

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einige Komponenten der Hochfrequenz-Messtechnik .....</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Skalare Vierpolmessungen.....</b>	<b>47</b>
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
<b>3 Mischer, Phasenregelkreise und Schrittgeneratoren .....</b>	<b>83</b>
3.1 Das Überlagerungs- oder Heterodynprinzip.....	83
3.2 Parametrische Rechnung .....	84
3.2.1 Abwärtsmischer mit Schottky-Dioden .....	87
3.3 Ausführungsformen von Mischern .....	94
3.3.1 Der Ein-Dioden-Mischer .....	94
3.3.2 Der balancierte Mischter (2-Dioden-Mischter).....	96
3.3.3 Der doppelt balancierte Mischter (4-Dioden-Mischter).....	97
3.3.4 Mischter mit einem Feldeffekt-Transistor.....	99
3.3.5 Der Zwei-FET-Mischter .....	100
3.3.6 Analog-Multiplizierer .....	101
3.3.7 Der Oberwellen-Mischter .....	102
3.4 Grundlagen der Phasenregelkreise .....	103
3.5 Analoge und digitale Phasendiskriminatoren .....	111
3.5.1 Ein periodischer und symmetrischer digitaler Phasendiskriminatator mit bereichsweise linearer Kennlinie.....	112
3.5.2 Ein digitaler Phasendiskriminatator mit linearer und unsymmetrischer Kennlinie auf der Basis eines flankengetriggerten Flip-Flops .....	113
3.5.3 Ein periodischer und unsymmetrischer Phasendiskriminatator mit bereichsweise linearer Kennlinie.....	115
3.6 Phasen-Frequenz-Diskriminatoren .....	118
3.6.1 Ein Phasen-Frequenz-Diskriminatator auf der Basis von flankengetriggerten Flip-Flops .....	118
3.6.2 Ein Phasen-Frequenz-Diskriminatator auf der Basis von Logik-Gattern .....	120
3.7 Grundlagen der Schritt- und Synthesegeneratoren .....	124
3.7.1 Mitlaufende Wobbel sender.....	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
<b>4 Grundlagen der Systemfehlerkorrektur von Netzwerk-analysatoren .....</b>	<b>141</b>
4.1 Heterodyne Netzwerkanalysatoren.....	142
4.1.1 Aufbau des heterodynem 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
<b>5 Homodyne Netzwerkanalysatoren .....</b>	<b>207</b>
5.1 Das Prinzip der homodynens 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 – wichtigstes Verfahren .....	221
5.4.2 Eine analoge Realisierung des wichtendsten Verfahrens .....	222
5.5 Etablierung und Kalibrierung bei homodynem 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 Spektrumanalysatoren ..... 241**

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 Zeitbereichsmessungen ..... 269**

7.1 Der Abtastoszilloskop .....	269
7.1.1 Grundlagen der Abtastung .....	269
7.2 Technische Realisierung eines Abtastoszilloskop .....	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
<b>8 Rauschmessungen an Hochfrequenz-Schaltungen .....</b>	<b>305</b>
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 Widerstandsnetsze mit inhomogener Temperaturverteilung .....	311
8.1.5 Das Dissipationstheorem .....	312
8.2 Messung der äquivalenten Rauschtemperatur eines Zweipols.....	315
8.2.1 Grundschaltung .....	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 Gewinndeinitionen .....	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 Frequenzrauschen 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 Frequenzrauschen mit einem Spektrumanalysator .....	379
<b>Anhang: Lösungen der Übungsaufgaben.....</b>	<b>381</b>
Kapitel 1 .....	383
Kapitel 2 .....	395
Kapitel 3 .....	405
Kapitel 4 .....	419
Kapitel 5 .....	427
Kapitel 6 .....	438
Kapitel 7 .....	444
Kapitel 8 .....	454
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>475</b>
<b>Sachwortverzeichnis.....</b>	<b>477</b>