

FRANZIS HANDBUCH

C~7-7

Günter Käs
Peter Pauli

Mikrowellen- tedinik

Grundlagen, Anwendung,
Meßtechnik

Mit 705 Abbildungen und 31 Tabellen



Inhalt

1	Felder und Wellen	13
1.1	Einführung (<i>Horst Schymurä</i>)	13
1.1.1	Der Feldbegriff	13
1.1.2	Der Wellenbegriff	14
1.2	Physik elektromagnetischer Felder und Wellen (<i>Horst Schymurä</i>)	15
1.2.1	Statische elektrische und magnetische Felder	15
1.2.2	Der Gleichstromkreis, das stationäre Strömungsfeld	19
1.2.3	Zeitlich veränderliche Felder - Leitungswellen	22
1.2.4	Die elektromagnetische Welle im Raum	28
1.2.5	Die elektromagnetische Welle im Ferrit	32
1.2.6	Interferenz elektromagnetischer Wellen	38
1.2.7	Brechung und Reflexion elektromagnetischer Wellen an Trennflächen verschiedener Materialien	39
1.2.8	Transversale Feldbilder elektromagnetischer Wellen-Wellentypen	42
1.2.9	Die Wellenausbreitung im Hohlleiter	46
1.2.10	Oberflächenwellen	56
1.2.11	Wellentypenreger, Bauelemente und Störstellen der Wellenausbreitung	58
1.2.12	Wellenausbreitung in der Mikrowellenfunktechnik	61
Anhang A:	Mathematische Darstellung von Skalar- und Vektorfeldern	73
Anhang B:	Mathematische Darstellung einer Welle	74
Anhang C:	Elektromagnetische Wellenausbreitung in einer Parallelplattenleitung	76
Anhang D:	Polarisation elektromagnetischer Wellen	80
Anhang E:	Formeln für die Wellenausbreitung im Ferrit	83
Anhang F:	Interferenz von Punktquellen	84
Anhang G:	Formeln für die Berechnung der Feldstärkekomponenten in Rechteck- und Rundhohlleitern	87
1.3	Meßtechnik elektromagnetischer Wellen (<i>Günter Käs</i>)	90
1.3.1	Übersicht	90
1.3.2	Interferenzen, Dämpfung und Reflexion bei der Radarortung	91
1.3.3	Reflexionsdämpfung an Gebäudefassaden	99
2	Leitungen (<i>Walter Janssen</i>)	107
2.1	Wellenausbreitung auf HF-Leitungen	107
2.1.1	Leitungsgleichungen	107
2.1.2	Hochfrequenzleitungen	112
2.1.3	Transversalwellen, Mischwellen	114
2.1.4	S-Parameter	117

Inhalt

2.2	Koaxialleiter
2.2.1	Typen und Eigenschaften
2.2.2	Antennenkabel, Hochleistungskabel
2.3	Streifenleiter
2.3.1	Substratauswahl, Herstellungsart
2.3.2	Mikr ostreifenleiter (microstrip)
2.3.3	Symmetrische Streifenleiter (stripline)
2.3.4	Schlitzleitung (slotline)
2.3.5	Koplanarleitung
2.4	Hohlleiter
2.4.1	Rechteckhohlleiter
2.4.2	Breitband-Rechteckhohlleiter
2.4.3	Rundhohlleiter
3	Bauelemente der Mikrowellentechnik (Peter Pauli)
3.1	Halbleiterbauelemente und ihr Einsatz in der Schaltung
3.1.1	Dioden zur Mikrowellendetektion
3.1.2	Dioden zur Frequenzvervielfachung
3.1.3	Dioden zur Mischung, Modulation und Demodulation
3.1.4	Dioden als variable Kondensatoren, Varaktoren
3.1.5	- PIN-Dioden als regelbarer Mikrowellenwiderstand
3.1.6	Halbleiterbauelemente zur Mikrowellenerzeugung
3.2	Steuerbare Halbleiterbauelemente, Mikrowellentransistoren
3.2.1	Bipolare Transistoren
3.2.2	Feldeffekt-Transistoren (FET)
3.3	Elektronenröhren in der Mikrowellentechnik
3.3.1	Scheibenröhren (Disc Tubes), Scheibentrioden, Scheibentetroden
3.3.2	Verstärkerklystrons, Zwei- und Mehrkammer-Klystrons
3.3.3	Klystronen • • •
3.3.4	Reflexklystrons
3.3.5	Wanderfeldröhren, Travelling Wave Tubes (TWT)
3.3.6	Rückwärtswellenröhre, Carcinotron, Backward Wave Oscillator
3.3.7	Magnetrons, Koaxialmagnetrons
3.3.8	Kreuzfeldverstärker, Cross Field Amplifier (CFA)
3.3.9	Gyrotrons, Gyromonotron, Gyroklystron, Gyro-TWT
4	Verfahren der Mikrowellentechnik (Peter Pauli)
4.1	Richtfunktechnik
4.1.1	Einleitung
4.1.2	Das Funkfeld
4.1.3	Die Frequenzen und Frequenzuteilungen für Richtfunkstrecken
4.1.4	Die Modulationsverfahren im Richtfunk
4.1.5	Richtfunkantennen
4.1.6	Weitere Möglichkeiten des Richtfunks
4.2	Radar (Günter Käs)
4.2.1	Übersicht
4.2.2	Radartechnik

'4.2.3	Signalverarbeitung	242
jp 4.3	Satelliten-Fernseh-Empfang <i>{Peter Pauli}</i>	244
kA.3.1	Einleitung	244
4.3.2	Grundlagen für geostationäre Satelliten	247
i; 4.3.3	Positionierung der geostationären Satelliten	249
l/4.3.4	Frequenzuteilung	250
4.3.5	Leistungs- und Pegelbetrachtungen	254
^ 4.3.6	Die wichtigsten Fernsehsatelliten und ihre Daten	254
;#3.7	Fernseh-Satelliten-Empfang	256
l;4.4	Mikrowellengeräte- und Anlagen <i>{Peter Pauli}</i>	258
; 4.4.1	Einleitung	258
'4.4.2	Mikrowellenanlagen in der Forschung	259
4.4.3	Mikrowellenanlagen in Industrie, Haushalt, Landwirtschaft und Medizin	262
... k f.4.4	Weitere Anwendungen der Mikrowellen	266
	Biologische Wirkungen von Mikrowellen <i>{Günter Käs}</i>	269
5.1	Übersicht	269
5.2	Thermische und athermische Wirkungen	272
5.3	Grenzwerte	276
&	Messung von Frequenz und Wellenlänge <i>{Albert Winter}</i>	279
o!l	Frequenzzähler	279
I;\3.2	Mikrowellenfrequenzzähler	283
%3	Vermeidung von Meßfehlern bei modulierten und gestörten Signalen	284
5.3.1	Messung amplitudenmodulierter Signale	285
6.3*2	Messung frequenzmodulierter Signale	285
43.3	Messung gepulster Signale	286
)3.4	Messung verrauschter und gestörter Signale	286
...^63.5	Fehler bei Zeit- und Periodendauermessung	286
,64	Analoge Frequenzmessung	287
4.1	Resonanzfrequenzmesser	288
4.2	Überlagerungsfrequenzmesser	289
^6.4.3	Frequenzmessung mit Empfängern, Spektralanalysatoren	290
tT	Leistungsmessung <i>{Thomas Reichet}</i>	292
7.1	Einführung	292
7.2	Definitionen	293
7.3	Leistungsmeßgeräte	296
7.3.1	Thermische Sensoren	299
-7.3.2	Dioden-Detektoren	303
7.3.3	Kalibrierung	308
7.4	Meßunsicherheit	310
7.4.1	Anpaßfehler	310
7.4.2	Gerätefehler	311
7.4.3	Berechnung der Gesamtunsicherheit	316

7.5	Anwendungen
7.5.1	Messung großer Generatorleistungen
7.5.2	Messung der Vorlaufleistung
7.5.3	Messung der Rücklaufleistung
8	Feldstärkemeßtechnik <i>{Eberhard Gauger}</i>
8.1	Einleitung
8.2	Grundlagen für die Feldstärkemeßtechnik
8.2.1	Statische Felder ($f = 0$)
8.2.2	Das elektromagnetische Feld
8.2.3	Die elektromagnetische Welle
8.3	Feldstärkemessung
8.3.1	Meßprinzip: Bestimmung der Feldstärke aus der Empfängereingangsspannung
8.3.2	Nah- und Fernfeldbedingungen
8.3.3	Feldstärkemeßstrecken
8.4	Meßempfänger und deren Eigenschaften
8.4.1	Allgemeines zum Mikrowellenbereich
8.4.2	Aufbau
8.4.3	Eigenschaften
8.5	Antennen für den Mikrowellenbereich
8.5.1	Antennenarten allgemein
8.5.2	Mikrowellen-Antennen
8.5.3	Kalibrierung von Meßantennen
8.6	Beispiel einer EMI-Empfangsanlage 20 Hz-18 (40) GHz
8.7	Beispiel einer Empfangsanlage, 1-18 GHz, für Funküberwachungszwecke
8.8	Meßbeispiele für den Mikrowellenbereich
8.8.1	Messen von Funkstörstrahlungsleistungen nach VDE 0871 von 1-18 GHz
8.8.2	GTEM-Zelle: Alternative zur herkömmlichen Störfeldstärkemessung bis in den GHz-Bereich
Anhang 8.1	
Anhang 8.2	
Quellennachweis	
9	Impedanzmessung <i>{Günter Käs}</i>
9.1	Grundlagen der Impedanzmessung <i>{Peter Pauli}</i>
9.1.1	Der Impedanzbegriff
9.1.2	Darstellung komplexer Impedanzen und Admittänzen
9.1.3	Impedanztransformationen
9.1.4	Hinweise zu Impedanzmessungen
9.1.5	Impedanzverhältnisse auf Leitungen
9.2	Anpassungs- und Impedanzmessung in der Hohlleitertechnik <i>{Peter Pauli}</i>
9.2.1	Grundlagen zur Hohlleiterimpedanzmessung
9.2.2	Meßverfahren

9.3	Impedanzmessung nach Betrag - Skalare Netzwerkanalyse {Günter Käs}.."	436
9.3.1	Meßprinzip.	436
9.3.2	Qualitätskriterien der Messung.	437
9.3.3	Spezielle Meßverfahren für höchste Genauigkeit.	445
9.4	S-Parameter und vektorielle Netzwerkanalyse {Peter Pauli}.	448
9.4.1	Vierpolparameter und andere Größen.	448
9.4.2	Aufbau von vektoriellen Netzwerkanalysatoren „.	464
9.4.3	Probleme bei der Kalibrierung und Fehlerkorrekturverfahren.	477
10	Rauschen {Werner Sackreuther}.	486
10.1	Grundlagen der Rauschzahlmessung im Hochfrequenz- und Mikrowellenbereich.	486
\ 10.1.1	Rauschcharakteristika von Vierpolen.	486
/ 10.1.2	Messung der Rauschcharakteristika.	499
; i0.2	Grundlagen der Phasenrauschmeßtechnik im Hochfrequenz- und Mikrowellenbereich.	515
i	Grundlagen des Phasenrauschens.	515
;f 10.2.1	Meßverfahren.	523
10.2.2		
*		
111	Messung im Frequenzbereich.	549
1/11.1	Spektralanalyse - Grundlagen und Anwendung {Günter Käs}.	549
*'11.1.1	Übersicht.	549
• 11.1.2	Grundlagen der Fourier-Transformation.	553
11.1.3	Diskrete Fourier-Transformation.	560
11.2	HF-Spektrumanalysatoren {Herbert Schmitt}.	566
11.2.1	Prinzip eines Spektrumanalysators t.	566
11.2.2	Eigenschaften von Spektrumanalysatoren.	567
11.2.3	Filtereinschwingzeit und Signalverweilzeit „.	574
„ 11.2.4	Praktische Grenzen der HF-Spektrumanalyse.	576
,il.2.5	Messungen von Rauschgrößen.	586
v 1.2.6	Modulationsmessungen.	589
J\il.2.7	Korrelierte Signale.	598
S, 11.2.8	Übertragungs- und Reflexionsmessungen ;.	599
t 1.3	FFT-Spektralanalyse {Wolfgang Winter}.	602
11.3.1	Analyse periodischer und nichtperiodischer Signale.	603
1^1.3.2	Korrelationsanalyse.	611
ruf 1.3.3	Fehlerquellen beim Einsatz von Fourieranalysatoren.	625
S"i2	Fehlerortung mit Reflektometrie-Meßverfahren.	636
\^ 2.1	Time Domain Reflectometry (TDR) {Peter Pauli}.	636
JH2.1.1	Einleitung.	636
ij,12.1.2	Prinzipieller Meßaufbau.	637
1^2.1.3	Meßsignal: „Einheitssprung“.	637
\^ 2.1.4	Bedeutung der Wellenausbreitung auf Leitungen bei der TDR.	640
f 2.1.5	Interpretation der TDR-Oszillographen-Bilder. f.	642
Jpl2.1.6	Praktischer Einsatz des Impulsreflektometers.	645

12.1.7 Mehrfachreflexionen

12.1.8 Zusammenfassung

12.2 Fehlerortung mit Frequency Domain Reflectometry (FDR) *{Günter Käs}*.

12.2.1 Einführung

12.2.2 Meßprinzip

12.2.3 Meßpraxis

12.2.4 Einflüsse auf die Meßgenauigkeit

13 *Sampung-Meßtechnik* {Bernhard Schmidt-Peltzer}

13.1 Einführung

13.2 Was ist Sampling?

13.2.1 Realtime-Sampling

13.2.2 Sequential-Sampling

13.2.3 Random-Sampling

13.2.4 Multiple Random-Sampling

13.3 Aufbau von Sampling-Eingangsschaltungen

13.4 Error-Sampling

13.5 Sampling-Schaltungen

13.6 Aufbau eines digitalen Sampling-Oszilloskops

14 **Hilfsmittel für HF- und Mikrowellenmessungen**
{Peter Pauli}

14.1 Übersicht

14.2 Mikrowellentaugliche Verbindungsbauteile

14.2.1 Koaxialsteckersysteme

14.2.2 Koaxial-Hohlleiter-Übergänge

14.2.3 Koaxial-Microstrip-Übergänge

14.2.4 Stoßfreie Verbindung zwischen Hohlleitern

14.2.5 Drehkopplungen

14.3 Mikrowellenbauteile als Bestandteil eines Meßaufbaues

14.3.1 Verzweigungen, Power-Splitter

14.3.2 Gleichspannungseinspeisungen, BIAS-T, DC-Block

14.3.3 Feste und variable Dämpfungsglieder, Eichleitungen

14.3.4 PIN-Modulatoren und-Schalter

14.3.5 Angepaßte Abschlußwiderstände, Absorber

14.3.6 Anpassungstransformatoren, Slide Screw Tuner, Stub Tuner

14.3.7 Tiefpaßfilter V

14.4 Zusammenfassung

Sachverzeichnis