

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Signalintegrität	11
1.1 Historischer Abriss	11
1.2 Signalintegrität auf Chip-Ebene	12
1.3 Signalintegrität auf Leiterplattenebene	13
1.4 Modell – Simulation – Verifikation durch Messung	15
2 OHMSche, kapazitive und induktive Eigenschaften geätzter Leiterzüge auf Leiterplatten	17
2.1 OHMSche Eigenschaften	17
2.1.1 Elektrische Leiter und Widerstände	17
2.1.2 Skineffekt und Proximity-Effekt	20
2.2 Kapazität geätzter Leiterzüge	27
2.2.1 Verluste in Dielektrika	30
2.2.2 Leiterplatten mit Vielfachleitungen und Massefläche, Kapazitätsmatrix	32
2.3 Induktivität geätzter Leiterzüge	34
2.3.1 Innere, äußere und partielle Induktivitäten	35
2.3.2 Verhalten von Induktivitäten in Stromkreisen	36
2.3.3 Induktivität spezieller Leiteranordnungen	38
3 Übertragungsleitungen	41
3.1 Herleitung der Telegraphengleichung	43
3.2 Lösung der Telegraphengleichung	47
3.3 Bestimmung der Integrationskonstanten	48
3.4 Spannungs- und Stromverlauf entlang der Leitung	50
3.5 Diskussion spezieller Fälle	52
3.5.1 Wellenwiderstand der verlustlosen Leitung	52
3.5.2 Anpassung	52
3.5.3 Eingangsimpedanz einer Leitung bei beliebigem Abschluss	52
3.5.4 Verlustfreie $\lambda/2$ -Leitung	53
3.5.5 Verlustfreie $\lambda/4$ -Leitung	54
3.5.6 Elektrisch kurze Leitung	54
3.6 Reflexionsfaktor und Stehwellenverhältnis	55

3.7	Darstellung von Übertragungsleitungen in PSPICE	56
3.8	TEM- und Quasi-TEM-Wellenleiter	59
4	Grundlagen der digitalen Datenübertragung	63
4.1	Lösung der Wellengleichung für nicht-harmonische Vorgänge	63
4.2	Reflexion und Brechung von Pulsen an Stoßstellen und Widerständen	66
4.3	Reflexion von Spannungssprüngen an RLC-Schaltungen	72
4.4	Mehrfachreflexionen	79
4.5	Modellierung von Übertragungsleitungen	82
4.5.1	Kritische Länge	82
4.5.2	Konzentriertes Leitungselement – verteilte Elemente	85
4.6	Hilfsmittel zur Veranschaulichung von Mehrfachreflexionen auf Leitungen	86
4.6.1	Das Reflexionsdiagramm	87
4.6.2	Das BERGERON-Verfahren	94
5	Gekoppelte Leitungen	97
5.1	Übersprechen (Crosscoupling) zwischen Leitungen	97
5.2	Moden auf symmetrischen Doppelleitungen	109
5.3	Charakteristische Impedanzmatrizen	112
6	Numerische Berechnung von Leitungsparametern	115
6.1	Werkzeuge zur Analyse und Synthese von Leitungseigenschaften	116
6.2	Numerische Berechnung von Leitungsparametern durch elektromagnetische Feldsimulation	118
6.2.1	2D-Feldlöser zur Berechnung von Parametern von Übertragungsleitungen	118
6.2.1.1	Numerische Berechnung der Impedanzen einer einzelnen Streifenleitung	118
6.2.1.2	Berechnung gekoppelter Streifenleitungen unter Berücksichtigung von Symmetrien	120
6.2.2	3D-Feldlöser	123
6.2.2.1	Zur Methode der Finiten Integration	122
6.2.2.2	Fehlerquellen und Quellen von Ungenauigkeiten	124
6.2.3	Ausgewählte Simulationsbeispiele	125
6.2.3.1	Mikrostreifenleitung mit 2 Störstellen	125
6.2.3.2	Symmetrische gekoppelte Doppelleitung	127
7	Strukturelemente für das Layout von Leiterplatten	133
7.1	Durchkontaktierungen (Vias)	133
7.2	Biegungen und Knickstellen in Leiterzügen	136
7.3	Stufen in der Leiterbahnbreite	139
7.4	Übergänge zwischen planaren Leiterzügen und koaxialen Steckverbindern	139

8	Messtechnik und Signalintegrität: Verifikation von Modellen und Simulationsergebnissen durch Messungen	143
8.1	Streuparameter	144
8.1.1	Nodale Streuparameter	144
8.1.2	Modale Streuparameter	147
8.2	Messungen im Frequenzbereich: Vektorielle Netzwerkanalyse	149
8.2.1	Grundsätzlicher Aufbau von Netzwerkanalysatoren	150
8.2.2	Transformation von Messergebnissen in den Zeitbereich	154
8.2.3	Kalibrierung und Messunsicherheiten	161
8.2.3.1	Fehlermodelle und Kalibrierung	162
8.2.3.2	Messunsicherheiten	168
8.2.4	Ergänzende Messbeispiele	170
8.3	Reflexions- und Transmissions-Messungen im Zeitbereich	173
8.3.1	Zeitbereichsreflektometrie (TDR)	173
8.3.2	Transmissionsmessungen im Zeitbereich (TDT)	177
8.4	Software-Werkzeuge für TDR- und TDT-Messplätze	178
9	Serielle Hochgeschwindigkeits-Datenübertragung und Signalintegrität	183
9.1	Einfluss der Leitungsverluste	186
9.2	Augendiagramme	188
9.3	Jitter und Bitfehlerrate	192
10	Signalintegrität und Elektromagnetische Verträglichkeit	195
10.1	Eigenschaften digitaler Signale im Frequenzbereich	195
10.2	Zur Störemission von Strukturen auf Leiterplatten	197
10.3	EMV-gerechte Messung der Störemission	199
11	Verallgemeinerte Regeln zum SI-gerechten Entwurf	205
Anhang	209
	Verfahren zur Ermittlung von Messunsicherheiten	209
A.1	Allgemeines	209
A.2	Ansätze für die Eingangsdaten	210
A.3	Berechnung der Ausgangsdaten bei unkorrelierten, voneinander unabhängigen Eingangsgrößen	212
A.4	Berechnung der Ausgangsdaten bei korrelierten, voneinander abhängigen Eingangsgrößen	213
A.5	Tabellarische Übersicht	214
	Literaturverzeichnis	217
	Stichwortverzeichnis	223