

---

## NF- und HF-Messtechnik

---

Herbert Bernstein

# NF- und HF-Messtechnik

Messen mit Oszilloskopen,  
Netzwerkanalysatoren und  
Spektrumanalysator

2. Auflage



Springer Vieweg

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, Ampemeter, 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-Oszilloskope“ 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](mailto:Bernstein-Herbert@t-online.de)

München  
Herbst 2022

Herbert Bernstein

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundbegriffe der NF- und HF-Messtechnik</b>	<b>1</b>
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	Leitungsrößen 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	Rauschkenngrößen .....	60
1.8.3	Maßnahmen zur Rauschminderung .....	62
<b>2</b>	<b>Arbeiten mit analogen und digitalen Oszilloskopen .....</b>	<b>65</b>
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 Dünnfilmtransistoren (TFT) und Flüssigkristallen (LCD) .....	109
2.3.2	TFT-Monitor in Dünnfilmtransistoren .....	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
<b>3</b>	<b>Filtertechnik . . . . .</b>	<b>185</b>
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 $\pi$ -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
<b>4</b>	<b>Spektrumanalysator . . . . .</b>	<b>265</b>
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	<b>Netzwerkanalysator . . . . .</b>	369
5.1	Funktionen des Netzwerkanalysators . . . . .	371
5.1.1	Netzwerkanalysator und Richtkoppler . . . . .	371
5.1.2	Smith- und Polardiagramm . . . . .	374
5.1.3	Zweitor 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 $\alpha$ und Dämpfungskonstante $\alpha$ . . . . .	414
5.4.5	Phasenkonstante $\beta$ 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	Ablesen 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
<b>6</b>	<b>USB-Oszilloskope . . . . .</b>	<b>483</b>
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
	<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>557</b>