

2956 - 7511

Arnold Rodewald

# **Elektromagnetische Verträglichkeit**

**Grundlagen – Praxis**

Mit 267 Abbildungen



# Inhaltsverzeichnis

## Teil 1: Grundlagen

<b>1 Einführung</b> .....	1
1.1 Ursachen elektromagnetischer Beeinflussungen .....	2
1.2 Die Auswirkung elektromagnetischer Beeinflussungen .....	2
1.3 Unbeabsichtigte Wirkungen elektrischer Felder von Spannungen .....	3
1.4 Die unbeabsichtigte Wirkung magnetischer Felder von Strömen .....	5
1.5 Die Störung von Bildschirmen durch die Magnetfelder niederfrequenter Ströme ..	8
1.6 Beeinflussung durch den unbeabsichtigten Empfang eines Senders .....	9
1.7 Literatur .....	10
<b>2 Die allgemeine Struktur elektromagnetischer Beeinflussungen</b> .....	11
2.1 Die fünf einfachen Kopplungen .....	12
2.2 Zusammengesetzte Kopplungen .....	14
2.3 Die Beeinflussungswege .....	15
2.3.1 Die allgemeine Struktur der Beeinflussungswege .....	16
2.3.2 Felder, die von Leitungen ausgehen .....	17
2.3.3 Abschwächung leitungsgebundener Störungen ( $\lambda_{stör} > a$ ) .....	19
2.3.4 Abschwächung leitungsgebundener Beeinflussungen über Datenleitungen .....	19
2.3.5 Abschwächung von äußeren Feldern .....	20
2.4 Störfestigkeit .....	20
2.5 Störaussendung .....	22
2.5.1 Das Frequenzspektrum einer Folge von rechteckigen Impulsen .....	22
2.5.2 Das Frequenzspektrum von Impulsfolgen mit endlicher Flankensteilheit .....	26
2.6 Die Rolle der Normen bei der Sicherung der EMV .....	28
2.6.1 Die Normenorganisation .....	28
2.6.2 Die zivilen Normentypen .....	29
2.6.3 Die zivilen Gerätenormen .....	30
2.7 Ein kurzer Blick in die Theorie der Elektrotechnik .....	33
2.7.1 Spannungen und Potentialdifferenzen .....	33
2.7.2 Die Geometrie der elektrischen Spannung .....	36
2.7.3 Die quasistationäre Modellbildung .....	40
2.7.4 Generator- und Verbraucherspannungen .....	44
2.7.5 Theorie - Überblick .....	45

2.7.6	Vom Schaltschema über eine Raumskizze zum Ersatzschaltbild .....	45
2.8	Literatur .....	47
<b>3</b>	<b>Kopplungen durch quasistationäre Magnetfelder von Strömen .....</b>	<b>49</b>
3.1	Das Übertragungsverhalten induktiver Kopplungen.....	49
3.1.1	Der Frequenzgang .....	50
3.1.2	Das Impulsverhalten einer induktiven Kopplung .....	52
3.2	Leiterschleifen, die von der Strombahn getrennt sind.....	54
3.3	Leiterschleifen, die an der störenden Strombahn anliegen.....	57
3.4	Abschirmen gegen magnetische Felder .....	62
3.4.1	Der Frequenzgang einer Abschirmung durch eine Kurzschlußmasche .....	64
3.4.2	Das Impulsverhalten der Gegenfeldabschirmung.....	68
3.4.3	Ein Demonstrationsversuch zur Gegenfeldabschirmung mit einer Kurzschlußmasche .....	69
3.4.4	Mögliche Nebenwirkungen von $i_2$ .....	71
3.4.5	Abschirmung gegen Wandströme.....	72
3.4.6	Verringerung von $i_2$ im Hinblick auf möglichst kleine Nebenwirkungen.	75
3.4.7	Typische Fehler bei der Abschirmung mit Kurzschlußmassen .....	77
3.4.8	Abschwächung schnell veränderlicher Magnetfelder durch metallische Gehäuse .....	78
3.4.9	Abschirmen gegen statische und niederfrequente Magnetfelder .....	82
3.5	Literatur .....	85
<b>4</b>	<b>Die quasistationäre kapazitive Kopplung.....</b>	<b>87</b>
4.1	Der Frequenzgang einer kapazitiven Kopplung.....	89
4.2	Praktische Schlußfolgerungen aus dem Frequenzgang .....	91
4.3	Das Impulsverhalten der kapazitiven Kopplung .....	93
4.4	Abschirmung gegen ein quasistationäres elektrisches Feld .....	95
4.5	Demonstrationsversuch zur Abschirmung eines quasistationären E-Feldes .....	98
4.6	Der Frequenzgang der Feldschwächung durch ein Abschirmgehäuse in einem elektrischen Feld .....	99
4.6.1	Metallische Gehäuse in statischen elektrischen Feldern (Faraday'sche Käfige) in Luft .....	99
4.6.2	Metallisches Gehäuse in zeitlich veränderlichen elektrischen Feldern .....	101
4.6.3	Messergebnisse an metallischen Gehäusen in einem elektrischen Feld.....	103
4.6.4	Gehäuse mit hochohmigen Wänden in elektrischen Feldern .....	104
4.7	Kapazitive Kopplung im Inneren von Abschirmgehäusen.....	106
4.8	Reduktion durch Symmetrieren .....	107
4.9	EMV-Regeln im Hinblick auf quasistationäre kapazitive Kopplungen .....	108
4.10	Literatur .....	109

<b>5 Die ohmsche Kopplung</b> .....	111
5.1 Ohmsche Kopplung durch gemeinsame Drähte bei Gleichstrom.....	111
5.2 Ohmsche Kopplung an Drähten bei zeitlich veränderlichem Strom .....	112
5.3 Ohmsche Kopplung an korrodierten Verbindungen (rusty bolt).....	114
5.4 Kopplungen durch ohmsche Strömungsfelder im Erdreich .....	115
5.5 Mathematische Beschreibung eines Flächenerders.....	118
5.6 Abschirmung gegen elektrische Strömungsfelder im Erdreich .....	119
5.7 Die Grenze zwischen ohmschem Widerstand und Wellenwiderstand .....	119
5.8 Literatur .....	121
<b>6 Kabelmantelkopplung</b> .....	123
<b>7 Kopplungen zwischen parallelen Leitungen</b> .....	129
7.1 Kopplung zwischen parallelen Leitungsstücken im quasistationären Frequenzbereich .....	132
7.2 Analytische Berechnung der Impulskopplung .....	136
7.3 Impulskopplungen in Flachkabeln .....	141
7.4 Kopplungen in nicht homogenen Medien .....	144
7.5 Die kritische Anordnung in digitalen Schaltungen .....	146
7.6 Impulskopplungen bei beliebigen Leitungsabschlüssen .....	146
7.7 Literatur .....	148
<b>8 Störende unbeabsichtigte Impulse</b> .....	149
8.1 Störende Schaltvorgänge in elektrischen Energieversorgungen .....	149
8.1.1 Mathematische Analyse einer einfachen Nahzone mit idealem Schalter .....	152
8.1.2 Praktische Beispiele von Ausgleichsvorgängen in der Nähe von Schaltern.....	158
8.1.3 Rückzündungen an öffnenden Schaltern .....	162
8.2 Entladung elektrostatischer Aufladungen .....	167
8.2.1 Die Entladung elektrostatisch aufgeladener Personen .....	169
8.3 Gewitterentladungen (Blitze).....	172
8.4 Literatur .....	174
<b>9 Unabsichtliche Hochfrequenzeffekte</b> .....	177
9.1 Leitungen und Leitungsschirme als unabsichtliche Antennen .....	177
9.2 Unabsichtliche Hohlraumresonanzen .....	179
9.3 Literatur .....	180

## Teil 2: Schwerpunkte der EMV-Praxis in der Geräte- und Messtechnik

<b>10 Zwei Verfahren zur Entdeckung von Signalbeeinflussungen in der Messtechnik</b> .....	182
10.1 Die Kurzschlussprüfung .....	182
10.2 Die Ferritkernprüfung .....	183
<b>11 EMV-Probleme bei Messungen mit Spannungssonden (engl.: probes)</b> .....	185
11.1 Beispiel für den Störeffekt 1 .....	187
11.2 Beispiel für den Störeffekt 3 .....	188
11.3 Beispiel für den Störeffekt 2 .....	189
<b>12 EMV-gerechte Masse- und Bezugsleiterstrukturen</b> .....	191
12.1 Schaltungstechniken zur Trennung der Strombahnen in einer Masse bei tiefen Frequenzen .....	193
12.2 Leiterformen und Massestrukturen für die Stromrückführungen in digitalen Schaltungen .....	196
12.2.1 Rückführung von Impulsströmen über Gitter mit gekreuzten Leitern für Masse und Energieversorgung in zweilagigen Leiterplatten .....	197
12.2.2 Rückführung der Impulsströme über Gitter mit parallelen Leiterkämmen in zweilagigen Leiterplatten .....	198
12.2.3 Rückführung von Impulsströmen in einlagigen Leiterplatten .....	199
12.3 Stromrückführung in Geräten mit analogen Signaleingängen und digitaler Signalverarbeitung .....	200
12.4 Erdschleifen .....	202
12.4.1 Die Entstehung von Erdschleifen .....	203
12.4.2 Abschwächung von hochfrequenten Erdschleifen-Beeinflussungen durch Ferritkerne .....	205
12.4.3 Auftrennung eines Erdschleifenzweiges durch den Innenwiderstand von Differenz- oder Instrumenten-Verstärkern .....	208
12.5 Vermeidung von Erdschleifen durch getrennte Energieversorgung .....	210
12.6 Vermeidung von Erdschleifen durch galvanisch unterbrochene Signalübertragung .....	210
12.7 Literatur .....	212
<b>13 Abschirmpraxis</b> .....	213
13.1 Einseitiger oder beidseitiger Masseanschluss von Kabelschirmen? .....	214
13.1.1 Abschirmung mit Kabelschirmen gegen elektrische Felder .....	214
13.1.2 Abschirmung mit Kabelschirmen gegen schnell veränderliche Magnetfelder .....	215

13.1.3 Abschirmung von Signalkabeln gegen niederfrequente Magnetfelder .....	216
13.1.4 Anschluss von Kabelschirmen in Schaltungen mit Instrumentenverstärkern .....	216
13.1.5 Brumm in Audiosystemen durch beidseitige Masseanschlüsse von Kabelschirmen.....	218
13.2 EMV-gerechte Abschlüsse geschirmter Kabel .....	219
13.2.1 EMV-gerechte Steckverbindungen.....	219
13.2.2 EMV-gerechte Einführung von geschirmten Kabeln in Abschirmgehäuse .....	221
13.3 Was kann man mit Verdrillen erreichen und was nicht?.....	222
13.4 Abschirmgehäuse.....	224
13.4.1 Gehäuse gegen elektrische Felder .....	224
13.4.2 Gehäuse gegen niederfrequente Magnetfelder .....	224
13.4.3 Gehäuse gegen Magnetfelder im Frequenzbereich 1 kHz bis 10 MHz .....	226
13.4.4 Gehäuse gegen elektromagnetische Strahlungsfelder im Bereich > 10 MHz.....	228
13.5 Literatur zu Kapitel 13.....	230
<b>14 Filtereinsatz.....</b>	<b>231</b>
14.1 Zusammenwirken von Funkentstörungs- und Störschutzfiltern mit ihrer elektrischen Umgebung .....	231
14.2 Filter in den Netzanschlüssen .....	233
14.3 Der Einbau von Filtern .....	236
14.4 Filter in Signalleitungen.....	236
14.5 Filter in der Gleichspannungsversorgung .....	237
<b>15 Stützkondensatoren in digitalen Schaltungen.....</b>	<b>239</b>
<b>16 Schutz von Netzzuführungen und Signalleitungen mit Überspannungsableitern...</b>	<b>243</b>
16.1 Schutz von Netzzuführungen.....	243
16.2 Schutz von Signal- und Datenleitungen durch Überspannungsableiter .....	247
16.3 Der Einfluss der Anschlüsse auf die Schutzwirkung von Ableitern.....	250
16.4 Überlastungsschutz von Überspannungsableitern.....	251
16.5 Der räumliche Schutzbereich von Überspannungsableitern .....	253
16.6 Literatur .....	255
<b>17 Komponentenauswahl und Schaltungstechniken im Hinblick auf niedrige Störaussendung.....</b>	<b>257</b>
17.1 Literatur .....	258

---

<b>18 Strategien zur Sicherung der EMV</b> .....	259
18.1 Spezifische EMV-Planung.....	260
18.2 Experimentelle Überprüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit.....	261
18.3 Literatur .....	261
Anhang 1 .....	263
Literatur Anhang 1.....	268
Anhang 2 .....	269
Anhang 3 .....	272
Literatur Anhang 3.....	275
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	277