

# Elektronik

Frank Sichla



## Hochfrequenz Messpraxis

Zweckmäßige und kostengünstige Messverfahren  
für Ausbildung, Labor und Hobby



**FRANZIS**

# Vorwort

Die Hochfrequenztechnik kennt seit ihrer Entstehung vor etwas über 100 Jahren keinen Stillstand. Anfangs durch Maschinensender gekennzeichnet, wurde sie im Laufe ihrer Entwicklung – wie die gesamte Elektronik – entscheidend durch Röhre, Transistor und IC geprägt. Doch in einem Punkt ist es heute noch genau wie früher: Bei Entwicklung, Nachbau, Modifizierung oder Reparatur hochfrequenztechnischer Schaltungen und Geräte kommt man um Messungen nicht herum, ja selbst zur Charakterisierung von Bauelementen oder Baugruppen für die HF-Technik benötigt man durchdachte Messverfahren. Und das wird auch morgen noch so sein!

Allerdings hat die Hochfrequenz-Messtechnik so ihre Tücken: Ob Spannungs-, Strom-, Leistungs- oder Frequenzmessung – immer geht es im Hochfrequenzbereich ganz anders zu als bei niedrigen Frequenzen. Vom DC-, 50-Hz- oder Audio-Bereich Gewohntes funktioniert im HF-Bereich nicht mehr. Der Teufel steckt zudem allzu oft im Detail.

Die Theorie sieht leider meist an diesen Fallstricken vorbei. Allein das richtige praktische Wissen entscheidet daher über Erfolg oder Misserfolg einer Messung im HF-Bereich. In diesem Buch wird es vermittelt. Ob Sie Profi, Auszubildender oder Amateur sind – Sie haben damit den richtigen Begleiter in die Hochfrequenz-Messpraxis gefunden. Die vorliegende systematische Zusammenstellung der Messverfahren für alle wichtigen Größen im HF-Bereich beruht auf jahrzehntelanger Erfahrung und entspricht dem Wunsch vieler Hochfrequenz- und Funktechniker nach zweckmäßigen und somit auch kostengünstigen Messverfahren. Das Buch ist gleichermaßen geeignet für Ausbildung, Labor und Funkhobby.

„Wer misst, misst Mist“ – dieser oft gehörte flapsige Spruch, der leider mehr als ein Körnchen Wahrheit enthält, sollte nun für Sie auch im Bereich der Hochfrequenztechnik nicht mehr gelten.

Und keine Angst um die Finanzen, „zweckmäßig“ bedeutet wirklich meist auch „kostengünstig“. Das Buch liefert viele Beweise dafür, denn es geht nicht nach der plumpen Devise „So genau wie möglich“ vor, sondern legt den klugen Maßstab „So genau wie nötig“ an.

Ganz wichtig ist es, grobe Messfehler zu vermeiden, die leider im HF-Bereich dem weniger erfahrenen Techniker besonders schnell unterlaufen können. Ein solcher Fehler – auch *qualitativer* Fehler genannt – verfälscht das Ergebnis zumeist völlig.

Leider wird dieses Problem oft übersehen im Bestreben, den (grundsätzlich unausweichlichen, aber geringfügigen) *quantitativen* Fehler gering zu halten, also beispielsweise die Ablesegenauigkeit zu maximieren.

Dieses Buch setzt Grundlagenwissen, wie es viele Lehrbücher vermitteln, bereits voraus. Das heißt aber nicht, dass es ganz ohne Theorie auskommt, doch wird diese nur soweit bemüht, als sie der Praxis dient.

Der Autor bemüht sich um einen lockeren und leicht verständlichen Stil und hofft, dass Sie, lieber Leser, aus den unterbreiteten Messvorschlägen und den wichtigen Zusatzinformationen den größten praktischen Nutzen ziehen können.

*Ing. Frank Sichla*

## Sicherheit bei HF-Messungen

Im Gegensatz zu Messungen in der Hochspannungstechnik sind Messungen in der Hochfrequenztechnik wenig gefährlich. Die Elektronenröhre mit ihrer hohen Anodenspannung fristet ja nur noch ein Lückendasein. Die Spitzenspannung am Ausgang eines 100-W-Senders beträgt beim üblichen 50-Ohm-Abschluss 100 V. Der zugehörige Effektivwert von 70 V ist nicht viel größer als 48 V, der Wert, ab dem eine Spannung als „gefährlich“ gilt.

Dennoch sei angemahnt, beim Messen immer an die Sicherheitsvorschriften zu denken!

In letzter Zeit taucht im Zusammenhang mit Messgeräten das Kürzel **CAT** auf. Hintergrund: Die **IEC** (International Electrotechnical Commission) entwickelt internationale Sicherheitsnormen für Messgeräte. Lange Zeit war die IEC-Norm 348 Industriestandard, dann wurde sie durch die IEC 1010 ersetzt. In Europa nennt sie sich allerdings EN 61010 und gilt auch in Deutschland. Die IEC 1010 bzw. EN 61010 gilt für Niederspannungs-Messgeräte. Das meint Spannungen bis maximal 1.000 V.

Der allgemein und auch für Hochfrequenz-Messgeräte wichtigste Begriff hierbei lautet „Überspannungskategorie“. Damit sind Überspannungen vom Netz her gemeint. Es gibt die Kategorien I bis IV, oft abgekürzt mit CAT I bis CAT IV. Je höher die Zahl, um so besser ist das Messgerät oder Zubehörteil geschützt. Damit noch nicht genug: Innerhalb jeder Kategorie kann eine Spannungsangabe erfolgen, so dass also innerhalb jeder Kategorie noch einmal spezifiziert wird. Es ist dabei klar: Ein Messgerät oder Zubehörteil CAT III/1.000 V ist besser geschützt als eines mit der Kategorie III/600 V.

Je näher man an der Stromversorgungsquelle arbeitet, desto größer ist die CAT-Zahl und desto höher ist die Wahrscheinlichkeit von transienten Überspannungen. Weiter gilt: Je größer der an einem Punkt mögliche Kurzschlussstrom, desto größer ist die Zahl.

Wir haben es in der Regel mit CAT II zu tun, darunter fallen einphasige Lasten, die mit der Steckdose verbunden sind.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Spannungsmessung – Grundlagen</b>	11
1.1	Grundsätzlich zu beachten	11
1.2	Wichtige Zusammenhänge der Werte bei Sinus- und Rauschspannung	13
<b>2</b>	<b>HF-Spannungsmessung mit dem Scope</b>	15
2.1	Grundtypen	16
2.2	Beim Zweikanaler: Chopper- und Alternate-Betrieb	18
2.3	Beachtung der Bandbreite	19
2.4	Nur bei Flanken: Beachtung der Anstiegszeit	21
2.5	Rauschen richtig messen	22
2.6	Frequenzabhängigkeit des ohmschen Anteils am Scope-Eingangswiderstand	23
2.7	Frequenzabhängigkeit des ohmschen Anteils am Tastkopf-Eingangswiderstand	25
2.8	Die Eingangsimpedanz	28
2.9	Teilerfaktor über der Frequenz	29
2.10	Die Kompensation	29
2.11	Grenzfrequenz und Anstiegszeit mit Tastkopf	30
2.12	Verzichtbarer Luxus: die Faktor-5-Regel	31
2.13	Spannungsfestigkeit mit Tastkopf	31
2.14	Der Phasengang	33
2.15	Reflexionen	34
2.17	Was lehrt uns das?	24
2.17	Teiler-Tastkopf-Tipps	35
<b>3</b>	<b>Praktische Tastkopfschaltungen</b>	37
3.1	Passive Tektronix-Tastköpfe	37
3.2	Aktiver Tastkopf von Hewlett-Packard	41
3.3	Ein paar Selbstbau-Schaltungsvorschläge	43
<b>4</b>	<b>HF-Spannungsmessung durch Gleichrichtung</b>	49
4.1	Qualitative Betrachtung des Diodengleichrichters	49
4.2	Die Schottky-Formel hilft weiter	52
4.3	Praktische Schlussfolgerungen	55
4.4	Von Vorteil: Verdoppler	60
4.5	Durchgangskopf, Richtkoppler und Stehwellenmesser	64

4.6	Transistoren als Messgleichrichter	65
4.7	Leistungsfähiger Präzisionsgleichrichter	66
4.8	Elektronischer HF-Voltmeter	69
4.9	HF-Spannungsmessung mit logarithmischer Anzeige (Pegelmessung)	69
4.10	Ist ein Verstärker sinnvoll?	72
4.11	Zum Schluss ein Blick zu den Profis	75
	Zusammenfassung	80
<b>5</b>	<b>HF-Strommessung</b>	81
5.1	Indirekte Messung, Variante 1	81
5.2	Indirekte Messung, Variante 2	81
5.3	Stromwandler für Messzwecke	82
5.4	RF current probe	83
5.5	Die Stromzange – die RF current probe des Profis	84
	Zusammenfassung	86
<b>6</b>	<b>HF-Leistungsmessung</b>	87
6.1	Leistung, Spannung und Widerstand	87
6.2	Die drei Arten von Leistung	88
6.3	Spannung und Leistung bei 50 Ohm	89
6.4	Messen an der dummy load	91
6.5	Lineare Anzeige	92
6.6	Mikrowatt und Milliwatt messen	92
6.7	Leistungspegel in Dezibel messen	96
6.8	Sendeleistungen messen	100
6.9	Thermisches – Grundlagen	102
6.10	Thermisches – Schaltungen	103
6.11	Die drei Messprinzipien im „Leistungsvergleich“	106
6.12	Noch ein Wort zur Rauschmessung	107
	Zusammenfassung	109
<b>7</b>	<b>Hochfrequenzmessung</b>	111
7.1	Wie genau?	111
7.2	Praktisches Zähler-Wissen	112
7.3	Tipps zum Messen	115
7.4	Referenzfrequenz – woher?	117
7.5	Vorteiler	119
	Zusammenfassung	124
<b>8</b>	<b>Kapazitäts- und Induktivitätsmessung</b>	125
8.1	Kapazitätsmessung	125
8.2	Induktivitätsmessung	127
8.3	Induktivitätsmess-Zusätze zu DMM und Zähler	129

8.4	Es geht auch mit der Soundcard! .....	131
	Zusammenfassung .....	132
<b>9</b>	<b>Messungen mithilfe eines HF-Generators</b> .....	<b>133</b>
9.1	Für passive Messobjekte .....	133
9.2	Preiswerte HF-Generatoren .....	133
9.3	Resonanzfrequenz bestimmen .....	137
9.4	Schwingkreisgüte ermitteln .....	138
9.5	Filter und Übertrager ausmessen .....	139
9.6	Test von Empfängern .....	139
9.7	Induktivitätsermittlung .....	140
9.8	Impedanzmessung .....	141
<b>10</b>	<b>Was ist, was kann ein Dipper?</b> .....	<b>143</b>
10.1	Dipper und Zähler .....	143
10.2	Anatomisches und Historisches .....	143
10.3	Diplt – eine Innovation .....	145
10.4	Anwendungsmöglichkeiten .....	145
10.5	Auf die Kopplung kommt es an! .....	147
10.6	Einsatzbeispiele ganz konkret .....	148
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>149</b>

## 2 HF-Spannungsmessung mit dem Scope

Die „Handhabung“ eines Oszilloskops sollte dem Leser bekannt sein bzw. nicht schwer fallen. Man muss für eine korrekte Spannungsermittlung eventuell aufpassen, dass man „Kästchen“ (**Div.** von divide, einteilen) nicht mit Zentimetern verwechselt, falls da ein Unterschied besteht. Man wählt die Zeitablenkung am besten so, dass mehrere Perioden dargestellt werden, stellt die Helligkeit gering und die Schärfe groß ein und schiebt mit dem entsprechenden Steller die negativen Spitzen auf einen Strich. Dann kann man die Spitze-Spitze-Spannung am besten ermitteln. Am Vertikal-Steller ist angegeben, wie viel Volt einem „Kästchen“ entsprechen, man multipliziert diese Angabe also mit dem Abstand zwischen den negativen und positiven Spitzwerten. Der Effektivwert ergibt sich für Sinusform nach Teilen durch rund 2,8 (exakt 2,828).

Möglicherweise muss man durch Probieren an den zuständigen Bedienelementen für ein „stehendes“ Bild bzw. ein exaktes Triggern sorgen. Abb. 1 fördert das Verständnis dieses wichtigen Vorgangs.

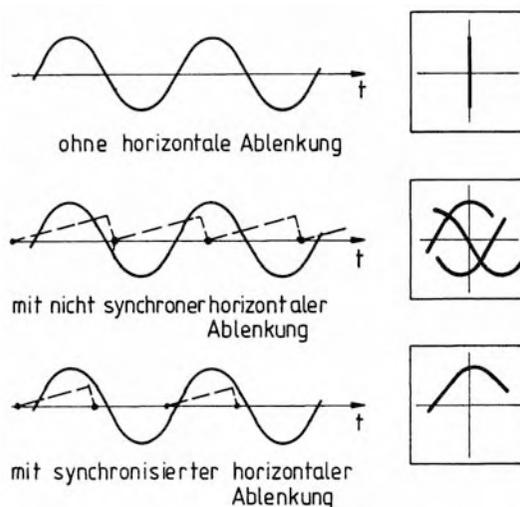


Abb. 1: Zum Verständnis des Triggerns

## 2.1 Grundtypen

Das klassische Scope ist analog, es wird im englischsprachigen Raum auch als **ART** (analog realtime-oscilloscope) bezeichnet. Neben dem Einstrahl-Oszilloskop (Abb. 2) gibt es das Zweikanal-Oszilloskop (ein Strahl wird durch schnelles Umschalten für zwei Kanäle genutzt, s. Abb. 3) und das teurere, aber besser funktionierende Zweistrahl-Scope mit zwei unabhängigen Strahlerzeugungssystemen und zugehörigen Ansteuer-Elektronikeinheiten.

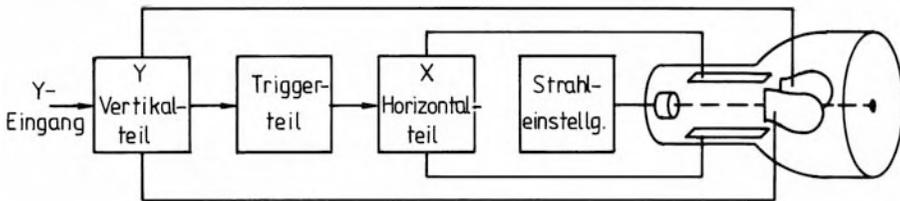


Abb. 2: Aufbau eines analogen Einstrahl-Scopes

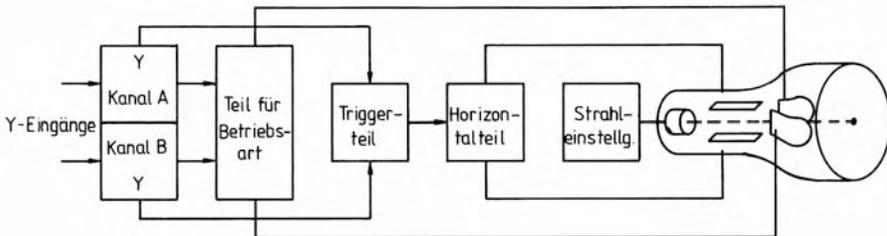


Abb. 3: Aufbau eines analogen Zweikanal-Scopes

Das ART ist ein preiswürdiges und sehr gut für die HF-Messtechnik geeignetes Gerät. Primäres Kriterium für diesen Einsatzbereich ist die Bandbreite. 20 MHz sollten es schon sein, 50 MHz sollten genügen, wenn wir unter „Hochfrequenz“ den Bereich bis 30 MHz verstehen wollen. Die Zweikanal-Ausführung ist für qualifiziertere Messungen sinnvoll, denn sie zeigt direkt und zumindest bei Sinusform sicher Phasenverhältnisse auf.

Zum Ende des letzten Jahrhunderts wurden digitale Oszilloskope immer populärer. Das **Abtasttheorem** besagt, dass ein Signal, das mit doppelter maximaler Signalfrequenz abgetastet wird, perfekt rekonstruiert werden kann. Geht es jedoch nur um Effektiv- und Spitzenwert oder auch Phasenlage, genügt eine kleinere Abtastrate. Bei den digitalen Oszilloskopen wird dies durch verschiedene Techniken ausgenutzt. Es gibt drei Grundtypen:

1. Am häufigsten trifft man das digitale Speicheroszilloskop (**DSO**, digital storage oscilloscope) an. Sein Herz ist ein A/D-Wandler, hinzu kommen Mikroprozessor und natürlich Speicher (storage). Die Arbeitsweise ist seriell. DSOs sind sehr komfortabel, offerieren mehrere Kanäle, Signalspeicherung auch für kurze, einmalige Vorgänge und geben wichtige Werte sofort numerisch aus. Bei diesen Scopes ist die Gefahr von Fehlmessungen jedoch deutlich höher als bei analogen Scopes, denn die Kombinationen von Signalart und Einstellungen sind sehr vielfältig. Auch werden die technischen Eigenschaften nicht so transparent dargestellt wie beim Analoggerät, dort unbekannte Störungen, wie **Aliasing** („umklappen“, „falten“ in Folge der eigentlich zu kleinen Abtastrate), können auftreten.
2. Kurz vor der Jahrhundertwende kam die Firma Tektronix mit einer neuen Scope-Technologie auf den Markt: **DPO**, digital phosphor oscilloscope (Abb. 4). Damit

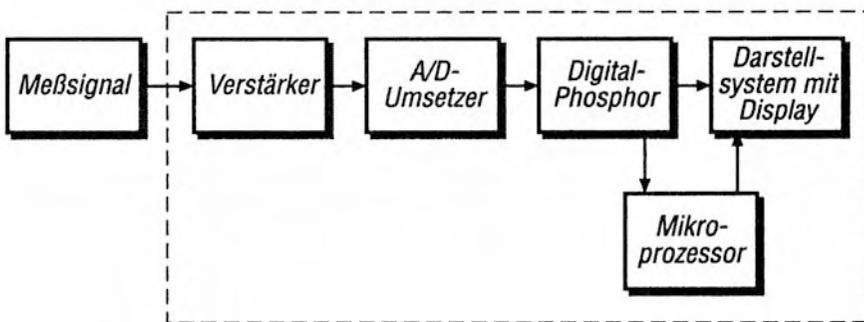


Abb. 4: Baugruppen eines DPOs (Quelle: Funkamateurl)

sollen die Vorteile von analoger und digitaler Technik vereint werden. Die Prozessorarchitektur ist hier meist parallel. Direkt zwischen A/D-Wandler und Bildschirm liegt die Funktionseinheit „digital phosphor“ (Übersetzungsversuch: digitale Ausleuchtung), so dass hier gegenüber dem DSO wesentlich schneller komplette Wellenzüge erfasst und dargestellt werden. Unregelmäßige Störungen, die das DSO „übersieht“, werden hier angezeigt.

- Der dritte Grundtyp ist das Sampling-Oszilloskop (sampling oscilloscope). Der Name kommt von to sample, abtasten. Natürlich tasten auch DSO und DPO ab, jedoch erst nach Verstärkung/Pufferung des Messsignals. Hier jedoch wird dieses (stets an 50 Ohm) direkt abgetastet und darf darum nicht zu groß sein. Dafür erreicht das sampling scope traumhafte Bandbreiten bis in den zweistelligen Gigahertzbereich.

Erwähnt werden muss auch noch das **USB Scope**, ein DSO-Zusatz zum PC mit universal serial bus, der sich sehr gut für die Ausbildung eignet, da man das Bild z. B. über einen Beamer zeigen kann. Die Bandbreite (oft als „Analogbandbreite“ bezeichnet) ist aber noch bescheiden. Als Beispiel sei das u. a. von Reichelt angebotene USB-Mini-Hand-Scope mit 5 MHz Analogbandbreite genannt, das etwa 340 € kostet. Es hat die Form einer etwas größeren Tastspitze, man hält also beim Messen quasi das ganze Oszilloskop in der Hand.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf das analoge Oszilloskop, sind aber zum Großteil auch für digitale Oszilloskope gültig.

## 2.2 Beim Zweikanaler: Chopper- und Alternate-Betrieb

Beim Zweikanal- und Zweistrah-Oszilloskop sind die Bedienelemente des Y-Teils doppelt vorhanden, beim Zweikanaler kommen noch einige Bedienelemente hinzu, die seine zwei möglichen Betriebsarten betreffen.

Dabei unterscheidet man zwischen „Chopper“ (choppy heißt unruhig, unstetig) und „Alternate“. Im ersten Fall springt der Elektronenstrahl sehr schnell zwischen beiden Messsignalen hin und her (Abb. 5). Dieses Verfahren empfiehlt sich daher nicht bei Frequenzen über 1 MHz, da dann eine mehr oder weniger „punktweise“ Abbildung erfolgt. Es ist aber sehr gut geeignet, um Zeit- bzw. Phasenverschiebungen festzustellen.

Für hohe Frequenzen bietet sich der zweite Modus an. Hierbei lässt sich der Elektronenstrahl zwischen den Umschaltungen mehr Zeit, die Umschaltfrequenz reicht jedoch noch aus, dass für das Auge beide Kurven kontinuierlich gleichzeitig erscheinen. Ein Standardwert für die Umschaltfrequenz ist 50 kHz. Diese Betriebsart kann bei niedrigen Frequenzen Nachteile bringen. Eine solche Schwäche zeigt Abb. 6: Es kann durchaus passieren, dass ein wichtiger Abschnitt des Signals „verschluckt“ wird. Außerdem ist es mit der richtigen Darstellung der Phasenlage zwischen beiden Signalen dahin.

Im Prinzip ist es also so, dass die Frequenz der Eingangssignale über den Modus entscheidet: Das Verhältnis von (fester) Umschalt- zu Signalfrequenz legt fest, ob man „choppert“ oder „alternate“ arbeitet.

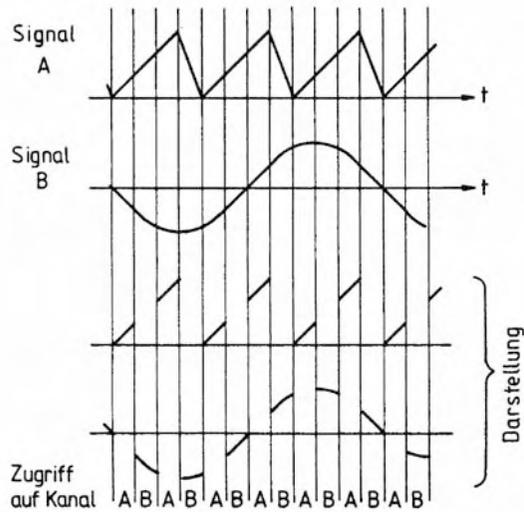


Abb. 5: So funktioniert das Chopper-Verfahren

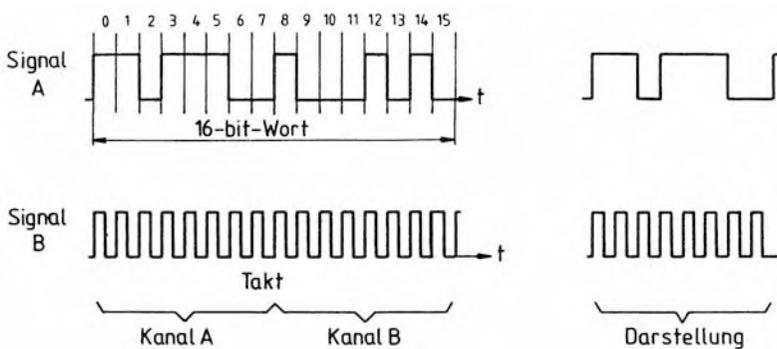


Abb. 6: Bei alternierendem Betrieb können Signalanteile ignoriert werden

## 2.3 Beachtung der Bandbreite

Das wohl wichtigste Merkmal eines Oszilloskops ist seine Bandbreite. In aller Regel ist damit die 3-dB-Bandbreite gemeint. Sie wird im Wesentlichen vom internen Verstärker nach dem Y-Eingang bestimmt und ist hier praktisch identisch mit der oberen 3-dB-Grenzfrequenz, da die untere Grenzfrequenz null (Stellung DC) bzw. sehr gering ist (Stellung AC).

Leider wird oft vergessen, die obere Grenzfrequenz des Scopes zu berücksichtigen. Hat das Signal genau diese Frequenz, wird es um 3 dB, also um rund 29 % zu klein dargestellt! Der abgelesene Spitze-Spitze-Wert bzw. der errechnete Effektivwert müsste zwecks Korrektur mit 1,414 multipliziert werden! Für 1 % Fehler muss die Grenzfrequenz siebenmal höher als die Messfrequenz sein.

Da die Rechnung etwas umständlich ist, wird der Korrekturfaktor in einem Diagramm dargestellt (Abb. 7). Und da der Abfall um 3 dB nur die sinnvolle nominelle Grenze des Einsatzbereichs ist, da die Leistung hier um die Hälfte gefallen ist, wurde das Diagramm bis zur doppelten Grenzfrequenz gezeichnet. Auch bis dorthin kann man das Scope praktisch noch mit guter Genauigkeit benutzen, wenn die Schnelligkeit der Triggerung noch ausreicht und man den erheblichen Korrekturfaktor berücksichtigt! Was gerade in dieser Region noch zu beachten ist: Nur ein Sinussignal erfährt auch jenseits der 3-dB-Grenzfrequenz keine Formveränderung.

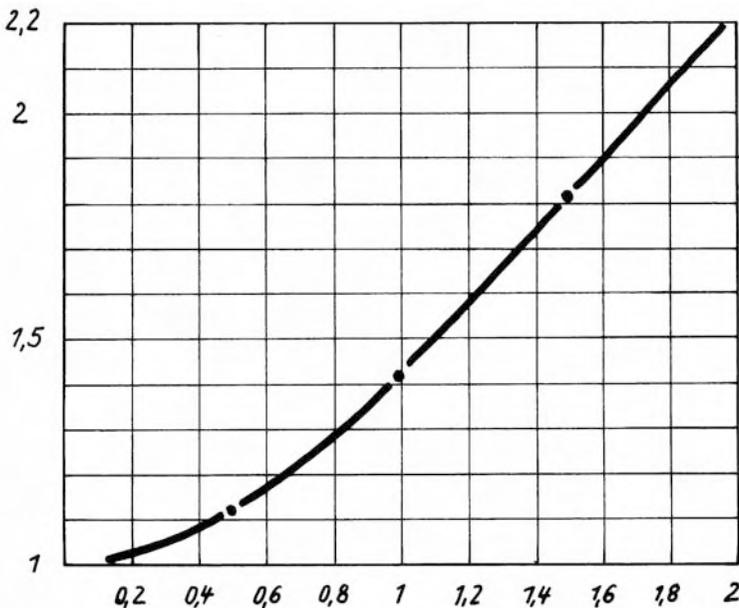


Abb. 7: Korrekturfaktor über der auf die Scope-Grenzfrequenz normierten Messfrequenz. Beträgt diese 0,5 (1, 1,5), ist der Korrekturfaktor rund 1,1 (1,4, 1,8), entsprechend einem zu korrigierenden Messfehler von -10 (29,-45) %.

## 2.4 Nur bei Flanken: Beachtung der Anstiegszeit

Die endliche Bandbreite jedes Scopes bedeutet noch eine weitere Eigenschaft, die aber nur bei Signalen mit steilen Flanken, wie Pulsen (das ist die korrekte Bezeichnung für eine periodische Impulsfolge), zu beachten ist: Je geringer die obere Grenzfrequenz des Scopes, umso weniger ist der Strahl in der Lage, einer steilen Flanke zu folgen. Dies kann bei schmalen Impulsen dazu führen, dass die volle Höhe des Impulses überhaupt nicht mehr dargestellt wird. Es erscheint ein spitzes Dreieck statt eines Rechtecks.

Als **Anstiegszeit** bezeichnet man diejenige Zeit, die verstreicht, während sich eine Flanke von 10 % auf 90 % ihres „Endwertes“ vergrößert. Für die Anstiegszeit eines beliebigen Verstärkers, also auch des Verstärkers in einem Oszilloskop, gilt:

$$t_r = 0,35/f_g$$

$t_r$  ... Anstiegszeit (Index r von to rise, ansteigen)

$f_g$  ... obere 3-dB-Grenzfrequenz

Sinngemäß trifft das auch auf die Abfallzeit zu.

Wir sehen: Für die Anstiegszeit ist lediglich die obere Grenzfrequenz ausschlaggebend, keinerlei andere Größe hat Einfluss, wie man vielleicht zunächst annehmen könnte. Dies bedeutet theoretisch: Ein 10-MHz-Scope stellt eine ideale Flanke so dar, dass im Abschnitt zwischen 10 % und 90 % des Höchstwerts 35 ns ( $0,35/10 \text{ MHz} = 0,035 \mu\text{s} = 35 \text{ ns}$ ) vergehen. Oder ein 50-MHz-Scope stellt eine ideale Flanke so dar, dass sich die Flanke im Bereich von 10 % bis 90 % ihres Höchstwerts 7 ns lang aufbaut. Ist der Impuls im ersten Fall nicht mindestens etwa 50 ns und im zweiten Fall etwa 10 ns lang, wird der Höchstwert gar nicht korrekt dargestellt.

Die ideale Flanke gibt es natürlich nur theoretisch. In der Praxis interessiert, wie groß die Anstiegszeit der Flanken eines am Eingang eines Oszilloskops anliegenden Pulses ist. Wir wollen daher ein wenig vom Thema „Spannungsmessung“ abschweifen und die Formel

$$t_{rF}^2 = t_{\text{mess}}^2 - (0,35/f_g)^2$$

$t_{rF}$  ... Anstiegszeit der Flanke am Scope-Eingang

$t_{\text{mess}}$  ... gemessene Anstiegszeit

vortragen. Wenn wir demnach auf dem Bildschirm eines 10-MHz-Scopes eine Anstiegszeit von 50 ns ermitteln, hat die reale Flanke gemäß

$$t_{rF}^2 = (2.500 - 1.225) \text{ ns}^2 = 1.275 \text{ ns}^2$$

eine Anstiegszeit von 35,7 ns.

## 2.5 Rauschen richtig messen

Manchmal werden mit dem Oszilloskop auch reine Rauschspannungen gemessen, wenn sie eine entsprechende Größe haben, also beispielsweise aus einem Rauschgenerator stammen (zur Erfassung kleiner Rauschspannungen, wie der an Verstärkerausgängen, sind Oszilloskope meist zu unempfindlich). Hier sollte man grundsätzlich anders vorgehen als beim Messen einer Signalspannung: Man schaltet die Horizontalablenkung aus (meist letzte Stellung), erhält also lediglich einen senkrechten Strich auf dem Bildschirm. Nun justiert man Helligkeit und Schärfe so, dass dieser Strich schwach leuchtend und scharf abgegrenzt erscheint (andernfalls spricht man von **blooming**, also „vollem Blühen“, ein Effekt, der die Genauigkeit trübt.). Die Länge des Strichs entspricht dem Spitze-Spitze-Wert der Rauschspannung, teilt man diesen durch 6, erhält man mit guter Genauigkeit den Effektivwert.

Zur Angabe einer Rauschspannung gehört immer die **Rauschbandbreite**, innerhalb derer sie auftritt. Die Rauschbandbreite ist die Breite eines idealen Filters, welches in gemeinsamer zeichnerischer Darstellung die gleiche Fläche aufweist wie der reale Vierpol, in dem das Rauschen auftritt (Abb. 8). Nur bei guten Quarzfiltern sind 3-dB-Bandbreite und Rauschbandbreite praktisch gleich, je weniger ideal die Übertragungskurve des Vierpols über der Frequenz verläuft, umso größer ist die Rauschbandbreite gegenüber der 3-dB-Bandbreite. Diese Abweichung muss man oft abschätzen. Für einfache Filter kann man annehmen:

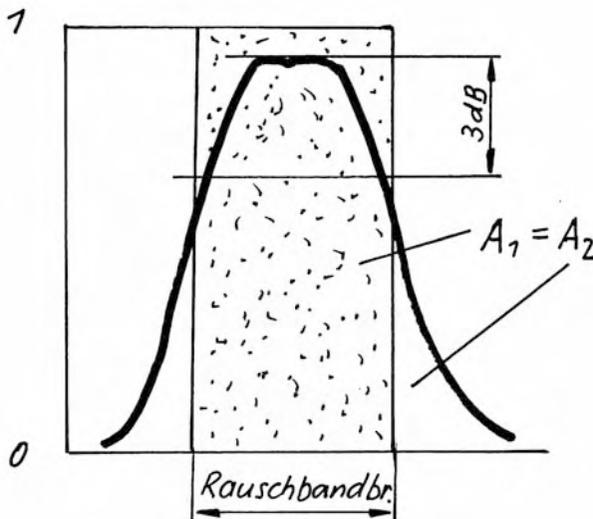


Abb. 8: Zur Definition der Rauschbandbreite

Rauschbandbreite =  $1,25 \times 3\text{-dB-Bandbreite}$

Wird zum Beispiel das Signal eines breitbandigen Rauschgenerators an ein 10-MHz-Oszilloskop gelegt, so kann man von 12,5 MHz Rauschbandbreite ausgehen. Ist der vertikale Stich in Stellung 10 mV/Div. sechs Kästchen hoch, so beträgt der Spitze-Spitze-Wert 600 mV und der Effektivwert 100 mV ( $600 \text{ mV}/6$ ). Man schreibt dann

$$U_n = 100 \text{ mV} / \sqrt{12,5 \text{ MHz}}$$

Der Index n steht für noise (rauschen). Warum das Wurzelzeichen? Wird die Bandbreite halbiert, halbiert sich die Rauschleistung, infolgedessen sinkt die Spannung nur um rund 29 %, denn die Wurzel aus dem Frequenzverhältnis 2 ist 1,414, und die Teilung durch 1,414 bedeutet rund 29 % Rückgang (auf rund 71 %). Halbieren wir also unsere Rauschbandbreite, so werden wir nun statt  $600 \text{ mV}_{\text{SS}}$  nicht  $300 \text{ mV}_{\text{SS}}$  (was einem Viertel der Leistung entsprechen würde, da sich ja auch der Strom halbiert), sondern  $424 \text{ mV}_{\text{SS}}$  ( $600 \text{ mV}_{\text{SS}}/1,414$ ) erhalten.

Üblicherweise bezieht man eine Rauschspannung auf  $\sqrt{1 \text{ Hz}}$ . Um zu dieser Form zu gelangen, müssen wir unseren Messwert wieder durch die Wurzel aus dem Verhältnis von gewünschter Bezugsbandbreite zu Messbandbreite teilen. In beiden Fällen handelt es sich um Rauschbandbreiten.

Die Wurzel aus  $11,5 \text{ MHz}/1 \text{ Hz}$  bzw.  $11.500.000$  ist 3.391. Unsere neue Spannungsangabe ist also  $100 \text{ mV}/3.391 = 0,295 \text{ mV}$ . Wir schreiben

$$U_n = 295 \text{ } \mu\text{V} / \sqrt{1 \text{ Hz}}$$

und haben ein mit anderen Angaben direkt vergleichbares Ergebnis.

## 2.6 Frequenzabhängigkeit des ohmschen Anteils am Scope-Eingangswiderstand

Neben den Einschränkungen, die Grenzfrequenz bzw. Anstiegszeit bedeuten, sollte bei Messungen an mittel- und hochohmigen Punkten auch die Frequenzabhängigkeit des ohmschen Anteils am Eingangswiderstand eines Oszilloskops beachtet werden. Sie wird meist komplett übersehen. Kein Wunder: Zu der typischen Angabe „1 MOhm parallel zu 30 pF“ findet man keine Einschränkung in Bezug auf die Einsatzfrequenz.

Ursache des mit der Frequenz nachlassenden ohmschen Werts ist die Güte des Kondensators, wobei zwei „Wirkmechanismen“ zu nennen sind:

1. Die Güte eines Kondensators fällt in der Regel mit der Frequenz.
2. Der sich aus der Güte ergebende Verlustwiderstand ist indirekt proportional zum Blindwiderstand des Kondensators und somit zur Frequenz.

Um das zu verstehen, betrachten wir Abb. 9. Es lehrt uns nebenbei, dass nur Keramik- und Glimmerkondensatoren geringste Güte versprechen. Aus praktischen Gründen kommt oft nur der „Keramiker“ in Frage, wir nehmen also für unsere Parallelkapazität einen solchen an:

- Q bei 1 MHz etwa 6.000
- Q bei 10 MHz etwa 3.000

Für einen 30-pF-Kondensator ergeben sich als Blindwiderstände:

- $X_C$  bei 1 MHz  $\approx 5,3 \text{ k}\Omega$
- $X_C$  bei 10 MHz  $\approx 530 \text{ }\Omega$

Daraus erhalten wir nun durch Multiplizieren von Q mit dem Betrag von  $X_C$  die (parallelen) Verlustwiderstände:

- $R_V$  bei 1 MHz etwa 32  $\text{M}\Omega$
- $R_V$  bei 10 MHz etwa 1,6  $\text{M}\Omega$

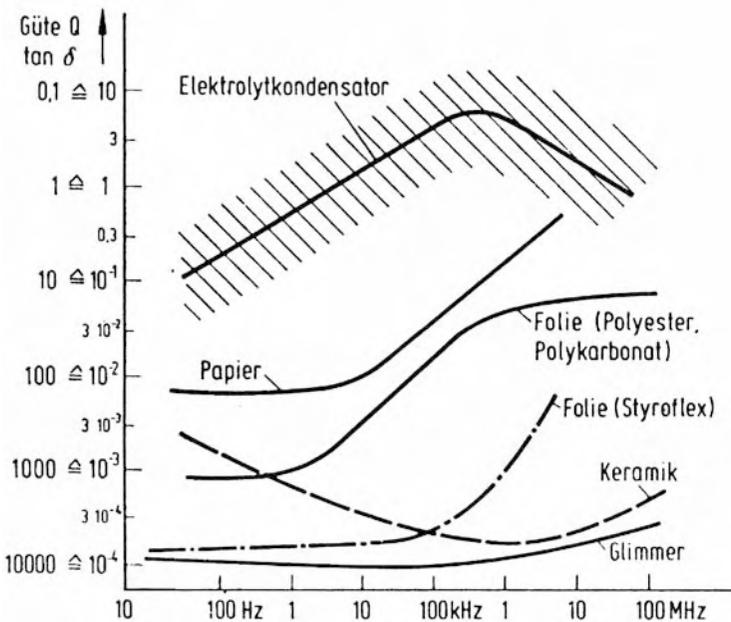


Abb. 9: Durchschnittlicher Güteverlauf verschiedener Kondensatortypen. Der hier oft vorliegende Anstieg des Verlustwinkels bedeutet ein Absinken der Güte (= Kehrwert vom  $\tan$  des Verlustwinkels). Quelle: K. Leucht, Kondensatorenkunde für Elektroniker

Bei 1 MHz ist somit noch der ohmsche 1-MOhm-Widerstand im Teiler dominant. Bei 10 MHz hingegen beträgt nun der gesamte Parallelwiderstand nur noch rund 600 kOhm (1 MOhm parallel 1,6 MOhm).

Das gilt für Direktanschluss der Quelle an die Scope-Eingangsbuchse und ist daher oft nicht die ganze Wahrheit. Denn wird ein Stück abgeschirmtes Kabel mit Buchse oder ein beliebiger Tastkopf benutzt, erhöht sich die nicht ideale Parallelkapazität nennenswert. Damit sinken Blindwiderstand, Güte und Verlustwiderstand weiter.

## 2.7 Frequenzabhängigkeit des ohmschen Anteils am Tastkopf-Eingangswiderstand

Ein oft benutzter Zusatz zum Oszilloskop ist der passive Teilertastkopf 1:10. Er verspricht auf den ersten Blick einen kapazitätsarmen und sehr hochohmigen Eingang und damit die Lösung vieler Messaufgaben. In Wirklichkeit werden die Anwendungsmöglichkeiten jedoch von nicht sofort erkennbaren negativen Eigenheiten überschattet. Weder Hersteller noch Fachbücher weisen ausreichend auf die Tücken der 1:10-Teiler hin, sondern stellen dieses Zubehör oft nur vorteilhaft dar. Der Grundtenor entspricht folgendem Zitat aus diskret verschwiegener Quelle: „Für einwandfreie Anzeigeergebnisse bei hochohmigeren Messspannungsquellen und höheren Frequenzen werden vorzugsweise Tastköpfe eingesetzt. ... Durch die Reihenschaltung der Widerstände ergibt sich ein gesamter Eingangswiderstand von 10 MOhm für die Messspannungsquelle. Die Eingangskapazität von 15 pF des Messverstärkers wird ... auf ein Zehntel, also 1,5 pF, reduziert.“

Das stimmt bei Frequenzen ab rund 1 MHz auf keinen Fall, denn hier machen sich die beim Scope-Eingang erläuterten negativen „Wirkmechanismen“ auf Basis der Kondensatorgüte noch drastischer bemerkbar!

Zur Teiler-Eingangskapazität betrachten wir einmal Abb. 10. Dem Trimmer kann zwecks feinerer Abstimmung ein Festkondensator parallel liegen, wir wollen der

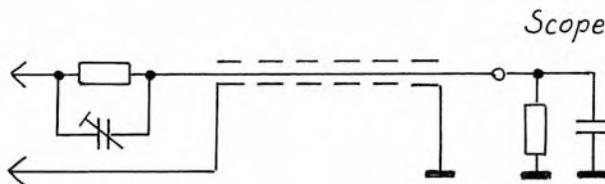


Abb. 10: Grundsaltung des Bereichs „Teilertastkopf am Scope“

# Stichwortverzeichnis

## A

Absorptionsfrequenz 144  
Abtasttheorem 17  
Aliasing 17  
Anstiegszeit 21  
ART 16

## B

Barretter 103  
Betriebsgüte 138  
Blindleistung 88  
Blindwiderstand 28  
blooming 22  
Bolometer 103  
Buschbeck-Messer 101

## C

CAT 7  
Crest-Faktor (Formfaktor, Scheitelfaktor)  
13

## D

Dauerstrich-Modulation 100  
3-dB-Methode 109  
Dezibel 70  
Dioden-Wattmeter 102  
Div 15  
DMM 126  
Doppelzähler 112  
DPO 17  
DSO 17  
Durchgangs-Leistungsmesser 102  
Durchgangskopf 64

## E

echter Effektivwertanzeige 13  
Eichen 13  
ENR 108

## F

Flussspannung 50

## G

Grid-Dip-Meter 144  
Grid-Dipper 144

## H

Harmonische 135  
HF- Messbrücke 142  
HF-Mikrovoltmeter 69  
HF-Millivoltmeter 69

## I

IEC 7  
Impedanz 28

## K

kalorimetrisches Verfahren 103  
Kettengleichrichter 70  
Kompensationsbereich 30  
komplexen Widerstand 28  
Kreuzzeiger-Instrument 101

## L

Leerlaufgüte 138  
Linearisierung 62  
Linkkopplung 147  
Linkleitung 147

**M**

MAD 12

Messem Empfänger 69

**N**

Neper 70

**O**

Oberwelle 135

**P**

Pegel 70

Pegelmesser 70

PEP 101

ppb 113

ppm 111

Primärfrequenznormal 117

**R**

Rauschbandbreite 22

Rauscherhöhungsfaktor 108

Rauschgenerator 109

Rauschmaß 108

Resonanzfrequenzmesser 144

Reziprozähler 112

Richtkoppler 65

Richtungskoppler 65

RMS 12

Röhrenvoltmeter 11

**S**

Samp-ling-Mischer 77

Sampling-Gate 77

Sampling-Vektor-Voltmeter 77

Sampling-Voltmeter 75

Scheinleistung 89

Scheinwiderstand 28

Schleusenspannung 50

Schwellspannung 50

Scope 11

Sekundärfrequenznormal 117

Spitzenleistungsmesser 102

Stehwellen-Messgerät 65

Stoßstelle 34

**T**

TCXO 112

thermischen 103

Thermistor-Leistungsmesser 103

thermoelektrische Leistungsmesser 103

Thermoelement 102

Thermokoppler 102

Thermosensor 102

Thermoumformer 81

Torimpuls 112

Torzeit 112

Transdipper 144

True RMS 13

**Ü**

Übergangsfrequenz 29

Überlagerungs-Vektor-Voltmeter 77

Überschussrauschen 108

USB Scope 18

**V**

Vektor-Voltmeter 77

**W**

Wechselstromwiderstand 28

Wirkleistung 88

**Y**

Y-Faktor-Methode 109

# Elektronik

Frank Sichla

## Hochfrequenz Messpraxis

Bei Entwicklung, Nachbau, Modifizierung oder Reparatur hochfrequenztechnischer Schaltungen und Geräte kommt man um Messungen nicht herum, allerdings hat die Hochfrequenz-Messtechnik diverse Tücken.

Dieses Buch zeigt den optimalen Weg zum richtigen Messergebnis. Dabei wird schnell klar: Ob Spannungs-, Strom-, Leistungs- oder Frequenzmessung – immer geht es im Hochfrequenzbereich ganz anders zu als bei niedrigen Frequenzen.

Die systematische Zusammenstellung der Messverfahren für alle wichtigen Größen im HF-Bereich beruht auf jahrzehntlangender Erfahrung und entspricht dem Wunsch vieler Hochfrequenz- und Funktechniker nach zweckmäßigen und somit auch kostengünstigen Messverfahren.

### Aus dem Inhalt:

- Sicherheit bei HF-Messungen
- Spannungsmessung – Grundlagen
- HF-Spannungsmessung mit dem Scope
- Praktische Tastkopfschaltungen
- HF-Spannungsmessung durch Gleichrichtung
- Durchgangskopf, Richtkoppler und Stehwellenmesser
- Elektronische HF-Voltmeter
- Logarithmische Anzeige (Pegelmessung)
- Hochfrequenz-Strommessung
- HF-Leistungsmessung
- Messen an der Dummy Load
- Mikrowatt und Milliwatt messen
- Leistungspegel in Dezibel messen
- Sendeleistungen messen
- Einfache Verfahren zur Rauschmessung
- Hochfrequenzmessung
- Praktisches Zähler-Wissen
- Kapazitäts- und Induktivitätsmessung
- Messungen mithilfe eines HF-Generators
- Was ist, was kann ein Dipper?

ISBN 978-3-7723-4399-5



9 783772 343995

Euro 19,95 [D]

Besuchen Sie uns im Internet: [www.franzis.de](http://www.franzis.de)

FRANZIS