

Adolf J. Schwab · Wolfgang Kürner

---

Elektromagnetische Verträglichkeit

Adolf J. Schwab · Wolfgang Kürner

# Elektromagnetische Verträglichkeit

5., aktualisierte und ergänzte Auflage

Mit 294 Abbildungen und 15 Tabellen

 Springer

Prof. Dr.-Ing. Adolf J. Schwab  
Institut für Elektroenergiesysteme  
und Hochspannungstechnik  
Universität Karlsruhe  
Kaiserstraße 12  
76128 Karlsruhe  
a.schwab@ieee.org

Dr.-Ing. Wolfgang Kürner  
CASE<sup>3</sup> Beratende Ingenieure GbR  
Am Felde 22  
22765 Hamburg  
kuerner@casecube.com  
wolfgang.kuerner@ieee.org

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek  
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen  
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über  
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-540-42004-0 Springer Berlin Heidelberg New York  
ISBN 3-540-60787-0 4. Aufl. Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media  
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1990, 1991, 1994, 1996 und 2007

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. Text und Abbildungen wurden mit größter Sorgfalt erarbeitet. Verlag und Autor können jedoch für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Satz: Digitale Druckvorlage der Autoren  
Herstellung: LE-TeX, Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig  
Umschlaggestaltung: WMXDesign GmbH, Heidelberg  
Gedruckt auf säurefreiem Papier 68/3180 YL - 5 4 3 2 1 0

# Vorwort

Dieses Buch ermöglicht Entwicklern, Herstellern und Ingenieuren aller Disziplinen, einen schnellen Einstieg in die aktuelle Querschnittstechnologie der *Elektromagnetischen Verträglichkeit* (EMV). Auf leicht lesbare, verständliche Weise erlangt der Leser alle zur schnellen Lösung praktischer Probleme erforderlichen, grundlegenden Kenntnisse über die Entstehung, Ausbreitung und Beseitigung unerwünschter elektromagnetischer Einkopplungen. Diese treten in der Praxis in Form von Funkstörungen, Einstrahlungen, 50 Hz Brumm, Erdschleifen, Nebensprechen, elektrostatische Entladungen, etc. in der Automatisierungs-, Informations-, Kommunikations- und Messtechnik sowie in der Automobil- und Flugzeugindustrie auf.

Entwurf und Entwicklung elektronischer Systeme erfordern intime Kenntnisse der EMV gerechten Systemauslegung, der Störmechanismen, der Umgebungsbedingungen und des geplanten Einsatzgebiets. Um ein sicheres und zuverlässiges System zu erhalten, müssen die EMV-Anforderungen von Anfang an einer Entwicklung berücksichtigt werden. Das verlangt ein klares Verständnis der Einsatzumgebung (EMV Matrix), Kenntnis systeminterner und externer Wechselwirkungen, eine eindeutige Systemdefinition (Kenntnis der anzuwendenden Normen) und eine konsequente Sicherstellung der EMV während aller Phasen der Entwicklung (EMV Kontrollplan) bis hin zur Qualifikation (Emissionsmessungen, Störfestigkeitstests). Nur eine ganzheitliche und frühzeitige Betrachtung der EMV erlaubt kostengünstige, wirtschaftliche Lösungen, verringert die Wahrscheinlichkeit des Auftretens späterer elektromagnetischer Beeinflussungen und minimiert die Zeit zur Fehlersuche und Fehlerbeseitigung.

Nach einer kurzen Einführung in die allgemeine EMV-Problematik und der Vorstellung wichtiger Begriffe folgt zunächst ein Streifzug durch die vielfälti-

ge Natur elektromagnetischer Beeinflussungen und ihrer Übertragungswege. Ihm schließen sich systemtheoretische Formalismen zur Beschreibung elektromagnetischer Beeinflussungen im Frequenzbereich durch *Linien-* und *Amplitudendichtespektren* sowie eine Klassifizierung der verschiedenen Störquellen an.

Die nachfolgende, detaillierte Erläuterung der verschiedenen Kopplungsmechanismen verfolgt die Absicht, die Sinne des Lesers für die meist nicht auf Anhieb erkennbaren parasitären Kopplungspfade zu schärfen und die Identifikation von Störspannungsquellen zu erleichtern. Einen weiteren Schwerpunkt bildet die komplexe Materie der Berechnung elektromagnetischer Schirme, die dem Leser die Grundlagen für ein intimes Verständnis der elektromagnetischen Schirmung vermittelt. Wer auf schnelle Hilfe aus ist, kann diesen Teil zunächst überschlagen und sich unmittelbar mit Entstörmitteln und -maßnahmen sowie mit praktischen Problemlösungen vertraut machen.

Eigene Kapitel über die Messung von *Störemissionen* und *Störfestigkeiten* sowie über *Entstörmittelmessungen* und *EMV gerechtes Leiterplattendesign*, schließlich die *Wirkung elektromagnetischer Felder auf Organismen* lassen den Leser schnell zum Fachmann werden. Ein eigenes Kapitel zum komplexen, umfangreichen Normungswesen der Prüf- und Messtechnik für die diversen Produktfamilien rundet das Werk ab. Ein repräsentatives Schriftenverzeichnis für jedes Sachgebiet erleichtert dem Leser den schnellen, vertieften Zugang zu seinem Spezialproblem.

Das Buch ist seit der Erstauflage 1990 entsprechend dem Wandel der technologischen Herausforderungen stetig gewachsen und wird ab dieser 5. Auflage von zwei Verfassern gepflegt werden. Frau Diane Lauer danken beide Autoren für das Korrekturlesen, Frau Sigrid Cuneus und Herrn Dr. Boris Gebhardt vom Springer-Verlag für die rasche Fertigstellung und die ansprechende Ausstattung.

Zum Wohl der Leser der 6. Auflage bitten die Autoren um Rückmeldung etwaiger Fehler sowie um Anregungen zur Verbesserung des Buches an [a.schwab@ieee.org](mailto:a.schwab@ieee.org) und/oder [wolfgang.kuerner@ieee.org](mailto:wolfgang.kuerner@ieee.org),

# Inhaltsverzeichnis

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

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

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



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

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

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

# 1 Einführung in die Elektromagnetische Verträglichkeit

## 1.1 Elektromagnetische Verträglichkeit, Elektromagnetische Beeinflussung

*Elektromagnetische Verträglichkeit* (EMV) ist der moderne Oberbegriff für eine seit den Anfängen der Elektrotechnik bestehende, seither ständig gewachsene Problematik. Bereits bei den ersten Rundfunksendern ergab sich die Notwendigkeit der Absprache, wer wann auf welchen Frequenzen mit welcher Sendeleistung senden durfte. Ferner erforderte der ungestörte Empfang der Rundfunksendungen, dass andere elektrische Verbraucher nicht unkontrolliert Hochfrequenzenergie aussenden und möglicherweise Funkstörungen verursachen durften. Mit dem Aufkommen der Elektronik und Mikroelektronik nahm die Zahl *elektromagnetische Beeinflussungen* (EMB) verursachender Geräte und Systeme sprunghaft zu, ebenso die Zahl auf solche reagierende Geräte und Systeme. Dies führte schließlich für alle elektrischen und elektronischen Einrichtungen zur Festlegung von Grenzwerten bezüglich *Emission* und *Immunität*.

Unter *Elektromagnetischer Verträglichkeit*, EMV (engl.: EMC, *Electro-Magnetic Compatibility*), versteht man daher heute allgemein die friedliche Koexistenz aller Arten von Sendern und Empfängern elektromagnetischer Energie. Mit anderen Worten, Sender erreichen nur die gewünschten Empfänger, Empfänger reagieren nur auf die Signale von Sendern ihrer Wahl, es findet keine ungewollte gegenseitige Beeinflussung statt.

Als *Sender* und *Empfänger* gelten im EMV-Kontext neben Fernseh- und Tonrundfunksendern alle Stromkreise und Systeme, die unbeabsichtigt umweltbeeinflussende elektromagnetische Energie aussenden (sog. *Störer*), wie

- KFZ-Zündanlagen,
- Leuchtstofflampen,
- Universalmotoren,
- Leistungselektronik,
- Schaltkontakte,
- Atmosphärische Entladungen etc.

Beispiele für Empfänger elektromagnetischer Energie sind neben Rundfunk- und Fernsehempfängern auch

- Automatisierungssysteme,
- Mess-, Steuer- und Regelgeräte,
- Herzschrittmacher,
- KFZ-Mikroelektronik,
- Datenverarbeitungsanlagen,
- Bioorganismen etc.

Der moderne EMV-Begriff geht damit weit über die klassische *Funkentstörung* hinaus, beinhaltet sie jedoch nach wie vor oberbegrifflich.

Elektromagnetische Verträglichkeit ist keineswegs selbstverständlich, da das elektromagnetische Spektrum ähnlich anderen Ressourcen zunehmender Verschmutzung unterliegt (engl.: *spectrum pollution*) und ihre Wahrung immer größere Anstrengungen erfordert. Im gegenseitigen Interesse aller Nutzer sind daher umfassendes Wissen um die Wirkungen elektromagnetischer Felder und Wellen auf elektromagnetische Systeme und Bioorganismen sowie eine disziplinierte Nutzung des elektromagnetischen Spektrums höchstes Gebot.

Elektrische Einrichtungen können gleichzeitig als Empfänger und Sender wirken, z. B. Zwischenfrequenz von Superheterodyn-Empfängern, Zeilenfrequenz von Fernsehempfängern und Computerbildschirmen, Clock-Frequenz von Rechnern, usw. Man spricht deshalb auch von der elektromagnetischen Verträglichkeit einzelner Geräte. So definiert VDE 0870 [1.1] Elektromagnetische Verträglichkeit als

*„Fähigkeit einer elektrischen Einrichtung, in ihrer elektromagnetischen Umgebung zufrieden stellend zu funktionieren, ohne diese Umgebung, zu der auch andere Einrichtungen gehören, unzulässig zu beeinflussen“.*

Eine elektrische Einrichtung gilt demnach als verträglich, wenn sie in ihrer Eigenschaft als Sender tolerierbare *Emissionen*, in ihrer Eigenschaft als Empfänger tolerierbare Empfänglichkeit für *Immissionen*, das heißt ausreichende *Störfestigkeit* bzw. *Immunität* aufweist.

Das Problem der EMV taucht meist zuerst beim Empfänger auf, wenn der einwandfreie Empfang eines Nutzsignals beeinträchtigt ist, beispielsweise die Funktion eines Automatisierungssystems durch vagabundierende elektromagnetische Energie gestört oder gar unmöglich gemacht wird. Man spricht dann vom Vorliegen *Elektromagnetischer Beeinflussungen*, EMB (engl.:

EMI, *Electromagnetic Interference*). Gelegentlich wird auch die Störgröße selbst als EMB bezeichnet, wengleich hierfür, zumindest am Empfänger, der Begriff *Immission* treffender ist. VDE 0870 [1.1] definiert elektromagnetische Beeinflussung als

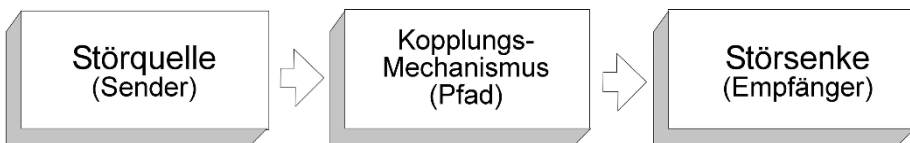
„*Einwirkung elektromagnetischer Größen auf Stromkreise, Geräte, Systeme oder Lebewesen*“.

Elektromagnetische Beeinflussungen können sich in *reversiblen* oder *irreversiblen Störungen* manifestieren. Beispiele für reversible Störungen sind zeitweise mangelnde Verständigung beim Telefonieren, Knackstörungen bei Schaltvorgängen in Haushaltgeräten (engl.: click); Beispiele irreversibler Störungen sind die *Zerstörung* elektronischer Komponenten auf Leiterplatten durch elektrostatische Aufladungen (EGB: elektrostatisch gefährdete Bauelemente, engl.: ESD, *Electrostatic Discharge*) oder Überspannungen bei Blitzeinwirkung (engl.: LEMP, *Lightning Electromagnetic Pulse*), die unbeabsichtigte Zündung elektrisch initiiertter Komponenten in der Raumfahrt-technik usw.

In der Praxis unterscheidet man *reversible* Beeinflussungen nach ihrer Stärke in

- Beeinflussungen, die gerade noch tolerierbare *Funktionsminderungen* bzw. *Beeinträchtigungen* bewirken und
- Beeinflussungen, die zu nichttolerierbaren *Fehlfunktionen* bzw. *unzumutbarer Belästigung* führen.

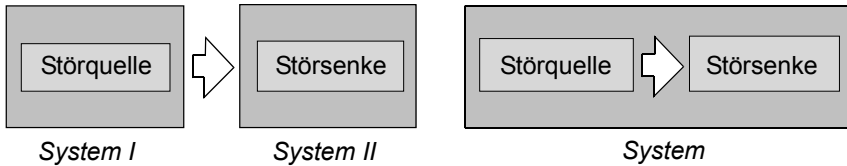
Wegen der Vielfalt der in Frage kommenden elektrischen Einrichtungen, und um den Störeffekt explizit zum Ausdruck zu bringen, hat man für Sender und Empfänger die Oberbegriffe *Störquelle* und *Störsenke* geschaffen. Hiermit erhält man ein *Beeinflussungsmodell* gemäß Bild 1.1.



**Bild 1.1:** Beeinflussungsmodell mit Störquelle, Koppelmechanismus und Störsenke.

Dieses grobe Modell ist noch wenig aussagekräftig, es wird daher in den folgenden Kapiteln weiter verfeinert werden.

Im Gegensatz zu den Beeinflussungen zwischen verschiedenen Systemen, die man als *Intersystem-Beeinflussungen* bezeichnet, können Sender und Empfänger auch Teile ein und desselben Systems sein, man spricht dann von *Intrasystem-Beeinflussungen*, Bild 1.2.



**Bild 1.2:** *Intersystem-Beeinflussung* (links) und *Intrasystem-Beeinflussung* (rechts).

Typische Beispiele für Intrasystembeeinflussungen sind parasitäre Rückkopplungserscheinungen in mehrstufigen Verstärkern, Signalwechsel auf benachbarten Datenleitungen elektronischer Baugruppen, Stromänderungen in Stromversorgungsleitungen und die durch sie verursachten induktiven Spannungsabfälle, selbstinduzierte Spannungen beim Ausschalten von Relais- und Schützpulen sowie komplexe Systeme mit mehreren Sendern und Empfängern.

Wann Sender und Empfänger letztlich als elektromagnetisch verträglich bezeichnet werden, hängt wesentlich von der Art des Senders oder Empfängers ab.

- Rundfunk- und Fernsehsender gelten als verträglich, wenn sie nur auf der ihnen zugewiesenen Frequenz, das heißt ohne merkliche Oberschwingungen arbeiten, und wenn die von ihnen abgestrahlten elektromagnetischen Felder in größerer Entfernung so weit abgeklungen sind, dass ein dort befindlicher auf gleicher Frequenz arbeitender Sender regional ungestört empfangen werden kann.
- Sender, die *parasitär* elektromagnetische Energie an ihre Umwelt abgeben, gelten als verträglich, wenn die von ihnen erzeugten Feldstärken in einem bestimmten Abstand in Vorschriften festgelegte Grenzwerte (s. 1.2.3) nicht überschreiten, das heißt der einwandfreie Betrieb eines in diesem Abstand befindlichen Empfängers innerhalb seiner Spezifikationen möglich ist.

- Empfänger gelten als verträglich, wenn sie in einer elektromagnetisch stark verseuchten Umwelt ihr Nutzsignal mit befriedigendem Störabstand zu empfangen in der Lage sind und selbst keine unverträglichen Störungen aussenden (z. B. Zwischenfrequenz beim Superhet-Empfänger).

Durch geeignete Maßnahmen beim

- *Sender* (Schirmung, Spektrumbegrenzung, Richtantennen, usw.)
- *Kopplungspfad* (Schirmung, Filterung, Leitungstopologie, Lichtwellenleiter, usw.),
- *Empfänger* (Schirmung, Filterung, Schaltungskonzept, usw.),

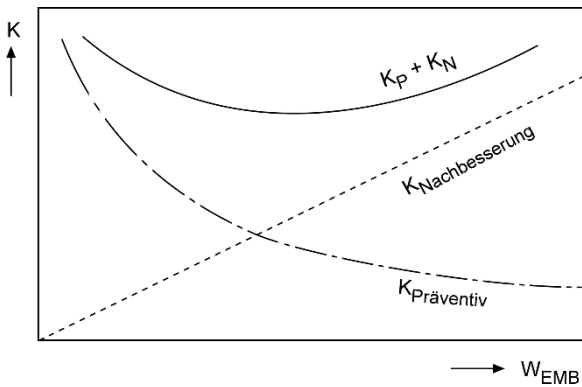
lässt sich in praktisch allen Fällen eine ausreichende elektromagnetische Verträglichkeit erreichen. Aus wirtschaftlichen Gründen, und soweit technisch durchführbar, wird man jedoch zuerst eine möglichst hohe Verträglichkeit des Senders anstreben (*Primärmaßnahmen*) und die Härtung einer Vielzahl von Empfängern erst in zweiter Linie ins Auge fassen (*Sekundärmaßnahmen*). Typische Beispiele für Primärmaßnahmen sind die Verringerung der Netzurückwirkungen von Stromrichtern durch lokale Einzelkompensation und Filterung, die Schirmung von Mikrowellenherden oder die Beschaltung von Universalmotoren. Vielfach wird EMV erst durch konzertierte Maßnahmen bei allen drei Komponenten erreicht.

Bei *Intrasystem*-Beeinflussungen kann man die Wahrung der elektromagnetischen Verträglichkeit meist dem Hersteller bzw. dem jeweiligen Betreiber überlassen, die ja beide an einem funktionsfähigen System interessiert sind. Speziell in der Datenverarbeitung und Kommunikation liegt das Vermeiden von EMB im ureigenen Interesse des Betreibers, beispielsweise bei Banken die Vermeidung des „Abhörens“ von Bildschirminformationen oder im militärischen Bereich die Vermeidung des Ab- bzw. Mithörens geheimer Informationen (engl.: TEMPEST – *Temporary Emanation and Spurious Transmission*) [1.2, 1.20].

Bei *Intersystem*-Beeinflussungen des Ton- und Fernsehgrundfunkempfangs sowie der Funkdienste schreibt der Gesetzgeber [1.3] im Rahmen der Funkentstörung Grenzwerte tolerierbarer Emissionen vor (s. Abschn. 1.2.3 u. Kap. 12). Die zulässigen Emissionen stellen notwendigerweise einen Kompromiss dar, der sowohl die Natur der Sender als auch die technischen Bedürfnisse der im jeweiligen Frequenzbereich arbeitenden Empfänger berücksichtigen muss.



Komplexe Systeme verlangen bereits im Planungsstadium die umfassende Berücksichtigung von EMV-Aspekten sowie den Einsatz EMV-förderlicher Komponenten und Maßnahmen (EMV-Plan). Hoher präventiver Aufwand  $K_p$  lässt spätere EMB-Probleme mit nur geringer Wahrscheinlichkeit und auch nur geringe Nachbesserungskosten  $K_N$  während der Inbetriebnahme-phase erwarten. Umgekehrt führt geringer anfänglicher Aufwand mit großer Wahrscheinlichkeit zu hohen Nachbesserungskosten. Über der *Wahrscheinlichkeit des Auftretens elektromagnetischer Beeinflussungen*  $W_{EMB}$  aufgetragen, zeigt die Kurve für den gesamten EMV-Aufwand  $K_p + K_N$  ein Minimum, Bild 1.3.



**Bild 1.3:** Kostenkurven  $K_p = f(W_{EMB})$  für rechtzeitig geplante EMV-Maßnahmen und  $K_N = g(W_{EMB})$  für nachträglichen Aufwand während der Inbetriebnahme. Gesamte EMV-Kosten  $K = K_p + K_N$  mit Kostenminimum.

Das Anstreben des EMV-Kostenminimums setzt eine intime Kenntnis der Entstehung, Ausbreitung und Einkopplung elektromagnetischer Beeinflussungen voraus, die wenig augenfällige Beeinflussungspfade frühzeitig erkennen lässt und übertriebenen Entstöraufwand sowie Maßnahmen am falschen Platz vermeiden hilft. Leider finden sich nicht wenige Projektverantwortliche mangels umfassender Planung bezüglich EMV-Aspekten, mangels ausreichenden EMV-Bewußtseins sowie wegen der parasitären Natur vieler EMV Phänomene häufig überrascht am rechten Ende der Abszisse wieder. Daher ist es unerlässlich, bereits bei der Spezifikation einer Komponente oder eines Systems EMV-Anforderungen und deren Umsetzung zu verankern. Während der gesamten Entwicklung muss die EMV in das Design einfließen und kontinuierlich nachgeprüft werden. Ein EMV-Plan und entwicklungsbegleitende Tests stellen dann größtenteils sicher, dass die Qualifikation, der Nachweise der EMV, gelingt.

## 1.2 Störpegel – Störabstand – Grenzstörpegel – Stördämpfung

Zur quantitativen Beurteilung der elektromagnetischen Verträglichkeit bedient man sich *logarithmischer Verhältnisse* der jeweils zur Diskussion stehenden Größen wie Spannungen, Ströme, Feldstärken, Leistungen etc. Die Verwendung logarithmischer Verhältnisse erlaubt die übersichtliche Darstellung von Größenverhältnissen, die sich über viele Zehnerpotenzen erstrecken, und besitzt weiter den Vorzug, dass man multiplikativ verknüpfte Verhältnisse auf einfache Weise additiv verknüpfen und damit Begriffe wie *Störabstände* usw. einführen kann. Man unterscheidet zwei Arten logarithmischer Verhältnisse, *Pegel* und *Übertragungsmaße*.

- *Pegel* beziehen *Systemgrößen*, z. B. Spannungen, auf einen festen *Bezugswert*, z. B.  $U_0=1\mu\text{V}$ . Die bezogenen Systemgrößen bezeichnet man dann z. B. als *Spannungspegel*.
- *Übertragungsmaße* setzen *Ein- und Ausgangsgrößen* eines Systems in logarithmierte Verhältnisse. Diese dienen der Kennzeichnung der Übertragungseigenschaften des Systems. Die Verhältnisse stellen logarithmierte Kehrwerte von *Übertragungsfaktoren* des Frequenzbereichs dar (s. a. Abschn. 1.6). Typische Beispiele sind die *Leitungs-dämpfung*, die *Schirm-dämpfung*, die *Verstärkung*, die *Gleichtakt/Gegentakt-Dämpfung* etc.

Die ins Verhältnis gesetzten Größen müssen *Frequenzbereichsgrößen* sein, das heißt *komplexe Amplituden*, *Amplitudendichten* etc. Es werden jeweils nur die *Beträge* (Amplituden oder Effektivwerte) der Größen ins Verhältnis gesetzt.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass das Rechnen mit Pegel- und Übertragungsmaßen vor allem bei der Bildung von Mittelwerten (zum Beispiel bei statistischen Auswertungen) und dem Einfließen additiver Anteile (zum Beispiel Offsets) überlegt erfolgen muss, um gängige Fehler zu vermeiden. Es sind zuerst die absoluten Größen zu bestimmen, bevor die eigentliche Berechnung der Mittelwerte erfolgt.

Pegelmaße werden grundsätzlich durch die „Einheit“ dB gekennzeichnet. Nach IEC 60027 ist die Schreibweise für das Kennzeichnen von Pegeln klar definiert. Allerdings wird sie von nahezu niemandem richtig angewandt, da sich im Laufe der Zeit gebräuchlichere Schreibweisen eingeprägt haben.

Ein Leistungspegel wird nach IEC 60027 durch

$$L_{P(\text{re}1\text{mW})} = 10 \lg \left( \frac{P_1}{1\text{mW}} \right) \text{dB} \quad \text{oder kürzer} \quad L_{P/1\text{mW}} = 10 \lg \left( \frac{P_1}{1\text{mW}} \right) \text{dB}$$

berechnet.

Der jeweilige korrekt ausgedrückte Leistungspegel würde dann beispielsweise durch „ $L_{P/1\text{pW}}=3\text{dB}$ “ ausgedrückt. Der Ausdruck „ $3\text{dBpW}$ “ soll nach IEC 60027 ausdrücklich vermieden werden. Wie schon erwähnt, wird dies in der Praxis nicht oft umgesetzt. Wir orientieren uns nach der herrschenden Meinung und fahren fort mit „ $3\text{dBpW}$ “.

### 1.2.1 Logarithmierte bezogene Systemgrößen - Pegel

Mit Hilfe des dekadischen Logarithmus  $\log_{10}(x) = \lg(x)$  definiert man beispielsweise folgende Pegel in Dezibel (dB):

$$\text{Spannungspegel:} \quad u_{\text{dB}} = 20 \lg \frac{U_x}{U_0} \text{dB}_{\mu\text{V}/\text{m}} \quad (1-1)$$

$$\text{Bezugsgröße} \quad U_0 = 1 \mu\text{V}$$

$$\text{Strompegel:} \quad i_{\text{dB}} = 20 \lg \frac{I_x}{I_0} \text{dB}_{\mu\text{A}} \quad (1-2)$$

$$\text{Bezugsgröße} \quad I_0 = 1 \mu\text{A}$$

$$\text{E-Feldstärkepegel:} \quad E_{\text{dB}} = 20 \lg \frac{E_x}{E_0} \text{dB}_{\mu\text{V}/\text{m}} \quad (1-3)$$

$$\text{Bezugsgröße} \quad E_0 = 1 \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$$

$$\text{H-Feldstärkepegel:} \quad H_{\text{dB}} = 20 \lg \frac{H_x}{H_0} \text{dB}_{\mu\text{A}/\text{m}} \quad (1-4)$$

$$\text{Bezugsgröße} \quad H_0 = 1 \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$$

Eine Ausnahme bildet das Leistungsverhältnis, bei dem Zähler und Nenner jeweils dem Quadrat der betrachteten Amplituden proportional sind. Es tritt nur der Faktor 10 auf.

$$\text{Leistungspegel:} \quad p_{\text{dB}} = 10 \lg \frac{P_x}{P_0} \text{ dBpW} \quad (1-5)$$

$$\text{Bezugsgröße} \quad P_0 = 1 \text{ pW}$$

Unter der Voraussetzung eines einheitlichen Widerstands  $R_x = R_0$  stimmen die dB-Werte der Leistungspegel mit den anderen Pegeln überein.

Ursprünglich wurde der Begriff dB nur für Leistungsverhältnisse verwendet,

$$p_{\text{dB}} = 10 \lg \frac{P_x}{P_0} \text{ dB} \quad \text{bzw.} \quad p_B = 10 \lg \frac{P_x}{P_0} B \quad ,$$

wobei B für Bel steht (in Erinnerung an den Erfinder des Telefons, *Alexander Graham Bell*). Da Leistungen dem Quadrat einer Spannung, eines Stromes etc. proportional sind, ergibt sich bei letzteren zusätzlich der Faktor 2 (vergl. (1-1) und (1-5)).

Bei *Spannungen*, *Strömen* und *Feldstärken* entsprechen nachstehende Pegelangaben folgenden Verhältnissen

$$3\text{dB} \hat{=} \sqrt{2}, \quad 6\text{dB} \hat{=} 2, \quad 20\text{dB} \hat{=} 10, \quad 120\text{dB} \hat{=} 10^6 \quad .$$

Für *Leistungen* gilt dagegen  $10\text{dB} \hat{=} 10$ .

Obige Pegel wurden unter Verwendung einer festen Bezugsgröße ermittelt und werden daher oberbegrifflich als *absolute Pegel* bezeichnet. Sie machen eine Aussage über den Wert der jeweils betrachteten Größen. Ein Pegel von 20dBm entspricht einem Wert von 20dB über 1 mW, ein Pegel von -16dBì V einem Wert von 16dB unter 1 ì V. Da der Logarithmus einer Zahl keine Dimension besitzt, stellen bezogene Systemgrößen ebenfalls reine Zahlen dar. Um dennoch die Natur des von ihnen repräsentierten Verhältnisses zum Ausdruck zu bringen, wird der Pegel in dB noch mit  $\mu\text{V}$ ,  $\mu\text{A}$  etc. erweitert, beispielsweise zu dB $\mu\text{V}$ , dB $\mu\text{A}$ .

Wie schon oben erläutert, bezeichnet dBm den Bezug einer Leistung auf 1 mW. Andere häufig benutzte Bezugsgrößen sind 1 W, 1 V, 1 ì V oder auch 1 A bzw. 1  $\mu\text{A}$ . Ähnlich wie für dBm findet man auch hierfür die nach Norm eigentlich nicht korrekten Schreibweisen dBW, dBV, dBì V, dBA, dBì A, dBW/m<sup>2</sup>, dBV/m, dBì V/m, dBA/m und dBì A/m.

Um ein Gefühl für die vorkommenden Größenordnungen von Pegelangaben zu geben, hier einige Beispiele:

- Der Ausgangsbereich von Signalgeneratoren geht üblicherweise von -140dBm bis +20dBm das heißt 0,01 fW (Femto-Watt) bis 0,1 W.
- Mobilfunk-Basisstationen senden mit +43dBm oder 20 W,
- Handys senden mit 10dBm bis 33dBm oder 10 mW bis 2 W.
- Rundfunksender senden mit 70 dBm bis 90 dBm bzw. 10 kW bis 1 MW.
- Störfeldstärken von 20dB $\mu$ V/m entsprechen 10  $\mu$ V/m

Ähnlich wie oben mit dem *dekadischen* Logarithmus Verhältnisse in dB gebildet wurden, lassen sich mit dem natürlichen (*Neperischen*) Logarithmus Verhältnisse in *Neper* (Np) bilden, z. B.:

$$\boxed{u_{\text{NP}} = \ln \frac{U_x}{U_0} \text{ Neper}} \quad \text{bzw.} \quad \boxed{p_{\text{NP}} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_x}{P_0} \text{ Np}} \quad . \quad (1-6)$$

1 Neper entspricht dem Verhältnis  $U_x/U_0 = e$ .

Neper und Dezibel lassen sich ineinander umrechnen,

$$\boxed{\ln \frac{U_x}{U_0} \text{ Np} = 20 \lg \frac{U_x}{U_0} \text{ dB}}$$

bzw.

$$\boxed{1 \text{ Np} = 8,686 \text{ dB}} \quad \text{oder} \quad \boxed{1 \text{ dB} = 0,115 \text{ Np}} \quad . \quad (1-7)$$

So gilt für die Verhältnisse

10:1	2,3Np=20dB
100:1	4,6Np=40dB
1000:1	6,9Np=60dB

In beiden Darstellungen erhöht sich ein bestimmter Pegel um jeweils den gleichen Betrag für jede weitere Größenordnung. Die Attribute dB und Np weisen lediglich auf die Art der verwendeten Logarithmus-Funktion hin (lg bzw. ln). Sie sind keine Einheiten, werden aber häufig wie solche benutzt.

Im Folgenden seien noch einige Rechenbeispiele für absolute und relative Pegel aufgeführt:

**Beispiel 1: Spannungsverhältnis  $V_U$  eines Verstärkers**

$$U_E = 1 \text{ V}, U_A = 100 \text{ V} \rightarrow V_U = 100 \text{ V} / 1 \text{ V} = 100,$$

$$V_U = 20 \lg(100 \text{ V} / 1 \text{ V}) \text{ dB} = 20 \lg(100) \text{ dB} - 20 \lg(1) \text{ dB} = 60 \text{ dB} - 20 \text{ dB} = 40 \text{ dB}.$$

**Beispiel 2: Leistungsverhältnis  $P_U$  eines Verstärkers**

$$P_{\text{In}} = 1 \text{ mW}, P_{\text{Out}} = 25 \text{ W} \rightarrow V_P = 25 \text{ W} / 0,001 \text{ W} = 25000,$$

$$P_U = 10 \lg(25 \text{ W} / 0,001 \text{ W}) \text{ dB} = 10 \lg(25) - 10 \lg(0,001) \\ = 13,98 \text{ dB} + 30 \text{ dB} = 43,98 \text{ dB}.$$

**Beispiel 3:**

Möchte man bei verstärkten Signalen den notwendigen Generatorpegel berechnen, der für eine bestimmte Ausgangsleistung benötigt wird, eignet sich die Darstellung in Pegelmaßen, um die Berechnungen zu vereinfachen:

Signalgenerator  $\rightarrow$  Verstärker  $\rightarrow$  Empfänger

Gegeben sei ein Verstärker mit 25 W Ausgangsleistung bei 1 mW Eingangsleistung

$$\rightarrow P_U = 10 \lg(25 \text{ W} / 0,001 \text{ W}) \text{ dB} \approx 44 \text{ dB}.$$

Benötigter Leistungspegel am Empfänger: 22dBm

$$\rightarrow \text{Notwendiger Generatorpegel} = 22 \text{ dBm} - 44 \text{ dB} = -22 \text{ dBm}.$$

**Beispiel 4: Abnahme der Feldstärke**

Oftmals liegen bestimmte Grenzwerte für gestrahlte Emissionen nicht für den gebrauchten Messabstand vor. Zur Abschätzung der Emission wird deshalb oft auf den jeweiligen Abstand umgerechnet:

Gegeben: Messwert:  $e = 100 \text{ dB}\mu\text{V} / \text{m}$  in 3 m Abstand zum Prüfling.

Gesucht: Äquivalenter Messwert  $e'$  in 10 m Entfernung.

$$\frac{E'}{E} = \frac{d}{d'} \rightarrow 20 \lg \frac{E'/(1\mu\text{V}/\text{m})}{E/(1\mu\text{V}/\text{m})} = 20 \lg \frac{d}{d'}$$

$$\rightarrow e' - e = 20 \lg \frac{d}{d'} \rightarrow e' = e + 20 \lg \frac{d}{d'}$$

$$e' = 100 \text{dB}\mu\text{V}/\text{m} - 10,46 \text{dB} = 89,54 \text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$$

### Beispiel 5: Umrechnung Leistungspegel $\rightarrow$ Spannungspegel

Häufig liegen bestimmte Größen nicht in der Einheit vor, in welcher sie, beispielsweise mit Grenzwerten, verglichen werden sollen. Kennt man den Wellenwiderstand des benutzten Systems, so können auf einfache Art und Weise die Pegel mit deren verschiedenen Bezugseinheiten durch einen additiven Term als Annäherung ineinander überführt werden.

Gegeben:  $R = 50\Omega$ ,  $P = U_0^2/R$ ,  $U_0 = 1\mu\text{V}$ ,  $P_0 = 1\text{mW}$ .

Gesucht: Umrechnung in Form von  $p/\text{dBm} = u/\text{dB}\mu\text{V} + X$

$$P = \frac{U^2}{R} \rightarrow \frac{P}{P_0} = \frac{U^2}{P_0 \cdot R} = \frac{U^2}{U_0^2} \cdot \frac{U_0^2}{P_0 \cdot R}$$

Logarithmieren:

$$10 \lg \left( \frac{P}{P_0} \right) = 10 \lg \left( \frac{U^2}{U_0^2} \cdot \frac{U_0^2}{P_0 \cdot R} \right) = 10 \lg \left( \frac{U^2}{U_0^2} \right) + 10 \lg \left( \frac{U_0^2}{P_0 \cdot R} \right)$$

$$\rightarrow p/\text{dBm} = u/\text{dB}\mu\text{V} + 10 \lg \frac{(1\mu\text{V})^2}{1\text{mW} \cdot 50\Omega}$$

$$\rightarrow p/\text{dBm} = u/\text{dB}\mu\text{V} - 107 \text{dB}$$

### Beispiel 6: Messung von Signalen an der Rauschgrenze

Eine häufig vorkommende Aufgabe ist die Messung schwacher Signale in der Nähe des Rauschens des Messgerätes, beispielsweise eines Empfängers oder eines Spektrumanalysators.

Das Messgerät zeigt die Summe aus Eigenrauschen und Signalleistung an. Nun soll die Signalleistung allein bestimmt werden. Voraussetzung für die folgende Rechnung ist, dass das Messgerät die Effektivleistung der Signale

anzeigt. Bei Leistungsmessern ist das fast immer der Fall, bei Spektrumanalysatoren muss der so genannte RMS-Detektor eingeschaltet werden.

Man bestimmt zunächst das Eigenrauschen  $P_N$  des Messgeräts, durch Abtrennen des Messsignals. Danach misst man das Signal mit Rauschen  $P_{\text{tot}}$ . Die Leistung  $P$  des Signals allein erhält man durch Subtraktion der linearen Leistungswerte.

Beispiel: Der angezeigte Rauschpegel  $P_N$  eines Spektrumanalysators (ohne angelegtes Signal) beträgt  $-80\text{dBm}$ . Mit Eingangssignal steigt die Anzeige auf  $P_{\text{tot}} = -75\text{dBm}$ . Wie groß ist die Leistung des Signals  $P$  in  $\text{dBm}$ ?

$$P_N = 10^{\frac{-80}{10}} \text{ mW} = 0,00000001 \text{ mW}$$

$$P_{\text{tot}} = 10^{\frac{-75}{10}} \text{ mW} = 0,0000000316 \text{ mW}$$

$$P = P_{\text{tot}} - P_N = 0,0000000216 \text{ mW}$$

$$P = 10 \lg \frac{0,0000000216 \text{ mW}}{1 \text{ mW}} = -76,65 \text{ dBm}$$

Die Signalleistung  $P$  beträgt also  $-76,65\text{dBm}$ . Man sieht, dass ohne Korrektur des Rauschens der Pegel des Signals immerhin  $1,65\text{dB}$  zu hoch angezeigt wird.

### 1.2.2 Störpegel und Störabstand

Logarithmische Verhältnisse tragen je nach ihrer physikalischen bzw. technischen Bedeutung besondere Namen. So unterscheidet man in der Elektromagnetischen Verträglichkeit bei Pegeln folgende *absoluten* und *relativen* Pegel.

#### Absolute Pegel:

##### *Störpegel*

Bezogener Wert einer *Störgröße*. Die Obergrenze zulässiger Störpegel bilden die in DIN/VDE-Bestimmungen festgelegten Grenzwerte für Funkstörungen (s. Abschn. 1.2.3 und Kap. 12).

##### *Störschwellenpegel*

Bezogener kleinster Wert des Nutzsignals, dessen Überschreitung durch den Störpegel am Empfangsort als Störung empfunden wird.



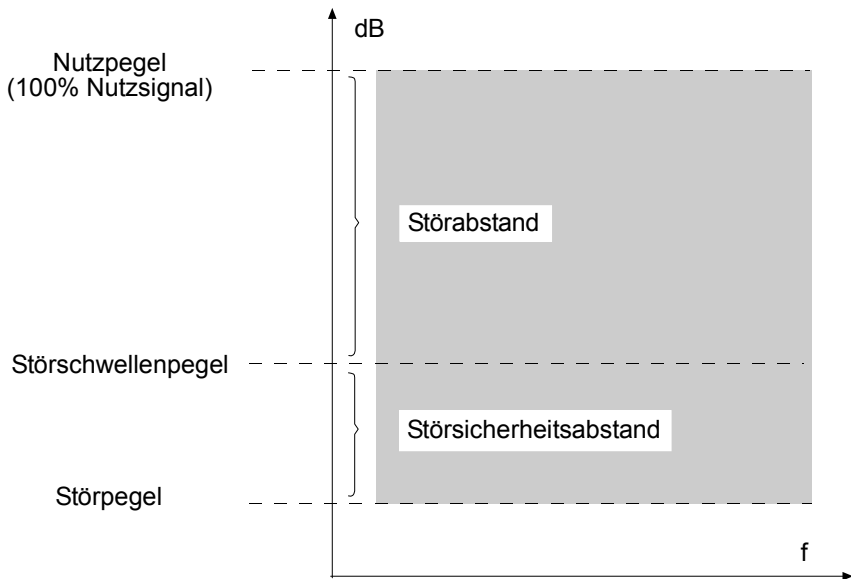
*Nutzpegel* Bezogener 100% Wert des Nutzsignals.

**Relative Pegel:**

*Störabstand* Pegeldifferenz zwischen Nutzpegel und Störschwellenpegel (auch berechenbar als logarithmisches Verhältnis von Nutzsignal und Störschwelle).

*Störsicherheitsabstand* Pegeldifferenz zwischen Störschwellenpegel und Störpegel (auch berechenbar als logarithmisches Verhältnis von Störschwelle und Störgröße).

Diese Begriffe sind in Bild 1.4 veranschaulicht.



**Bild 1.4:** Beispiele logarithmischer Verhältnisse. Definition von Störabstand und Störsicherheitsabstand. (In der Regel sind die Pegel keine Parallelen zur Abszisse, sondern in problemspezifischer Weise von der Frequenz abhängige Spektren).

Im Gegensatz zu den auf eine bestimmte Bezugsgröße (z. B. 1  $\mu\text{V}$ ) bezogenen *absoluten Pegeln* werden *relative Pegel* als *Pegeldifferenzen* ermittelt.

Störpegel, Störschwellenpegel und Nutzpegel sind in der Regel frequenzabhängige Größen. Demnach sind *Störsicherheitsabstand* und *Störabstand* ebenfalls Größen, die von der Frequenz abhängen können.

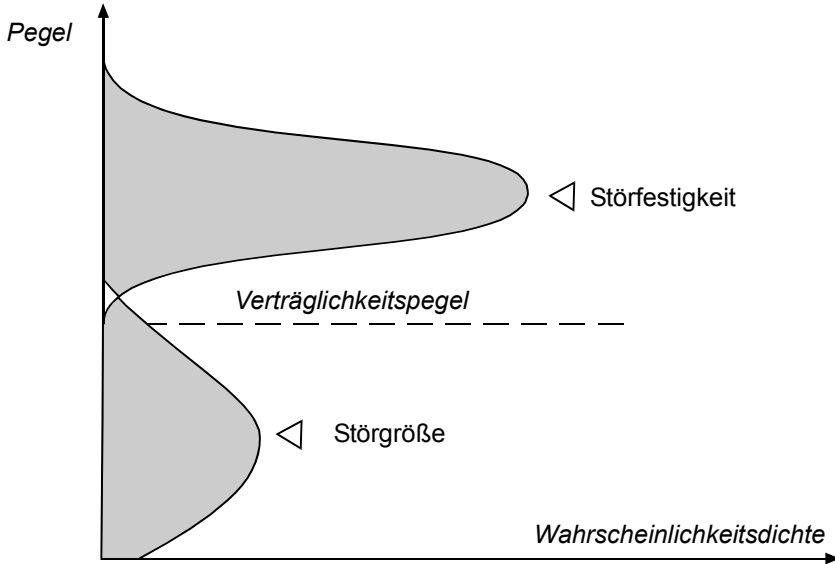
Bei Analogsignalen der Messtechnik begnügt man sich häufig mit einem Störabstand  $> 40$  dB (Messfehler bleiben dann unter 1%), für Rundfunk und Fernsehen gelten Werte zwischen 30 und 60 dB, für Telefon ca. 10 dB als ausreichend. Genaue Zahlen sind im Einzelfall den jeweils geltenden Normen zu entnehmen.

Im Gegensatz zu Systemen mit analoger Signalverarbeitung, bei denen die Festlegung der Störschwelle je nach Qualitätsansprüchen (Störempfinden) offensichtlich verhandlungsfähig ist, zeichnen sich digitale Systeme dadurch aus, dass sie unterhalb einer von der Schaltkreisfamilie abhängigen Schwelle überhaupt nicht gestört bzw. oberhalb dieser Schwelle sicher gestört werden.

Hierbei ist noch zwischen *statischer* und *dynamischer* Störsicherheit zu unterscheiden. Liegt die Einwirkdauer einer Störung unter der Schaltverzögerungszeit, sind höhere Störpegel eher tolerierbar als bei statischer Beanspruchung (s. Abschn. 1.2.3).

Speziell bei der Netzurückwirkungsproblematik (s. Abschn. 2.2.4) versucht man wegen der starken Kopplung der Störquellen so genannte *Verträglichkeitspegel* festzulegen, die unter Berücksichtigung der Summenwirkung aller am Netz betriebenen potentiellen Störer ausreichende elektromagnetische Verträglichkeit im Elektroenergiesystem gewährleisten [1.17]. Diese Verträglichkeitspegel bilden die Grundlage sowohl für die Dimensionierung der statistisch verteilten *Störfestigkeit* von Geräten als auch für die Festlegung statistisch verteilter zulässiger *Störemissionen*.

Da der Maximalwert von Netzstörungen nur mit Hilfe statistischer Schätzmethoden ermittelt werden kann und die Wahrung der EMV an Hand dieses maximalen Pegels wirtschaftlich nicht durchführbar wäre, wird der Verträglichkeitspegel in die Lücke zwischen den Maxima der Wahrscheinlichkeitsdichten gelegt. Genau genommen legt man den Verträglichkeitspegel so, dass er mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, z. B. 95%, nicht überschritten wird und dass die Störfestigkeit der Geräte grundsätzlich oberhalb dieses Pegels liegt, Bild 1.5.



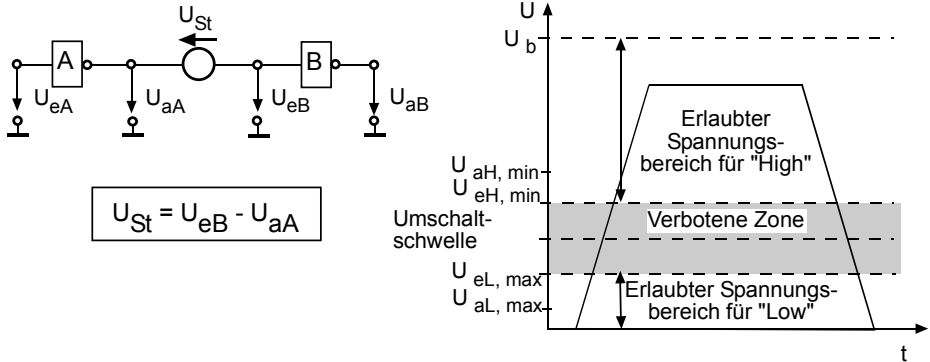
**Bild 1.5:** Festlegung des Verträglichkeitspegels für eine bestimmte Störgröße, z. B. 5-te Oberschwingung.

Wie hoch der Störschwellenpegel eines Geräts über den Verträglichkeitspegel gelegt wird (Störsicherheitsabstand) ist eine Frage der Bedeutung des Geräts. Dies können sicherheitsrelevante, ebenso jedoch aus besonderen Qualitätsansprüchen heraus gewachsene Gründe sein.

Nach herrschender Meinung ist zwischen den umgebungsbedingt auftretenden maximalen Störpegeln und der Störfestigkeitsanforderungen an ein Gerät ein Mindestabstand von 6dB zu gewährleisten. Gebräuchliche Sicherheitsabstände (engl.: *Margin*) zwischen Emissionsgrenzwerten und Störfestigkeitsanforderungen betragen beispielsweise in der Flugzeugindustrie teilweise über 80dB.

### 1.2.3 Statische und dynamische Störabstände digitaler Schaltkreise

Bei digitalen Schaltkreisen unterscheidet man zwischen *statischer* und *dynamischer Störfestigkeit*. Für Störsignale, deren zeitliche Dauer größer ist als die Signalverzögerungszeit des Schaltkreises (engl.: *delay time*,  $t_D$ ), wird die Störfestigkeit durch den *statischen Störabstand* charakterisiert, s. Bild 1.6.



**Bild 1.6:** Zur Erläuterung des *statischen Störabstands* bei digitalen Schaltkreisen. Die Indizes e und a kennzeichnen Ein- und Ausgangsspannungen, H und L High- und Low-Zustände.  $U_{aL,max}$  und  $U_{aH,min}$  sind die vom Hersteller garantierten Spannungswerte für die Low- und High-Zustände.

Für die störreichere Auslegung einer elektronischen Schaltung sind die statischen Mindeststörabstände oder auch *Worst-case*-Störabstände für den Low- und High-Zustand heranzuziehen. Diese können aus den vom Schaltkreishersteller *garantierten* Werten  $U_{aL,max}$  und  $U_{aH,min}$  für die Low- und High-Zustände ermittelt werden, Bild 1.6.

Low-Zustand:	$U_{StL} =  U_{eL,max} - U_{aL,max} $
High-Zustand:	$U_{StH} =  U_{eH,min} - U_{aH,min} $

Die Spannungen  $U_{eL,max}$  und  $U_{eH,min}$  sind die für eine eindeutige Erkennung des Low- bzw. High-Zustandes erlaubten Spannungswerte.

In vielen Schaltkreisdatenblättern sind *typische* statische Störabstände angegeben. Diese erheblich günstigeren Werte basieren auf reduzierten Betriebsbedingungen wie beispielsweise einem eingeschränkten Temperaturbereich und sollten deshalb für EMV-Betrachtungen nicht herangezogen werden.

In Tabelle 1.1 sind Beispiele statischer Worst-case-Störabstände für verschiedene TTL- und CMOS-Schaltkreise dargestellt [B1, B3, 11.9].

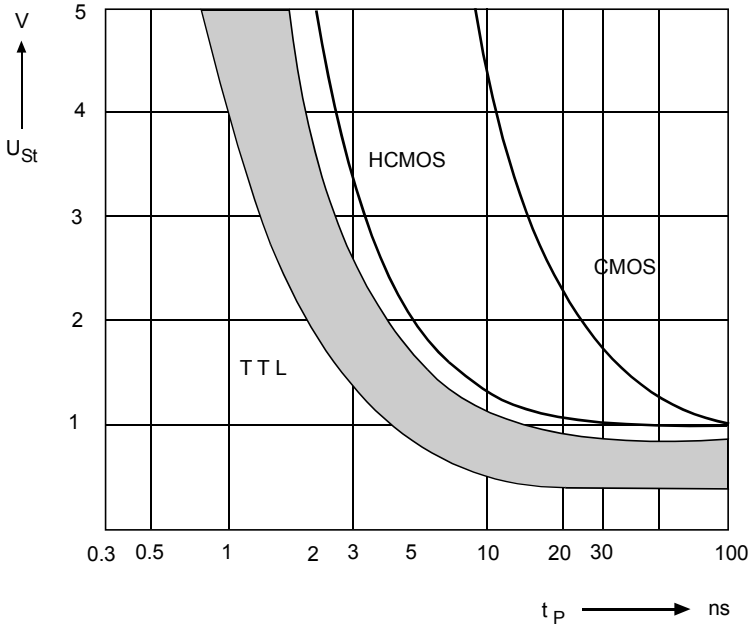
**Tabelle 1.1:** Statische *Worst-case*-Störabstände verschiedener Logikfamilien.

Familie	Typ	Betriebsspannung [V]	$U_{StL}$ [V]	$U_{StH}$ [V]
<i>TTL</i>	LS (Low-Power-Schottky)	5	0,3	0,7
	ALS (Advanced-LS)			
	AS (Advanced-Schottky)			
	F (Fairchild-AS, Fast)			
<i>CMOS</i>	HC (High-Speed-CMOS)	2	0,2	0,4
		4,5	0,8	1,25
		6	1,1	1,7
	AC (Advanced-CMOS)	3	0,8	
		4,5	1,25	
		5,5	1,55	
<i>CMOS-TTL</i>	HCT (High-Speed-CMOS-TTL)	5	0,7	2,4
	ACT (Advanced-CMOS-TTL)			

Da reale integrierte Schaltkreise nicht sofort auf ein am Eingang anliegendes Nutz- bzw. Störsignal reagieren, sind mit abnehmender Störimpulsdauer höhere Störspannungsamplituden tolerierbar.

Dieses Störsignalverhalten wird durch den *dynamischen Störabstand* beschrieben, Bild 1.7 [11.10, 11.11, 11.12]. Es ist allerdings zu beachten, dass bei sehr kurzen Impulsen hoher Amplitude der Schaltkreis dielektrisch und/oder thermisch zerstört werden kann.

Ein weiteres wichtiges Kriterium, das bei der EMV gerechten Auswahl von Logikbauelementen beachtet werden muss, sind die *Anstiegs-* bzw. *Abfallzeiten* der erzeugten Logiksignale. Je steiler die Signalfanken sind, desto breiter wird das erzeugte Frequenzspektrum, Bild 1.7.



**Bild 1.7:** Abhängigkeit des Störabstands unterschiedlicher digitaler Schaltkreise von der Störimpulsdauer eines rechteckförmigen Störsignals.  $U_{St}$  ist der Störabstand und  $t_p$  die Störimpulsdauer.

Zusätzlich bewirken hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten bzw. Taktfrequenzen eine Verschiebung des kompletten Störspektrums zu höheren Frequenzen (s. a. Abschn. I 1.6). Die Konsequenz ist eine deutliche Verschärfung der Beeinflussungsproblematik, da kapazitive und induktive Koppelwege grundsätzlich ein frequenzproportionales Übertragungsverhalten zeigen.

Für die störsichere Auslegung einer elektronischen Baugruppe sollten daher Schalt- bzw. Verarbeitungsgeschwindigkeiten nicht höher gewählt werden, als zur Lösung der Schaltungsaufgabe unbedingt erforderlich.

Es ist dabei zu berücksichtigen, dass die Werte für verschiedene Bauelementfunktionen der gleichen Technologie sehr unterschiedlich sein können.

Tabelle 1.2 stellt Anstiegs- und Abfallzeiten sowie Signalverzögerungszeiten verschiedener Schaltkreistypen dar.