
NF- und HF-Messtechnik

Herbert Bernstein

NF- und HF-Messtechnik

Messen mit Oszilloskopen,
Netzwerkanalysatoren und
Spektrumanalysator

2. Auflage

Herbert Bernstein
München, Deutschland

ISBN 978-3-658-39115-7 ISBN 978-3-658-39116-4 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-39116-4>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2015, 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Reinhard Dapper

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Mit dem vorliegenden Werk wird angestrebt, das Thema „NF- und HF-Messelektronik“ möglichst umfassend und in sich abgeschlossen zu behandeln, sowie moderne Entwicklungstendenzen in der Elektronik zu berücksichtigen.

Die Entwicklung, Fertigung und der Betrieb von Nachrichtenübertragungssystemen erfordern den Einsatz von Messgeräten zur Bestimmung der vielfältigen Kenngrößen in der Übertragungstechnik. Wenn heute vielfach automatisierte Messgeräte verwendet werden, deren Funktion weitgehend von einem Mikroprozessor oder Mikrocontroller bestimmt wird, so ist es doch unerlässlich, sich mit den dabei zugrunde liegenden Verfahren zur Messung der gewünschten Kenngrößen und deren genauer Definition zu befassen.

Das vorliegende Buch möchte dem Leser dabei behilflich sein. Mit einer ausführlichen Erläuterung der verschiedenen übertragungstechnischen Kenngrößen und Messverfahren sowie praktisch ausgeführter Messanordnungen und Messsysteme geht der Umfang des Buches natürlich weit über den Rahmen einer Vorlesung hinaus. Es war aber von vornherein nicht die Absicht des Verfassers, nur ein Lehrbuch für Studenten zu schaffen, sondern darüber hinaus einen weiten Kreis von Interessenten anzusprechen. Die Darstellung des Stoffes ist in diesem Sinne für jeden Techniker verständlich und durch zahlreiche Messbeispiele mit Wertangaben stark auf die praktische Anwendung ausgerichtet.

Das umfangreiche Stoffgebiet der „NF- und HF-Messverfahren“ wurde in fünf Abschnitte gegliedert. Der erste Abschnitt erläutert die Grundbegriffe und Kenngrößen aus der Übertragungstechnik. Eine fundierte Kenntnis dieser Begriffe ist unerlässlich für das Verständnis der Messverfahren.

Der Umfang des behandelten Stoffes machte allerdings eine exemplarische Themenauswahl bei den detaillierteren Betrachtungen erforderlich. Bei der Auswahl der zahlreichen Beispiele wurde einerseits darauf geachtet, dass ein abgerundetes Bild der vielfältigen elektronischen Mess- und Verarbeitungsmethoden entsteht und andererseits, dass eher die Arbeitsprinzipien der dargestellten Komponenten und Verfahren als deren genaue Eigenschaften herausgestellt werden, damit trotz rasch fortschreitender Technik ein vorzeitiges „Veralten“ der Aussagen vermieden wird.

Obwohl dieses Werk im Unterricht an einer Technikerschule entstanden ist, hat der Verfasser kein ausgesprochenes Vorlesungsmanuskript, da es über einführende Darstellungen hinausgeht. Es ist gedacht als vorlesungsbegleitende Literatur an Techniker-, Meister- und Fachhochschulen, es wendet sich aber auch an die in der Praxis tätigen Ingenieure und Techniker.

Das Buch ermöglicht den Einstieg in die analoge Schaltungssimulation mit dem Netzwerkanalyseprogramm MultiSimBlue und demonstriert zahlreiche Beispiele, denn es sind 20 Messinstrumente (16-Kanal-Logikanalysator, Agilent Instrumente, Ampere-meter, Bode-Plotter, Verzerrungsanalysator, dynamische Messköpfe, Frequenzzähler, Funktionsgenerator, Multimeter, Netzwerkanalysator, 2- und 4-Kanal-Oszilloskope, Spektrumanalysator, Tektronix Oszilloskop, Voltmeter, Wattmeter, Word Generator) und umfangreiche Analyseverfahren vorhanden. Das Verständnis für die Funktionsweise der untersuchten Bauelemente und Schaltungen kann so auf eine sehr anschauliche Weise weiterentwickelt werden.

Zur zweiten Auflage:

Das Fachbuch wurde um das Kapitel „USB-Oszillokope“ erweitert, denn diese Oszilloskope bieten zahlreicher Optionen, die für die praktische Messtechnik optimal geeignet sind.

Meiner Frau Brigitte danke ich für die Erstellung der Zeichnungen.

E-Mail-Adresse des Autors: Bernstein-Herbert@t-online.de

München
Herbst 2022

Herbert Bernstein

Inhaltsverzeichnis

1	Grundbegriffe der NF- und HF-Messtechnik	1
1.1	Aufbau eines Nachrichtenübertragungssystems	2
1.2	Signale und ihre Darstellung	4
1.2.1	Zeitfunktion	4
1.2.2	Frequenzfunktion	9
1.2.3	Analoge Signale	12
1.2.4	Digitale Signale und Codes	16
1.2.5	Fourier-Analyse	19
1.3	Frequenzband, Bandbreite und Nachrichtenkanal	27
1.3.1	Übertragungsstrecke und Bandbreitenbegrenzung	28
1.3.2	Leitungsgrößen und Längeneinheit	30
1.3.3	Drahtgebundenes Übertragungssystem	33
1.3.4	Phasenkonstante und Wellenkonstante	36
1.4	Frequenz- und Wellenbereiche	37
1.5	Dämpfung und Verstärkung	40
1.5.1	Dämpfungs- und Verstärkungsfaktor	40
1.5.2	Dämpfungs- und Verstärkungsmaß	41
1.6	Pegelrechnung	44
1.6.1	Absoluter Pegel	44
1.6.2	Relativer Pegel	45
1.6.3	Zusammenhang zwischen Pegel und Dämpfungs- sowie Verstärkungsmaß	47
1.6.4	Pegeldiagramm	47
1.6.5	Dynamik	49
1.7	Verzerrungen	49
1.7.1	Lineare Verzerrungen	49
1.7.2	Nicht lineare Verzerrungen	51

1.8	Rauschen	55
1.8.1	Arten und Ursachen des Rauschens	56
1.8.2	Rauschkenngößen	60
1.8.3	Maßnahmen zur Rauschminderung	62
2	Arbeiten mit analogen und digitalen Oszilloskopen	65
2.1	Aufbau eines analogen Oszilloskops	67
2.1.1	Elektronenstrahlröhre	69
2.1.2	Horizontale Zeitablenkung und X-Verstärker	74
2.1.3	Triggerung	77
2.1.4	Y-Eingangskanal mit Verstärker	80
2.1.5	Zweikanaloszilloskop	84
2.1.6	Tastköpfe	87
2.1.7	Inbetriebnahme des Oszilloskops	89
2.2	Handhabung eines analogen Oszilloskops	93
2.2.1	Einstellen der Empfindlichkeit	94
2.2.2	Anschluss eines Oszilloskops an eine Messschaltung	97
2.2.3	Triggerverhalten an einer Messschaltung	104
2.3	Digitales Speicheroszilloskop	108
2.3.1	Monitore mit Dünnschichttransistoren (TFT) und Flüssigkristallen (LCD)	109
2.3.2	TFT-Monitor in Dünnschichttransistoren	111
2.3.3	Merkmale eines digitalen Oszilloskops	114
2.3.4	Interne Funktionseinheiten	114
2.3.5	Digitale Signalspeicherung	116
2.3.6	Analog-Digital-Wandler	118
2.3.7	Zeitbasis und horizontale Auflösung	119
2.3.8	Möglichkeiten des Abtastbetriebs	123
2.3.9	Speicherung von Signalinformationen	127
2.4	Funktionen und Bedienelemente	131
2.4.1	Parametereinstellungen	131
2.4.2	Triggerfunktionen	132
2.4.3	Spezielle Triggerfunktionen	137
2.4.4	Triggermethoden für Störimpulse	141
2.4.5	Auswertung von Messsignalen	142
2.4.6	Digitale Filterung	146
2.4.7	Vorarbeitung von Messsignalen	148
2.4.8	Spezialfunktionen eines digitalen Speicheroszilloskops	150
2.4.9	Automatische Messung mit der Cursorsteuerung	154
2.4.10	Arbeiten mit dem Messcursor	158
2.5	Praktische Anwendungen des Oszilloskops	161
2.5.1	Strom-Spannungs-Kennlinie eines Widerstands	162

2.5.2	Strom-Spannungs-Kennlinie einer Diode	164
2.5.3	Untersuchung von RC-Integriergliedern	168
2.5.4	Untersuchung von CR-Differenziergliedern	172
2.5.5	Untersuchung der Phasenverschiebung	174
2.5.6	Frequenzmessung mit der Lissajous-Figur	178
2.5.7	Messung der Phasenverschiebung mit der Lissajous-Figur	182
3	Filtertechnik	185
3.1	Kenngrößen	187
3.1.1	Filtertypen	188
3.1.2	Wobbelmessgerät	190
3.1.3	Wobbelgenerator mit MAX038	199
3.2	Bode-Plotter	208
3.2.1	Passiver RC-Hochpass	209
3.2.2	Passiver RC-Tiefpass	212
3.2.3	Passiver RL-Tiefpass und RL-Hochpass	213
3.2.4	RCL-Reihenschwingkreis	214
3.2.5	RCL-Parallelschwingkreis	216
3.2.6	Reale Schwingkreise	217
3.2.7	Güte und Bandbreite	219
3.2.8	Passives LC-Filter	221
3.2.9	Passives T- und π -Filter	222
3.2.10	Passives Tiefpass-Doppelsiebglied	224
3.2.11	Bandpass mit Wienbrücke	225
3.3	Passive Filterschaltungen	226
3.3.1	CL-Bandpass	226
3.3.2	CL-Bandsperre	228
3.3.3	Kritische Bandfilter	228
3.3.4	m-Filter	230
3.4	Aktive Filterschaltungen	233
3.4.1	Vergleich zwischen den aktiven Filterschaltungen	233
3.4.2	Passiver Hoch- und Tiefpass 1. Ordnung	235
3.4.3	RC-Filter nach Gauß	236
3.4.4	Filter nach Gauß, Bessel, Butterworth, Cauer und Tschebyscheff	238
3.4.5	Amplitudengang von aktiven Filtern	240
3.5	Aktive Tief- und Hochpassfilter	242
3.5.1	Aktiver Tiefpass 1. Ordnung	242
3.5.2	Aktiver Hochpass 1. Ordnung	244
3.5.3	Aktive Tiefpassfilter 2. Ordnung mit Zweifachgegenkopplung	245
3.5.4	Umwandlung von Tiefpass- in Hochpassfilter	247

3.6	Aktive Bandpassfilter	249
3.6.1	Selektiver Verstärker mit Schwingkreis	249
3.6.2	Selektives Filter 2. Ordnung in Gegenkopplung	250
3.7	Einstellbare Filter	252
3.7.1	Einstellbares Tiefpassfilter	252
3.7.2	Einstellbares Hochpassfilter	253
3.7.3	Einstellbares Bandsperrfilter	254
3.7.4	Allpassfilter	256
3.8	Aktiver Tiefpassfilter höherer Ordnung	258
3.8.1	Berechnungsbeispiele für aktive Tiefpassfilter	259
3.8.2	Aktives Tiefpassfilter 3. Ordnung	260
3.8.3	Aktives Tiefpassfilter 4. Ordnung	261
4	Spektrumanalysator	265
4.1	Oszilloskop und Spektrumanalysator	266
4.1.1	Unterschiedliche Darstellung des gleichen Signals	268
4.1.2	Referenzpegel	271
4.1.3	Charakterisierung eines Spektrumanalysators	273
4.2	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	276
4.2.1	EMV-Probleme	277
4.2.2	Oszilloskop oder Spektrumanalysator	278
4.2.3	Aktive Feldsonde	280
4.2.4	Dämpfung durch Gehäuse	286
4.2.5	Auswahl von Signalleitungsfiltern	288
4.2.6	Signalleitungsfilter mit Widerständen, Kondensatoren und Spulen	291
4.2.7	Frequenz- und Zeitbereich	294
4.2.8	Zero-Span-Betrieb	296
4.2.9	Tastköpfe	297
4.2.10	Fehlerminimierung bei Tastköpfen	300
4.2.11	Feldgeführte Störungen	302
4.3	Aufbau von Spektrumanalysatoren	306
4.3.1	Fourier-Analysator (FFT-Analysator)	307
4.3.2	Signalverarbeitung	309
4.3.3	Diskrete Fourier-Transformation	311
4.3.4	Abtast-Theorem	313
4.3.5	z-Transformation	315
4.3.6	Inverse z-Transformation	318
4.3.7	Systemfunktion $H(z)$	319
4.3.8	Schnelle Fourier-Transformation (FFT)	321
4.3.9	Inverse Diskrete Fourier-Transformation (IDFT)	326
4.3.10	Zwischenfrequenz und Superheterodyne	327

4.3.11	Filterbänke für FFT	331
4.4	Spektrumanalysator nach dem Überlagerungsprinzip	336
4.5	Modulation	339
4.5.1	Überlagerung	340
4.5.2	Amplitudenmodulation (AM)	343
4.6	Schaltungen von Sinusoszillatoren	350
4.6.1	Prinzipschaltung des Oszillators	351
4.6.2	LC-Oszillatoren	353
4.7	Verfahren der Amplitudenmodulation	358
4.7.1	Zweiseitenbandamplitudenmodulation ohne Trägerunterdrückung	360
4.7.2	Additive Modulation	361
4.7.3	Multiplikative Modulation	362
4.7.4	Leistungsbetrachtung bei der Zweiseitenbandamplitudenmodulation	364
4.7.5	Zweiseitenbandamplitudenmodulation mit unterdrücktem Träger	367
5	Netzwerkanalysator	369
5.1	Funktionen des Netzwerkanalysators	371
5.1.1	Netzwerkanalysator und Richtkoppler	371
5.1.2	Smith- und Polardiagramm	374
5.1.3	Zweit- und Vierpol	377
5.1.4	Zweitorgleichungen und Parameter	379
5.1.5	Umrechnung der Matrizen	380
5.1.6	Elementar-Zweitore	380
5.1.7	Ersatzschaltungen	382
5.1.8	Zusammenschalten von Zweitoren	383
5.1.9	Funktionen des Netzwerkanalysators	385
5.1.10	Reflexions-Messung mit Netzwerkanalysator	390
5.1.11	Stehwellenverhältnis	393
5.2	Skalarer Netzwerkanalysator	396
5.3	Vektorieller Netzwerkanalysator	397
5.3.1	Vektorielle Netzwerkanalyse	400
5.3.2	Reflexionsmessung	402
5.4	Untersuchung von Leitungssystemen	406
5.4.1	Drahtgebundene Übertragungssysteme	406
5.4.2	Leitungsbeläge	408
5.4.3	Wellenwiderstand Z_L	411
5.4.4	Dämpfung a und Dämpfungskonstante α	414
5.4.5	Phasenkonstante β und Signallaufzeit t_L	415
5.4.6	Ausbreitungsgeschwindigkeit v_L und Verkürzungsfaktor k	417

5.4.7	Arten und Einsatzbereich von Leitungen	419
5.4.8	Koaxialkabel	425
5.4.9	Skineffekt	429
5.4.10	Streifenleitung und Hohlleiter	434
5.5	Streuparameter (S-Parameter)	443
5.5.1	Verhalten von strom- und spannungsbasierten Bauteilen	443
5.5.2	Streumatrizen von Zweitoren	446
5.5.3	S-Parameter in der Praxis	448
5.6	Smith-Diagramm	451
5.6.1	Funktionen des Smith-Kreisdiagramms	452
5.6.2	Maßstab und Normierung im Smith-Kreisdiagramm	456
5.6.3	Reflexionsfaktorebene	458
5.6.4	Ablezen der Faktoren im Smith-Diagramm	461
5.6.5	Transformation durch verlustfreie Leitungen	464
5.6.6	Leerlauf und Kurzschluss	465
5.6.7	Impedanzmessung mithilfe einer Messleitung	466
5.6.8	Güte von Reflexionsresonatoren	468
5.6.9	Impedanztransformation mit dem Collins-Filter	472
5.6.10	Anpassschaltung für HF-Transistoren	475
6	USB-Oszilloskope	483
6.1	USB-Schnittstelle	483
6.1.1	Messungen mit USB-Oszilloskop	485
6.1.2	USB-Oszilloskopfenster	488
6.1.3	XY-Ansicht und Lissajous-Figur	492
6.1.4	Triggerung	493
6.1.5	Spektralansicht	494
6.1.6	Persistenzmodus	495
6.1.7	Cursorfunktionen	499
6.1.8	Mathematische Funktionen der Rechenkanäle	504
6.1.9	Wellenformen der Referenzspannung	505
6.1.10	Maskengrenzprüfung	507
6.1.11	Puffernavigator	510
6.2	Menüs des USB-Oszilloskops	511
6.2.1	Öffnen von Dateien	512
6.2.2	Textbasierte Dateiformate	515
6.2.3	Dateiformate des USB-Oszilloskops	517
6.2.4	Starteinstellungen	519
6.2.5	Bearbeiten eigener Anmerkungen	519
6.2.6	Messungen mit dem USB-Oszilloskop	523
6.2.7	Messung hinzufügen und Messung bearbeiten	524

6.3	Symbolleisten und Schaltflächen	528
6.3.1	Digitaleingänge eines Mixed-Signal-Oszilloskops (MSO)	533
6.3.2	Kanal-Symbolleiste	536
6.3.3	Steuerung für Digitalausgänge	539
6.3.4	Spektrumoptionen	542
6.3.5	Persistenz	544
6.3.6	Signalgenerator	547
6.3.7	Steuerung des Signalgenerators	551
6.3.8	Erstellung von anwenderdefinierten Wellenformen	552
6.3.9	Signalgenerator mit anwenderdefinierten Wellenformen	552
Stichwortverzeichnis		557