

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abkürzungsverzeichnis	9
Kurzfassung	11
Abstract	13
1 Einleitung	15
1.1 Elektrische Analysen an planaren Schaltungen und Multi-Layer-Boards	15
1.2 Extraktion elektrischer Modelle von Leitungsstrukturen .	18
1.3 Modelle und Realität	20
1.4 Genauigkeit der Simulationsmodelle	22
2 Stand der Wissenschaft und Technik	27
2.1 Elektrische Analysen an passiven Leitungsstrukturen für Multi-Gigabit- und Hochfrequenzschaltungen	27
2.1.1 Planare Leitungsstrukturen für Multi-Layer-Boards	27
2.1.2 Messgrößen zur Beurteilung der elektrischen Eigenschaften von passiven Leitungsstrukturen .	29
2.1.3 Reflexionen auf Leitungen und Leitungsabschluss	31
2.1.4 S-Parameter	32
2.2 Bildgebende Verfahren zur Schaltungsanalyse	33
2.2.1 Röntgeninspektion	34

2.2.2	Röntgen-Computertomographie	38
2.3	Verfahren zur Bildsegmentierung und Extraktion von Oberflächenmodellen	44
2.3.1	Verfahren zur Bildsegmentierung	44
2.3.2	Verfahren zur Extraktion von Oberflächen	58
2.4	Elektromagnetische Feldberechnung	63
2.4.1	Übersicht zu numerischen Verfahren zur Lö- sung von Randwertproblemen	63
2.4.2	Mathematische Gleichungen zur Beschreibung elektromagnetischer Felder	68
2.5	Unsicherheit nach GUM	70
3	Extraktion elektr. Modelle basierend auf der Röntgen-Compu- tertographie	73
3.1	Die Modellierung	73
3.2	Planung und Durchführung der Modellierung	77
3.3	Erfassung der Schaltungsgeometrie	80
3.3.1	Erfassung der Schaltungsgeometrie mit der Röntgen- Computertomographie	80
3.3.2	Erfassung von Bereichen mit höherer Auflösung	83
3.3.3	Zusätzliche Messungen und Ableitung benö- tigter Größen	85
3.4	Verfahren zur Extraktion der Geometrie von Prüflingen	87
3.4.1	Direkte voxel-basierte Extraktion	87
3.4.2	Marching Cubes und 3D Oberflächenextraktion	90
3.4.3	Planare 2,5D Extraktion	94
3.4.4	Skelett-Erkennung	100
3.4.5	Modellierung mit Grundprimitiven	105
3.5	Material- und Verlustmodelle	112
3.5.1	Materialmodelle zur Modellierung dielektri- scher Größen	115
3.5.2	Materialmodelle zur Modellierung resistiver Größen	117
3.6	EM-Feldberechnung	118

4	Beiträge auf die Unsicherheit berechneter elektrischer Größen	123
4.1	Beiträge aufgrund der Röntgen-Computertomographie	124
4.1.1	Beiträge bezüglich der Röntgenröhre	124
4.1.2	Beiträge auf die Unsicherheit aufgrund des Detektors	126
4.1.3	Beiträge aufgrund des Drehtisches	127
4.1.4	Beiträge auf die Unsicherheit ausgehend von der Röntgenkabine	128
4.1.5	Beiträge auf die Unsicherheit aufgrund der Bildrekonstruktion	129
4.2	Beiträge aufgrund der Extraktion	130
4.2.1	Beiträge bezüglich der Bilddarstellung	130
4.2.2	Beiträge aufgrund von Bildfilter	134
4.2.3	Beiträge der Objektdetektion, Objekterzeugung und Darstellung	134
4.3	Beiträge aufgrund der EM-Feldberechnung	136
4.3.1	Ursachen aufgrund der mathematischen Modellierung	136
4.3.2	Ursachen aufgrund der numerischen Lösung und Diskretisierung	141
4.3.3	Beiträge aufgrund der konzeptionellen Modellierung	148
4.3.4	Weitere Beiträge aufgrund des Computerprogramms und Darstellung der Ergebnisse	151
5	Unsicherheit der Impedanz und S-Parameter von Streifenleitungen	153
5.1	Beschreibung der Untersuchung	153
5.2	Berechnungsmodelle zur Untersuchung der Unsicherheit	157
5.3	Testfälle für Monte-Carlo-Simulation	160
5.4	Verifikation der Berechnungsmodelle	161
5.5	Monte-Carlo-Simulationen zur Analyse der Unsicherheit der Impedanz	166
5.5.1	Unabhängigkeit der Eingangsparameter	166
5.5.2	Berücksichtigung von Abhängigkeiten in Eingangsparameter	171

5.6	Monte-Carlo-Simulationen zur Analyse der Unsicherheit auf S-Parameter	173
6	Modelle zur Abschätzung der Unsicherheit	179
6.1	Kombinierte Standard Unsicherheit	180
6.1.1	Kombinierte Standard Unsicherheit der Impedanz einer Streifenleitung	180
6.1.2	Kombinierte Standard Unsicherheit der S-Parameter einer Streifenleitung	181
6.2	Abschätzung der erforderlichen CT-Voxelauflösung . . .	182
6.2.1	Abschätzung unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Impedanz	183
6.2.2	Abschätzung unter Berücksichtigung der Unsicherheit der S-Parameter	185
6.3	Quantitative Untersuchung der erforderlichen CT-Voxelauflösung	187
6.3.1	Die Sensitivitätskoeffizienten	187
6.3.2	Benötigte CT-Voxelauflösung zur Extraktion von Streifenleitungsmodellen	191
6.3.3	Benötigte CT-Voxelauflösung zur Extraktion von Streifenleitungsmodellen mit 2,5D Extraktion	192
6.3.4	Unsicherheit der S-Parameter von extrahierten Streifenleitungsmodellen	194
7	Ausblick und Zusammenfassung	197
7.1	Automatisierung der Extraktion von CT-CAD-Modellen und Fehlerkorrektur	197
7.2	Abschätzung der Unsicherheit von komplexen passiven Schaltungen	199
7.3	Zusammenfassung	200
A	Grenzfrequenzen für Verluste	205
B	Filtermasken	207

C	Elektrische Messverfahren	211
C.1	Zeitbereichsreflektometrie	211
C.2	Vektornetzwerkanalyse	213
C.3	Messunsicherheiten in der Vektornetzwerkanalyse	215
C.4	Messwertkorrektur in der Vektornetzwerkanalyse	216
C.5	Anschluss von Prüflingen und Messwertkorrektur	220
C.5.1	Gating	222
C.5.2	De-Embedding	223
D	Messverfahren zur Bestimmung der Permittivitätszahl	227
D.1	Messung der Permittivitätszahl	227
D.2	Schichtdicke	230
	Literaturverzeichnis	233