

Klaus Lipinski

**Moderne
Oszillographen**

**Technik
und
Anwendungen**

UDE-Verlag GmbH · Berlin

Klaus Lipinski
Ing. (grad.)

Moderne Oszillographen

Technik und Anwendungen

VDE-Verlag GmbH, Berlin



© Copyright by VDE-Verlag GmbH, 1000 Berlin 12
Alle Rechte vorbehalten. 1974

Gesamtherstellung: Verlagsdruckerei der VDE-Verlag GmbH,
1000 Berlin 12, Bismarckstraße 33

Inhalt

Seite

7	Einleitung
9	Aufbau von Oszillographen
11	1. Das Vertikalsystem
11	1.1. Übertragungsverhalten des Vertikalsystems (Bandbreite und Anstiegszeit)
13	Das Pulsverhalten
17	Berücksichtigung der Eigenanstiegszeit bei Pulsmessungen
17	Empfindlichkeit und Rauschen
19	Drift
19	Der Eingangswiderstand
20	1.2. Der Vertikalkanal
21	Die Eingangskopplung
21	Der Eingangsteiler und die variable Verstärkungsreglung
22	Die vertikale Lageverschiebung
22	Der „Beam Finder“
23	1.3. Der Mehrkanaloszillograph
25	Betriebsarten von Zwei- und Mehrkanaloszillographen
28	1.4. Die Signalverzögerungsleitung
31	1.5. Tastköpfe
31	Spannungstastköpfe
33	Stromzangen
35	2. Die Kathodenstrahlröhre
35	2.1. Das Elektrodensystem
38	2.2. Das Phosphor-Material
39	2.3. Das Raster
40	2.4. Die Schirmbildphotographie
42	Die photographierbare Schreibgeschwindigkeit
45	3. Das Horizontalsystem
46	3.1. Zeitablenkung
48	3.2. Betriebsarten der Zeitablenkung
48	Gedehnter Zeitmaßstab
48	Die verzögerte Zeitablenkung
49	Die Helltastung
50	Die gemischte Zeitablenkung
51	Triggerbar nach der Verzögerung
53	Digitale Verzögerung
56	Umschaltung zwischen zwei Zeitbasen
57	3.3. Die Triggerung
57	Betriebsarten der Triggerung
59	Triggerquellen und -kopplungen
59	Pegel- und Flankenwahl
59	Empfindlichkeit und Frequenzbereich

4 Inhalt

Seite

61	4.	Der Einschuboszillograph
61	4.1.	Einschuboszillograph mit vier Einschubkanälen
65	4.2.	Alphanumerische Einblendung ins Oszillographenschirmbild
70	4.3.	Digital-Einschübe für Oszillographen
73	5.	Spezialoszillographen und -einschübe
73	5.1.	Der Speicheroszillograph
73		Das bistabile Speicherverfahren
76		Das monostabile Speicherverfahren
78		Das Transfer-Speicherverfahren
80		Anwendungen von Speicheroszillographen
81	5.2.	Der Differenzverstärker
86		Der Kompensationsverstärker
87	5.3.	Der Sampling-Ozillograph
89		Sequentielles Sampling
90		Random-Sampling
93		Realtime-Sampling
95	5.4.	Die Zeitbereichreflektometrie
101	5.5.	Der Spektrumanalysator
105		Die Wobbelung
107	5.6.	Der Großbildoszillograph
108	5.7.	Der Kennlinienschreiber
108		Aufbau und Funktionsweise
110		Anwendungen
111	5.8.	Der computergesteuerte Oszillograph
111		Aufbau und Funktionsweise
116		Anwendungen
119	6.	Anwendungsbeispiele
119	6.1.	Auswertung von Oszillogrammen
120		Amplitudenmessungen
124		Zeitmessungen
128		Phasenmessungen
132	6.2.	Lösungen für besondere Meßprobleme mit Oszillographen
132		Darstellung und Messung einmaliger Signale oder von Signalen mit niedriger Wiederholfrequenz
135		Messung niederfrequenter Signale mit kleinster Signalamplitude
135		Messung an Quellen mit hohem Innenwiderstand und hoher Kapazität
136		Darstellung von verbrummtten oder von Störungen überlagerten Signalen
137		Darstellung von einmaligen Signalen mit unterschiedlichen Ablenkzeiten
137		Darstellung von Signalen, die gegeneinander jittern
139		Messung von Pulsjitter
140		Darstellung von einmaligen Signalen oder Signalen mit geringen Repetierfrequenzen mit hoher zeitlicher Auflösung
141		Bestimmung der Koinzidenz zwischen einmaligen Signalen

Seite

142	Verlängerung der Zeitachse nach dem Rasterverfahren
143	XY-Darstellungen
144	Anwendungen von Sampling-Oszillographen
149	6.3. Spezialanwendungen
149	Messungen mit der Zeitbereich-Reflektometrie
151	Messungen mit Spektrumanalysatoren
155	Kennliniendarstellung und Parametermessung von Bauelementen
162	Schrifttum
165	Erläuterungen der benutzten Formelzeichen
168	Stichwortverzeichnis

Einleitung

Oszillographen (griechisch „Schwingungsschreiber“) haben sich zu ungewöhnlich vielseitigen Hilfsmitteln der elektrischen und elektronischen Meßtechnik entwickelt. Neben der recht bedeutungslos gewordenen Form der Lichtstrahloszillographen, bei denen Spiegelmeßwerke (in Form von Schleifen- oder Spulenschwingern) mit einem Lichtstrahl niederfrequente Schwingungen (10 bis 20 000 Hz) auf lichtempfindlichem Papier aufzeichnen, waren es vor allem die Elektronenstrahl-Oszillographen, denen diese Entwicklung zu verdanken ist. Bereits 1896 erfand der Physiker Karl Ferdinand Braun, der auch die Halbleiter- und die Funktechnik mit begründete, die Kathodenstrahlröhre, die heute noch — in wesentlich verbesserter Form — das „Herz“ jeden Elektronenstrahloszillographen darstellt. In der Mitte der dreißiger Jahre war die Schaltungstechnik mit der Verfügbarkeit geeigneter Bauelemente (1904/1906 erste Elektronenröhren von Fleming und Lieben; 1919/21 Röhrenformel von Barkhausen und Entwicklung von Mehrgitter-Röhren) soweit fortgeschritten, daß Oszillographen industriell hergestellt wurden; es dauerte jedoch noch fast zwanzig Jahre, bis eine heute auf diesem Gebiet führende amerikanische Firma den ersten Meßoszillographen vorstellte [37]. Einige Jahreszahlen sollen einen Überblick über den Fortschritt der Oszillographentechnik geben:

- 1947 erster triggerbarer Oszillograph,
- 1954 erster Einschuboszillograph,
- 1962 erster Speicher-Oszillograph,
- 1967 erster Breitbandoszillograph in Transistortechnik (bis 150 MHz),
- 1971 erster Breitbandoszillograph bis 500 MHz (mit weitgehend integrierter Schaltungstechnik),
- 1973 erster rechnergesteuerter Oszillograph.

Dieser rasche Fortschritt macht es auch für den, der sich täglich mit meßtechnischen Problemen beschäftigt, recht schwierig, mit den neuen Entwicklungen auf dem Laufenden zu bleiben. Gerade der Oszillograph ist das Standardmeßgerät für den Elektroingenieur, da er auf optisch-sinnfällige Weise die physikalischen Vorgänge exakt meßbar veranschaulicht. Die Darstellung der elektrophysikalischen oder auch anderen physikalischen Vorgänge auf dem Bildschirm kommt daher der Denk- und Arbeitsweise des Ingenieurs am besten entgegen: Er kann messen und sieht das, was er mißt, er kann experimentieren und sieht sofort die Auswirkung seines Tuns.

Damit der Anwender moderner Oszillographen, sei es Ingenieur, Physiker, Biologe oder Mediziner die Vielfalt der Möglichkeiten seiner Meßgeräte erkennt und Gebrauch davon machen kann, wurde dieses Buch geschrieben; darin werden die Probleme, Möglichkeiten und Kriterien der modernen Oszillographentechnik und die damit verbundene Meßtechnik beschrieben.

Ziel ist es, dem Leser ein kritisches Beurteilungsvermögen zu geben, daß ihm ermöglicht, meßtechnische Probleme und Grenzen der Einsatzmöglichkeiten bei der Messung mit Oszillographen zu erkennen bzw. auf seine speziellen Anwendungsfälle zu beziehen.

Das Buch ist in drei Teile gegliedert und befaßt sich im ersten Teil (Kapitel 1 bis 3) nach einer kurzen Erklärung der einfachen Prinzipschaltung der Oszillo-

8 Einleitung

graphen, mit allen Faktoren, die das Übertragungsverhalten des Signals und die Darstellung auf dem Bildschirm beeinflussen.

Anschließend folgen zwei Kapitel über moderne Einschuboszillographen und Spezialoszillographen sowie deren Anwendungen. In Kapitel 6 wird dann das vorher beschriebene in praktische Beispiele umgesetzt. In diesem Kapitel werden nach einigen allgemeinen Amplituden- und Zeitmessungen vorwiegend solche Beispiele behandelt, die bestimmte Grenzbedingungen erfüllen oder die vom meßtechnischen her interessant sind. Dem Leser bietet sich auch hier wieder die Möglichkeit, seine eigenen Meßaufgaben auf eines der Beispiele zu beziehen.

Aufbau von Oszillographen

In diesem Kapitel wird kurz auf den Prinzipaufbau und die Wirkungsweise von Oszillographen eingegangen. Die weitere Behandlung der für die Messung wesentlichen Kriterien und deren Zusammenhänge wird in den darauf folgenden Kapiteln erläutert.

Der Oszillograph ist der Funktion nach ein Meßinstrument, das physikalische Größen, in der Amplitude und der Signalform in Abhängigkeit von der Zeit (oder einer anderen physikalischen Größe), als X - und Y -Koordinatenwerte auf einem Oszillographenschirm darstellt, also Funktionen des Typs $Y = f(x)$. Die Y -Koordinate stellt bei der Messung einen absoluten oder relativen Wert einer, in ein elektrisches Signal umgewandelten physikalischen Größe dar.

Die X -Koordinate ist in der Regel eine Zeitfunktion, sie kann aber auch eine zweite physikalische Größe, z.B. eine Weginformation oder eine Frequenzfunktion sein. Dargestellt werden die $Y = f(x)$ -Funktionen auf einer Braun'schen Röhre (Kathodenstrahlröhre). Die Y -Koordinate wird über Vor- und Endverstärker als Spannungswert an die vertikalen Ablenkplatten der Kathodenstrahlröhre gelegt und erzeugt die vertikale, also die Y -Ablenkung. Ist keine X -Ablenkung vorhanden, dann erscheint das Y -Signal als senkrechter Strich auf der Kathodenstrahlröhre. Der Betrag des angelegten Vertikalsignals bestimmt die Länge des Strichs.

Bei dieser Darstellung fehlen die wichtigen Informationen über die Form der Funktion und das Amplitudenverhalten in Abhängigkeit von der Zeit (oder Weg, usw.), also die wichtigsten Aussagen überhaupt.

Diese Aussagen werden durch die zusätzliche Ablenkung in horizontaler bzw. X -Richtung erreicht. Die X -Ablenkung soll bei dieser Betrachtung eine Zeitablenkung sein. Erzeugt wird die X -Ablenkung von einem Signal, das mit der Zeitänderung eine konstante Amplitudenänderung (d.h. eine konstante Änderungsgeschwindigkeit) aufweist.

Dieses Signal ist eine Sägezahn- oder Dreieckfunktion. Die benutzte Sägezahnfunktion wird im Oszillographen erzeugt; sie wird an das horizontale Ablenkplattenpaar der Kathodenstrahlröhre gelegt und lenkt den Elektronenstrahl horizontal ab. Da zwischen dem angelegten Vertikalsignal und dem intern erzeugten Horizontalsägezahn kein Zeitbezug besteht, ist das dargestellte Oszillogramm wegen Durchlaufens nicht erkennbar.

Erst wenn der Horizontalsägezahn einen festen Zeit- und Phasenbezug zu dem angelegten Signal hat, wird das Bild stehen. Diesen Bezug hat man in älteren Oszillographen mit Synchronisierschaltungen hergestellt, bei denen der Horizontalsägezahn mit dem Vertikalsignal synchronisiert wurde. In der heutigen Technik tritt an Stelle der Synchronisierung die Triggerung.

Die Triggerschaltung ist in der Regel ein pegel- und flankenabhängiges Netzwerk, das bei einer vorgegebenen Flanke (z.B. steigende Flanke) und zu einem bestimmten Pegelwert (Komparatorverfahren) einen Auslöse- oder Triggerimpuls auslöst. Der Triggerimpuls startet zu diesem definierten Zeitpunkt den Sägezahnimpuls zur Horizontalablenkung. Nach Ablauf der Horizontalablenkung wird solange kein neuer Sägezahnimpuls gestartet, bis bei einer n -ten Schwingung der gleiche Pegelwert auf der gleichen Flanke erneut einen Triggerimpuls auslöst, der wiederum den Horizontalsägezahnimpuls startet. Je nach Ablaufgeschwindigkeit

des Sägezahns und damit der Zeitfunktion auf dem Oszillographenschirm kann die n -te Schwingung entweder die folgende oder eine beliebig andere sein.

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde stillschweigend davon ausgegangen, daß das Signal auf dem Bildschirm „hell“ dargestellt wird. Die Helligkeit (Lichtemission) wird von Steuerspannungen am Steuergitter oder an der Kathode (Steuerung des Strahlstroms) der Kathodenstrahlröhre in Verbindung mit einer Beschleunigungsspannung im Elektrodensystem erzeugt.

Mit diesen Überlegungen läßt sich der vereinfachte Prinzipaufbau eines Oszillographen (Bild 1-1) zeichnen.

Die Darstellung eines elektrischen Signals auf der Kathodenstrahlröhre wird von vielen Faktoren, wie zeitliche Auflösung, Amplitudenauflösung, dargestellte Helligkeit usw. beeinflußt.

Diese Faktoren sind teilweise wegen physikalischer Gegebenheiten und zum anderen auch von der Anwendung her abhängig voneinander. Beispielsweise sind Bandbreite und Anstiegszeit, Empfindlichkeit und Eingangsimpedanz physikalisch voneinander abhängig; von der Anwendung her gesehen müssen andere Faktoren in sinnvollen Beziehungen zueinander stehen, z.B. Bandbreite und Zeitablenkung, Beschleunigungsspannung und Anstiegszeit. So ist z.B. wenig sinnvoll, einen breitbandigen Oszillographen z.B. mit einer Bandbreite von 100 MHz mit einer „langsamen“ Zeitablenkung von z.B. $1\mu s$ Periodendauer auszustatten, da dadurch das zeitliche Auflösungsvermögen das mit der hohen Bandbreite gegeben ist, wieder eingeschränkt wird. Ähnliches ist für die Beschleunigungsspannung in Abhängigkeit von der Anstiegszeit zu sagen. Ein Pulsoszillograph mit kurzer Anstiegszeit sollte eine hohe Beschleunigungsspannung haben, damit der Pulsanstieg auch bei langsamen Repetierfrequenzen noch sichtbar wird.

Im folgenden sollen die Kriterien mit ihren Abhängigkeiten und Auswirkungen bei Oszillographen erläutert werden.

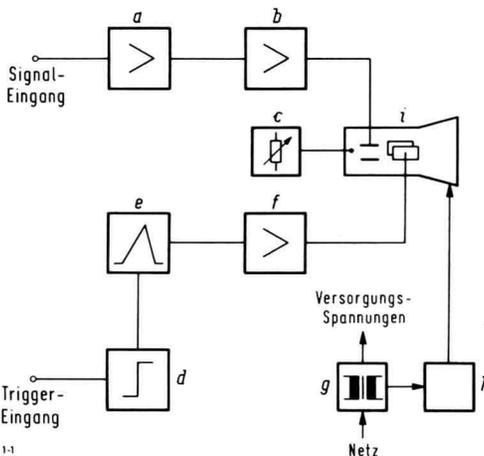


Bild 1-1
 Blockschaltbild für einen Oszillographen.

- a Eingangsteiler mit Vorverstärker
- b Vertikal-Endverstärker
- c Helligkeitssteuerung
- d Triggerschaltung
- e Sägezahngenerator
- f Horizontal-Endverstärker
- g Versorgungseinheit (Netzteil)
- h Hochspannungseinheit
- i Kathodenstrahlröhre

1. Das Vertikalsystem

Das Vertikalsystem – bestehend aus dem Eingangsteiler, dem Vorverstärker, dem Vertikalendverstärker mit der Verzögerungsleitung und dem vertikalen Ablensystem in der Kathodenstrahlröhre – bestimmt das Übertragungsverhalten des angelegten Signals (Bild 1-2) [4] [11].

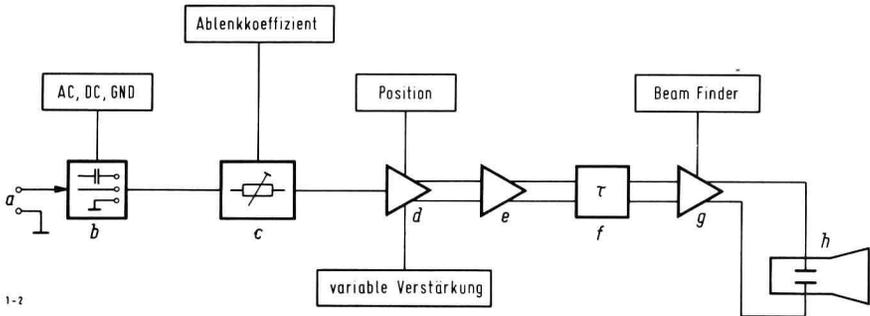


Bild 1–2 Blockschaltbild des Vertikalsystems.

- a* Eingangsbuchse
- b* Eingangskopplung
- c* Eingangsteiler
- d* Vorverstärker
- e* Pufferverstärker
- f* Verzögerungsleitung mit Verzögerungszeit τ
- g* Vertikal-Endverstärker
- h* Kathodenstrahlröhre (mit vertikalen Ablenklplatten)

Das Vertikalsystem hat die Aufgabe, das Eingangssignal an die Ablenkempfindlichkeit der vertikalen Ablenklplatten anzupassen und absolute und relative Amplitudenmessungen zu ermöglichen. Auf die verschiedenen Möglichkeiten der Signalbeeinflussung wird im Kapitel 1.2 eingegangen. Zunächst werden die Kriterien, die das Übertragungsverhalten bestimmen, behandelt.

Typische Kriterien für das Übertragungsverhalten sind die Bandbreite, die Anstiegszeit, die Empfindlichkeit, die Eingangsimpedanz sowie alle in direkter Beziehung stehenden Größen wie Frequenzverhalten, Phasenverhalten, Rauschen und Reflexionsfaktor.

1.1. Übertragungsverhalten des Vertikalsystems (Bandbreite und Anstiegszeit)

Die Bandbreite *b* gibt das Frequenzband an, in dem Signale mit Amplitudenabfällen bis 3 dB dargestellt werden. Da normalerweise die Eingangsstufe sowohl gleich- als auch wechsellspannungsgespeist sein kann (siehe Kapitel 1.2), wird als Bandbreitenwert in der Regel die obere Grenzfrequenz (-3 dB) angegeben. Die untere Frequenzgrenze ist dann 0 Hz oder Gleichspannung.

Für Anwendungen in der Pulstechnik ist die Angabe der Eigenanstiegszeit des Oszillographen von größerer Wichtigkeit als die Angabe der Bandbreite.

12 Das Vertikalsystem

Beide Werte beschreiben die gleiche Eigenschaft und haben einen festen Bezug zueinander. Ein breitbandiger Oszillograph hat kurze Anstiegszeiten, ein Oszillograph mit geringer Bandbreite eine lange Anstiegszeit.

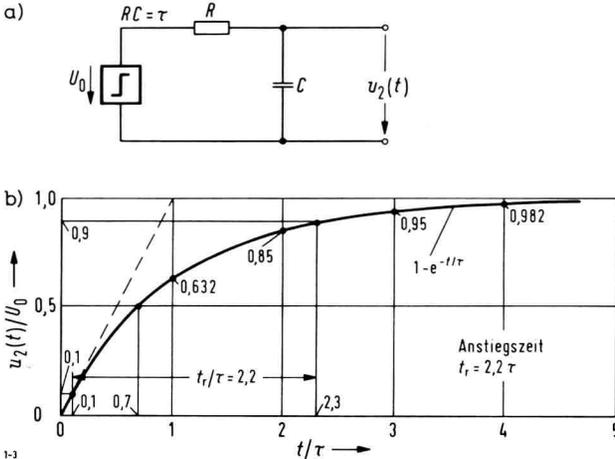


Bild 1-3 Ersatzschaltbild (a) und Ladungskurve (b) für die Bestimmung der Anstiegszeit t_r des Tiefpasses.

Allgemein soll unter der Anstiegszeit t_A die Zeit verstanden werden, in der der Wert einer Funktion (z.B. Strom, Spannung) von 10 % auf 90 % der gesamten Amplitude ansteigt. Betrachtet man das vertikale Übertragungssystem des Oszillographen vereinfacht als RC-Tiefpaß (Bild 1-3), so wird der Anstieg zeitlich nach einer e-Funktion verlaufen, wie [6, 16, 41]:

$$u(t) = U_0 (1 - e^{-t/\tau})$$

mit $\tau = R \cdot C$, U_0 : Spannungswert zu Anfang und t : Zeit. Diese Gleichung läßt sich umformen in

$$e^{t/\tau} = \frac{1}{1 - u(t)/U_0}$$

$$t = \tau \cdot \ln \frac{1}{1 - u(t)/U_0} .$$

Die Anstiegszeit t_A läßt sich damit nach der obigen Definition berechnen zu:

$$t_A = \tau \left(\ln \frac{1}{1 - 0,9} - \ln \frac{1}{1 - 0,1} \right) \approx \tau (2,3 - 0,1)$$

$$t_A = 2,2 \tau .$$

Substituiert man $\omega_g = 2 \pi f_g = 1/\tau$ mit $f_g = b$ als Grenzfrequenz bzw. Bandbreite des Übertragungssystems so ergibt sich

$$t_A = 2,2 \cdot \frac{1}{2 \pi b} = \frac{0,35}{b}$$

oder

$$t_A \cdot b = 0,35.$$

Als Beispiel soll die Anstiegszeit für einen 100 MHz und einen 10 MHz Oszillographen bestimmt werden. Nach der Beziehung $t_A \cdot b = 0,35$ ergeben sich 3,5 ns für den 100 MHz und 35 ns für den 10-MHz-Oszillographen.

Bei diesen Berechnungen sollte berücksichtigt werden, daß es sich um eine Annäherung handelt und daß der Frequenzgang des Übertragungssystems (Polstellen und Frequenzabfall), nicht immer dem RC-Tiefpaß entspricht. Der Wert von $t_A \cdot b$ liegt jedoch fast immer in dem Bereich von 0,32 bis 0,37 [28, 33, 45].

Die Oszillogramme aus *Bild 1-4* sollen das Übertragungsverhalten einer nicht näher definierten Sprungfunktion, die mit verschiedenen Bandbreitenwerten dargestellt wird, verdeutlichen. Die einzige Veränderliche ist in diesem Beispiel die Bandbreite. In dem Oszillogramm ist deutlich zu erkennen, daß durch die kürzere Anstiegszeit bei 150-MHz-Bandbreite (Oszillogramm c) eine wesentlich erhöhte Detail-Auflösung der Sprungfunktion gegenüber der Bandbreite von 30 MHz (Oszillogramm b) erreicht wird. Beim Oszillogramm a wurde das Signal mit einer Bandbreite 1 MHz dargestellt. In diesem Fall — die Eigenanstiegszeit beträgt 350 ns — ist von dem Signal nichts mehr zu erkennen, der Oszillograph stellt nur noch seine Eigenanstiegszeit dar.

Pulsverhalten

Das Pulsverhalten ist nicht nur durch die Anstiegszeit bzw. Abfallzeit des Impulses gekennzeichnet, sondern auch durch Überschwängen, Vorschwingen, Unterschwingen, Dachschräge usw. [11, 28, 37, 39].

Da sich Pulse (Impulsfolgen) nach Fourier oder Laplace von einer Zeitfunktion in eine Frequenzebene mit einzelnen Spektralfrequenzen entsprechender Amplituden zerlegen lassen [6, 41], ist für ein optimales Pulsverhalten zu ersehen, daß die einzelnen Frequenzen in einem konstanten Frequenz- und einem linearen Phasenverhalten zueinander stehen bzw. daß die Laufzeit der einzelnen Frequenzen konstant ist. Bei nichtlinearem Phasenverhalten würden durch den unterschiedlichen Phasenbezug zeitliche Verschiebungen in den Oberwellen entstehen und daraus unsymmetrische Pulsverzerrungen resultieren. Bei nicht konstantem Frequenzverhalten werden bestimmte Oberwellen stärker angehoben oder abgeschwächt, was symmetrische Pulsverzerrungen zur Folge hat [28].

Im *Bild 1-5* sind als Beispiel drei Phasenverläufe mit den zugehörigen Gruppenlaufzeitkurven von einem Übertragungsvierpol (Vertikalverstärker) aufgezeichnet. Wird an den Eingang des Vierpols ein Puls gelegt, der kein Überschwängen, Unterschwingen oder andere Verzerrungen aufweist, dann wird

je nach Übertragungsfunktion b oder c der resultierende Puls mit Verzerrungen behaftet sein.

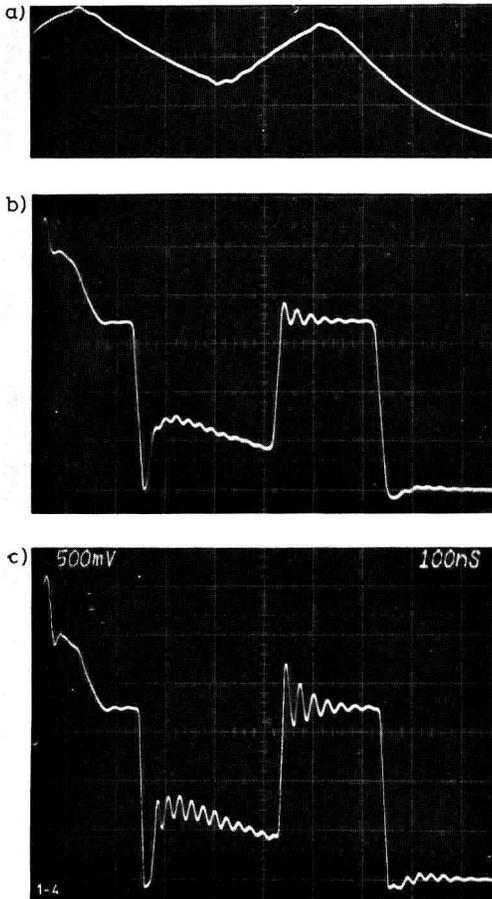


Bild 1-4 Verhalten einer komplexen Funktion bei (a) 1 MHz, (b) 30 MHz und (c) 150 MHz Oszillographenbandbreite; die eingeblendeten Werte beziehen sich auf die Vertikalablenkung (500 mV/Teil) und die Zeitablenkung mit 100 ns/Teil.

Wie die verschiedenen Verzerrungen zu stande kommen und wie sie sich auswirken, zeigt das Beispiel in *Bild 1-6*. In diesem Beispiel wird ein definierter Impuls (a) von einem Vierpol übertragen. Das Übertragungsverhalten des Vierpols ist durch die, mit steigender Frequenz fallende Gruppenlaufzeit und mit dem steigenden Amplitudenverhalten gekennzeichnet. Der Einfachheit halber

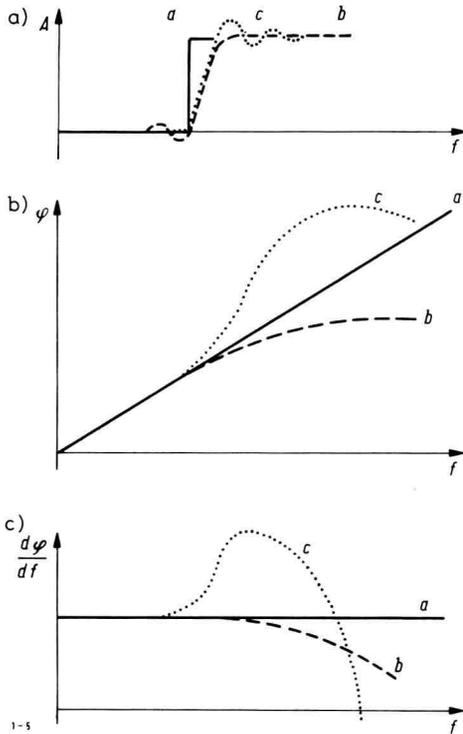


Bild 1—5 Übertragungsverhalten der Vierpole a , b , c für die Sprungfunktion

- a) Zeitlicher Verlauf der Spannungen am Ausgang der Vierpole;
- b) Phasenverhalten;
- c) Gruppenlaufzeit.

wird nur das Verhalten der Grundschwingung f sowie der Oberwellen $3f$ und $5f$ nach Durchlaufen des Vierpols untersucht. Die Grundschwingung f soll gleichzeitig den Phasen- und den Amplitudenbezug festlegen. Die Oberwelle $3f$ wird im Verhältnis zur Grundwelle mit erhöhter Amplitude übertragen ($1/2$ statt $1/3$ bezogen auf die Amplitude des Signals der Frequenz f). Außerdem ist die Laufzeit für diese Oberwelle kürzer, sie läuft also vor. Bei der Oberwelle $5f$ wird das Amplitudenverhältnis und der Vorlauf noch ungünstiger. Die Zusammensetzung der einzelnen Amplitudenwerte ergibt die vom Vierpol erzeugte, stark verzerrte Impulsfunktion (siehe Bild 1-6).

Ein optimales Pulsverhalten wird erreicht, wenn der Frequenzabfall des Vierpols — in der Oszillographentechnik der des Vertikalsystems — der Gauß'schen Verteilungskurve folgt und wenn ein lineares Phasenverhalten vorliegt (Bild 1-7) [3, 33].

16 Das Vertikalsystem

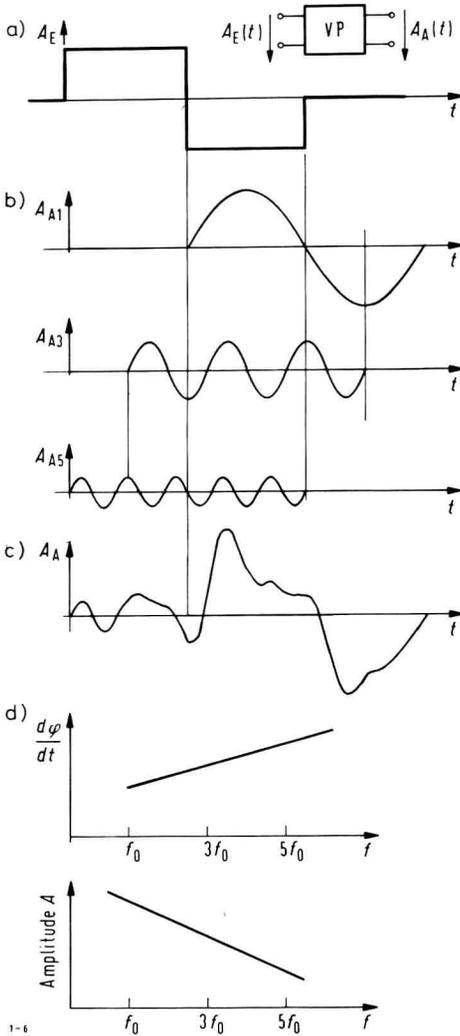


Bild 1-6 Übertragung einer Rechteck-Impulsfunktion mit einem Vierpol.

- Zeitlicher Verlauf der Eingangsspannung am Vierpol;
- Zeitliche Verläufe der Frequenzanteile der Ausgangsspannung am Vierpol;
- resultierender zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung am Vierpol (Addition der Frequenzanteile);
- Gruppenlaufzeit des Vierpols;
- Amplitudenverhalten des Vierpols.