

Inhaltsverzeichnis

1 Einige Komponenten der Hochfrequenz-Messtechnik	1
1.1 Wichtige Matrixbeschreibungen von Vierpolen	1
1.1.1 Die Streumatrix $[S]$	1
1.1.2 Die Transmissionsmatrix $[\Sigma]$	3
1.1.3 Die Kettenmatrix oder $ABCD$ -Matrix	5
1.1.4 Die Kettenmatrizen von häufig auftretenden Ersatzschaltungen	6
1.2 Einstellbare Dämpfungsglieder	8
1.2.1 Ein Hohlleiter-Dämpfungsglied	9
1.3 Reflektometerschaltungen	11
1.3.1 Leitungskoppler	11
1.3.2 Ein resistiver Koppler	20
1.3.3 Ein Transformatorkoppler	22
1.3.4 Ein Null-Grad-Koppler mit $\lambda/4$ -Leitungen	22
1.4 Phasenschieber	24
1.5 Breitbanddetektoren	26
1.6 Leistungsmessung	30
1.6.1 Leistungsmessung mit Thermoelementen	30
1.6.2 Thermistormessbrücke	34
1.6.3 Leistungsmessung mit Schottky-Dioden	35
1.7 Detektoren mit Feldeffekttransistoren	36
1.7.1 Statische Kennlinien und Kleinsignalverhalten	36
1.7.2 Gleichrichtung an der Drain-Source-Strecke	42
1.7.3 Gesteuerte Gleichrichtung	43
2 Skalare Vierpolmessungen	47
2.1 Messung skalarer Vierpolparameter	47
2.1.1 Transmissions- und Reflexionsmessungen	48
2.1.2 Fehler bei Transmissionsmessungen	59
2.1.3 Fehler bei Reflexionsmessungen	65
2.1.4 Skalare Messungen mit Modulation	67
2.2 Messungen mit der Messleitung	68
2.3 Sechstormessungen	72
2.3.1 Leistungsmessungen mit der Sechstormethode	74

2.3.2 Reflexionsmessungen mit der Sechstormethode	75
2.4 Brückenmessungen.....	79

3 Mischer, Phasenregelkreise und Schrittgeneratoren83

3.1 Das Überlagerungs- oder Heterodynprinzip.....	83
3.2 Parametrische Rechnung	84
3.2.1 Abwärtsmischer mit Schottky-Dioden	87
3.3 Ausführungsformen von Mixchern	94
3.3.1 Der Ein-Dioden-Mischer	94
3.3.2 Der balancierte Mischer (2-Dioden-Mischer).....	96
3.3.3 Der doppelt balancierte Mischer (4-Dioden-Mischer).....	97
3.3.4 Mischer mit einem Feldeffekt-Transistor.....	99
3.3.5 Der Zwei-FET-Mischer	100
3.3.6 Analog-Multiplizierer	101
3.3.7 Der Oberwellen-Mischer	102
3.4 Grundlagen der Phasenregelkreise	103
3.5 Analoge und digitale Phasendiskriminatoren	111
3.5.1 Ein periodischer und symmetrischer digitaler Phasendiskriminator mit bereichsweise linearer Kennlinie.....	112
3.5.2 Ein digitaler Phasendiskriminator mit linearer und unsymmetrischer Kennlinie auf der Basis eines flankengetriggerten Flip-Flops.....	113
3.5.3 Ein periodischer und unsymmetrischer Phasendiskriminator mit bereichsweise linearer Kennlinie.....	115
3.6 Phasen-Frequenz-Diskriminatoren	118
3.6.1 Ein Phasen-Frequenz-Diskriminator auf der Basis von flanken- getriggerten Flip-Flops	118
3.6.2 Ein Phasen-Frequenz-Diskriminator auf der Basis von Logik-Gattern	120
3.7 Grundlagen der Schritt- und Synthesegeneratoren	124
3.7.1 Mitlaufende Wobbelsender.....	124
3.7.2 Schrittgeneratoren.....	126
3.8 Phasenregelkreise mit fraktionalen Teilern	132
3.8.1 Anwendung der Sigma-Delta-Modulation	133
3.8.2 Mehrfachintegration	135

4 Grundlagen der Systemfehlerkorrektur von Netzwerk- analysatoren141

4.1 Heterodyne Netzwerkanalysatoren.....	142
4.1.1 Aufbau des heterodynens Netzwerkanalysators	142
4.2 Erfassung der Systemfehler.....	144
4.2.1 Automatische Systemfehlerkorrektur bei Netzwerkanalysatoren.....	144

4.2.2 Kalibriermessungen und Systemfehlerkorrektur beim 5-Term-Verfahren	146
4.2.3 Reflektometer-Kalibrierung nach dem 3-Term-Verfahren.....	151
4.3 Systemfehlerkorrektur ohne Vertauschen der Tore des Messobjekts.....	152
4.3.1 10-Term-Verfahren für Netzwerkanalysatoren mit drei Messstellen .	152
4.3.2 Netzwerkanalysatoren mit vier Messstellen.....	154
4.3.3 Realisierung der Reflektometer ohne Richtkoppler	157
4.4 Kalibrierverfahren.....	158
4.4.1 Kalibrierung des Vier-Messstellen-Systems mit vollständig bekannten Standardzweitoren.....	158
4.4.2 Selbstkalibrierung mit teilweise unbekannten Zweitorstandards	159
4.4.3 Selbstkalibrierung mit teilweise unbekannten Zweitorstandards ohne Transmission.....	162
4.4.4 Darstellung des 10-Term-Verfahrens mit Transmissionsmatrix	167
4.4.5 Darstellung des 10-Term-Verfahrens mit Streumatrix.....	168
4.4.6 Darstellung des 5-Term-Verfahrens mit Streumatrix.....	170
4.4.7 Selbstkalibrierung über die Determinantenbedingung eines homogenen Gleichungssystems	171
4.4.8 Kalibrierverfahren ohne Durchverbindung	172
4.4.9 Korrekturrechnung nur mit Messwerten	173
4.5 Darstellung des Fehlermodells mit Kettenmatrizen.....	175
4.5.1 Impedanzmessverfahren	175
4.5.2 Das ZU- Verfahren und das YU-Verfahren	176
4.5.3 Die TZU-, TYU-, ZUU- und YUU-Verfahren.....	178
4.5.4 Impedanzverfahren bei Kenntnis des Realteils	179
4.5.5 Lxx- statt Txx-Verfahren	180
4.6 Das LNN-Verfahren: Kalibrierung mit einer Leitung und einem Störzweitor	180
4.6.1 Algebraische Beschreibung des LNN-Verfahrens	182
4.6.2 Das Doppel-LNN-Verfahren	185
4.7 Teilautomatische Kalibrierverfahren.....	186
4.8 Der Netzwerkanalysator als Impedanzkomparator.....	188
4.9 Messbett-Kalibrierverfahren	189
4.10 Kalibrierung verkoppelter Reflektometer.....	195
4.10.1 Das 15-Term-Verfahren.....	197
4.10.2 Selbstkalibrierung beim 15-Term-Verfahren	200
4.10.3 Messergebnisse mit dem TMRG-Verfahren	201
4.10.4 Das TMR-Verfahren für das Vollmodell	203
4.10.5 Das 22-Term-Verfahren.....	204

5 Homodyne Netzwerkanalysatoren.....207

5.1 Das Prinzip der homodynen Netzwerkanalyse	208
5.2 Einseitenband-Versetzer und Einseitenband-Empfänger	209
5.3 Einseitenband-Versetzung durch Phasenmodulation.....	214

5.4	Homodynverfahren mit Phasenschaltern – direktes Verfahren	218
5.4.1	Ein Homodynverfahren mit näherungsweise bekannten Etablier- faktoren – wichtiges Verfahren.....	221
5.4.2	Eine analoge Realisierung des wichtigen Verfahrens.....	222
5.5	Etablierung und Kalibrierung bei homodynen Netzwerkanalysatoren	225
5.6	Etablierung der komplexen Messfähigkeit beim Sechstor-Verfahren	227
5.7	Etablierung und Kalibrierung des Doppel-Sechstors	232
5.8	Etablierung des Kreuzwellenverhältnisses beim Doppel-Sechstor.....	235

6 Frequenzmessungen und Spektrumanalysatoren241

6.1	YIG-Filter und Resonatoren.....	241
6.2	Frequenzmessungen	245
6.2.1	Analoge Frequenzmessungen	245
6.2.2	Digitale Frequenzmessungen	246
6.2.3	Frequenzumsetzung an einem festen Kammspektrum	247
6.2.4	Frequenzumsetzung an einem durchstimmbaren Kammgenerator	249
6.2.5	Frequenzmessung mit YIG-Vorselektion des Messsignals	251
6.3	Spektrumanalysatoren	252
6.4	Anwendung des Heterodyn-Prinzips bei Spektrumanalysatoren	253
6.5	Störlinien durch Intermodulation	258
6.5.1	Intermodulationsprodukte 3.Ordnung.....	258
6.5.2	Filterbare Intermodulationsprodukte am ersten Mischer	260
6.5.3	Eigenschaften eines Spektrumanalysators.....	262
6.6	Ein Spektrumanalysator kombiniert mit Aufwärtsmischung	262
6.7	Frequenzerweiterung des Spektrumanalysators durch harmonische Mischung.....	265

7 Zeitbereichsmessungen269

7.1	Der Abtastoszillograph.....	269
7.1.1	Grundlagen der Abtastung	269
7.2	Technische Realisierung eines Abtastoszillographen.....	278
7.2.1	Das Abtastglied.....	278
7.2.2	Der Abtastverstärker	281
7.2.3	Abtaststeuerung	283
7.3	Impulsreflektometrie	284
7.4	Abtastung im Frequenzbereich.....	286
7.4.1	Die Diskrete Fouriertransformation	289
7.4.2	Berechnung der Impulsantwort und Messung von Laufzeiten	291
7.5	Ein Abtastverfahren im Frequenzbereich – Das FMCW-Verfahren.....	293
7.5.1	Das FMCW-Verfahren mit diskreter Frequenzvariation.....	294

7.5.2 Das FMCW-Verfahren mit kontinuierlicher Frequenzvariation	296
7.5.3 Spiegelimpulse.....	298
7.5.4 Entfernungsmessung mit dem virtuellen Entfernungsmesser	300

8 Rauschmessungen an Hochfrequenz-Schaltungen305

8.1 Thermisches Rauschen.....	306
8.1.1 Serien- und parallelgeschaltete Widerstände	307
8.1.2 Der RC-Kreis	308
8.1.3 Rauschen eines komplexen Widerstandes und die verfügbare Rauschleistung	309
8.1.4 Widerstandsnetze mit inhomogener Temperaturverteilung	311
8.1.5 Das Dissipationstheorem	312
8.2 Messung der äquivalenten Rauschtemperatur eines Zweipols.....	315
8.2.1 Grundschialtung.....	315
8.2.2 Schalt-Radiometer	317
8.2.3 Plancksches Strahlungsgesetz.....	323
8.3 Rauschen von Vierpolen	324
8.3.1 Transformation von Rauschsignalen über lineare Vierpole	324
8.3.2 Transformation des Leistungsspektrums.....	328
8.3.3 Korrelation zwischen Eingangs- und Ausgangsrauschen eines Vierpols.....	329
8.3.4 Überlagerung von teilweise korrelierten Rauschsignalen.	330
8.3.5 Messung der Korrelationsfunktion und des Kreuzspektrums.....	334
8.4 Korrelation bei thermisch rauschenden Vierpolen	336
8.4.1 Umrechnung verschiedener Rausch-Darstellungen.....	337
8.4.2 Thermisch rauschende Vierpole homogener Temperatur	339
8.4.3 Korrelationseigenschaften eines Vierpols homogener Temperatur, dargestellt durch Streumatrizen.....	341
8.4.4 Ein Korrelationsradiometer	345
8.5 Die Rauschzahl linearer Vierpole.....	348
8.5.1 Gewinndefinitionen	349
8.5.2 Berechnung der Rauschzahl aus Ersatzschaltungen.....	350
8.5.3 Die Rauschzahl thermisch rauschender Zweitore	353
8.5.4 Kaskadenschaltung für hintereinandergeschaltete Zweitore	354
8.5.5 Rauschanpassung.....	356
8.6 Messung der Rauschzahl	359
8.6.1 Die 3 dB-Methode	359
8.6.2 Die Y-Faktor-Methode.....	361
8.7 Messung der minimalen Rauschzahl und der optimalen Generatorimpedanz	362
8.7.1 Darstellung mit Generator-Leitwert Y_g	362
8.7.2 Bestimmung der vier Rauschterme durch Rauschzahlmessungen.....	364
8.7.3 Bestimmung der vier Rauschterme durch Leistungsmessungen.....	364

8.7.4 Parabolische Rauschzahl-Beziehung	366
8.7.5 Isolierung der Rauschterme des Messobjektes	367
8.8 Messung des Frequenzrauschens von Oszillatoren	370
8.8.1 Vierpolübertragung eines amplituden- und phasenmodulierten Trägersignals	371
8.8.2 Frequenzdiskriminatoren	374
8.8.3 Ein Frequenzdiskriminator mit einem Reflexionsresonator	374
8.8.4 Kalibrierung eines Frequenzdiskriminators	377
8.8.5 Messung des Frequenzrauschens mit einem Spektrumanalysator	379

Anhang: Lösungen der Übungsaufgaben.....381

Kapitel 1	383
Kapitel 2	395
Kapitel 3	405
Kapitel 4	419
Kapitel 5	427
Kapitel 6	438
Kapitel 7	444
Kapitel 8	454

Literaturverzeichnis475

Sachwortverzeichnis.....477