

Joachim Franz

# EMV

Störungssicherer Aufbau elektronischer Schaltungen

4., erweiterte und überarbeitete Auflage

Mit 240 Abbildungen und 16 Fallbeispielen

STUDIUM



VIEWEG+  
TEUBNER

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>V</b>
<b>Vorwort zur vierten Auflage</b>	<b>VII</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Schreibweisen und Hinweise</b>	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundbegriffe und Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1 Das Modell der Störbeeinflussung . . . . .	7
2.2 Spannungs- und Stromübertragung . . . . .	8
2.3 Der Störabstand als Gütekriterium. . . . .	9
2.4 Quellen und Empfänger für die Stromübertragung. . . . .	11
2.4.1 Stromquelle mit einem Operationsverstärker. . . . .	11
2.4.2 Stromquelle mit einem Transistor. . . . .	12
2.4.3 Stromquelle mit Operationsverstärker und Transistor . . . . .	14
2.4.4 Auswahl einer geeigneten Stromquelle. . . . .	15
2.4.5 Stromempfänger. . . . .	16
2.5 Unsymmetrische und symmetrische Übertragung . . . . .	17
2.6 Teilkapazität und Betriebskapazität . . . . .	20
2.7 Selbstinduktivität und Gegeninduktivität . . . . .	23
2.8 EMV-Ersatzschaltbilder von Bauelementen. . . . .	28
2.8.1 Das Ersatzschaltbild von Leitungen . . . . .	28
2.8.2 Das Ersatzschaltbild von Widerständen. . . . .	30
2.8.3 Das Ersatzschaltbild von Kondensatoren. . . . .	31
2.8.4 Das Ersatzschaltbild von Spulen. . . . .	34

2.8.5	Das Ersatzschaltbild von Transistoren . . . . .	37
2.8.6	Transformatoren und EMV. . . . .	39
<b>3</b>	<b>Kopplungsmechanismen</b>	<b>43</b>
3.1	Kapazitive Kopplung . . . . .	43
3.1.1	Kapazitive Kopplung in unsymmetrische Signalkreise . . . . .	43
3.1.2	Amplitudengang der eingekoppelten Störung . . . . .	45
3.1.3	Kapazitive Kopplung in symmetrische Signalkreise. . . . .	47
3.2	Induktive Kopplung . . . . .	48
3.2.1	Induktive Kopplung in Signalkreise. . . . .	48
3.2.2	Induktive Kopplung von Gleichtaktstörungen in symmetrische Signalkreise. . . . .	51
3.2.3	Dämpfung magnetischer Felder durch Kurzschlussringe . . . . .	52
3.3	Impedanzkopplung . . . . .	55
3.3.1	Impedanzkopplung in unsymmetrische Signalkreise. . . . .	56
3.3.2	Impedanzkopplung in symmetrische Signalkreise. . . . .	58
3.4	Kopplung durch elektromagnetische Felder. . . . .	58
3.5	Zusammenfassung. . . . .	59
<b>4</b>	<b>Verfahren</b>	<b>61</b>
4.1	Die Stromanalyse. . . . .	61
4.2	Das Verfahren der Verschiebung der Knotenpunkte. . . . .	63
4.3	Beispiele zur Stromanalyse und Verschiebung der Knotenpunkte . . . . .	65
4.4	Die Stromumschaltanalyse. . . . .	67
<b>5</b>	<b>Abblockung elektronischer Schaltungen</b>	<b>71</b>
5.1	Das Wechselstrom-Ersatzschaltbild für die Abblockung . . . . .	71
5.2	Ströme auf dem Masse- und Versorgungssystem. . . . .	77
5.3	Gruppenabblockung und Einzelabblockung . . . . .	82
5.4	Auswahl geeigneter Abblockkondensatoren. . . . .	84
5.5	Parallelschaltung von Abblockkondensatoren. . . . .	85
5.6	Anschluss von Kondensatoren. . . . .	89

5.7	Logik-Fehler und Strahlung bei digitalen ICs durch Ground Bounce. . . . .	94
5.8	Beispiele für das Layout des Versorgungsspannungssystems . . .	96
5.9	Abblockung auf Zweilagenerleiterplatten - Zusammenfassung . . .	101
5.10	Abblockung auf Multilayern. . . . .	102
5.10.1	Die Impedanz des Abblocksystems. . . . .	103
5.10.2	Ein einfaches Modell des Leiterplattenkondensators . . . . .	107
5.10.3	Stehende Wellen auf dem Masse-/Versorgungssystem . . . . .	108
5.10.4	Berechnung des Abschlusswiderstandes einer rechteckigen Leiterplatte. . . . .	115
5.10.5	Abblockmaßnahmen. . . . .	118
5.10.6	Abblockung auf Multilayern - Zusammenfassung . . . . .	132
5.11	Simulation des Versorgungssystems mit SPICE. . . . .	134
5.11.1	Dimensionierung der Elemente des Simulationsmodells . . . . .	135
5.11.1.2	Erstellen des Simulationsmodells der Testleiterplatte . . . . .	137
5.11.3	Vergleich von Simulations-und Messwerten. . . . .	140
<b>6</b>	<b>Masse- und Signalstrukturen</b>	<b>143</b>
6.1	Reihenmassestructur. . . . .	143
6.2	Masseschleifen. . . . .	146
6.3	Entkopplungsmethoden. . . . .	148
6.3.1	Vermaschung. . . . .	149
6.3.2	Stemstruktur. . . . .	150
6.3.3	Galvanische Trennung. . . . .	153
6.3.4	Differenzbildung. . . . .	154
6.3.5	Stromkompensierte Drossel (Gleichtaktdrossel). . . . .	156
6.3.6	Schutzleiterdrossel. . . . .	159
6.3.7	Getrenntes Potentialbezugssystem. . . . .	160
6.3.8	Symmetrische Struktur. . . . .	161
6.3.9	Stromübertragung. . . . .	164
6.3.10	Filter. . . . .	165
6.3.11	Weitere Entkopplungsmethoden durch Änderung der Signalgröße. . . . .	165

<b>7</b>	<b>Planung der EMV von Baugruppen, Geräten und Anlagen</b>	<b>167</b>
7.1	EMV-Zonen . . . . .	168
7.1.1	Einrichten von EMV-Zonen in elektronischen Schaltungen . . . . .	169
7.1.2	Ein leitfähiges Gerätegehäuse als EMV-Zonengrenze . . . . .	171
7.1.3	Konstruktive Voraussetzungen für EMV-Filter. . . . .	172
7.2	Massestruktur von Baugruppen . . . . .	173
7.2.1	Verkopplung einer Baugruppe mit der Umgebung . . . . .	174
7.2.2	Entkopplung durch Sternstruktur. . . . .	176
7.2.3	Verkopplung durch kapazitiven Rückschluss. . . . .	177
7.2.4	Entkopplung zwischen Baugruppe und Umgebung durch eine weitere Masseschleife. . . . .	178
7.2.5	Maßnahmen bei ungünstiger Platzierung der Anschlüsse . . . . .	179
7.2.6	Entwicklungsbegleitendes Testverfahren zur Prüfung des Massesystems. . . . .	180
7.3	Strahlungskopplung bei ungünstiger Massestruktur. . . . .	181.
7.3.1	Teilmassen und Kabel als Antennenstrukturen. . . . .	182
7.3.2	Strahlung von ICs durch Ground-Bounce. . . . .	186
7.3.3	Strahlung von Schlitzantennen. . . . .	190
7.4	Massestrukturen von Geräten. . . . .	193
7.5	Masseschleifen und Kopplungen in einer Anlage. . . . .	200
7.6	Verbindung von Baugruppen. . . . .	202
7.6.1	Transferadmittanz und Transferimpedanz . . . . .	202
7.6.2	Ein- oder beidseitiger Anschluss von Kabelschirmen . . . . .	205
7.6.3	Anschluss von Kabeln. . . . .	207
7.7	Zonen mit definiertem Massebezugspotential. . . . .	211
7.8	Strukturierung der Masse digitaler Schaltungen. . . . .	212
7.9	Zusammenfassung . . . . .	214

<b>8</b>	<b>Fallbeispiele</b>	<b>217</b>
8.1	Das klassische Spannungsteiler-Problem . . . . .	217
8.2	Stereoverstärker. . . . .	220
8.3	Beispiele für Stromübertragung . . . . .	224
8.4	Ein strahlendes Kabel. . . . .	227
8.5	Messfehler bei elektronischen Messgeräten durch Masseströme. . . . .	228
8.6	Signalstruktur höchstempfindlicher analoger Messschaltungen . . . . .	229
8.7	Störungen an einem Personal Computer. . . . .	230
8.8	Ungünstige Massestruktur einer zugekauften Baugruppe . . . . .	231
8.9	Brummstörungen an einer Telefonanlage. . . . .	234
8.10	Verbindung von Analog-und Digitalmasse. . . . .	236
8.11	Strukturierung einer Digitalschaltung mit einem schnellen Schaltungskern. . . . .	237
8.12	Planung an einem Baugruppenträger. . . . .	239
8.13	EMV-gerechte konstruktive Gerätegestaltung. . . . .	242
8.14	Strahlung einer Baugruppe mit LCD-Display. . . . .	243
8.15	Analyse von Schaltnetzteilen . . . . .	244
8.15.1	Analyse eines Aufwärtswandlers. . . . .	247
8.15.2	Analyse eines Abwärtswandlers. . . . .	249
8.15.3	Analyse eines Flyback Reglers. . . . .	250
8.16	Entstörung von IGBT-Umrichtern. . . . .	252
8.16.1	Problemstellung . . . . .	252
8.16.2	Analyse der Störungen. . . . .	253
8.16.3	Lösungsansätze. . . . .	254
8.16.4	Die Kommutierung und die kritische Masche. . . . .	259
8.16.5	Integration von Umrichter-Leistungsteil und Motor. . . . .	262
8.17	Zusammenfassung. . . . .	263
<b>9</b>	<b>Abschließende Betrachtungen</b>	<b>265</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>269</b>
	<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>273</b>