeitlich bewerteter Pegel geringer ausfällt als ohne Modulation.