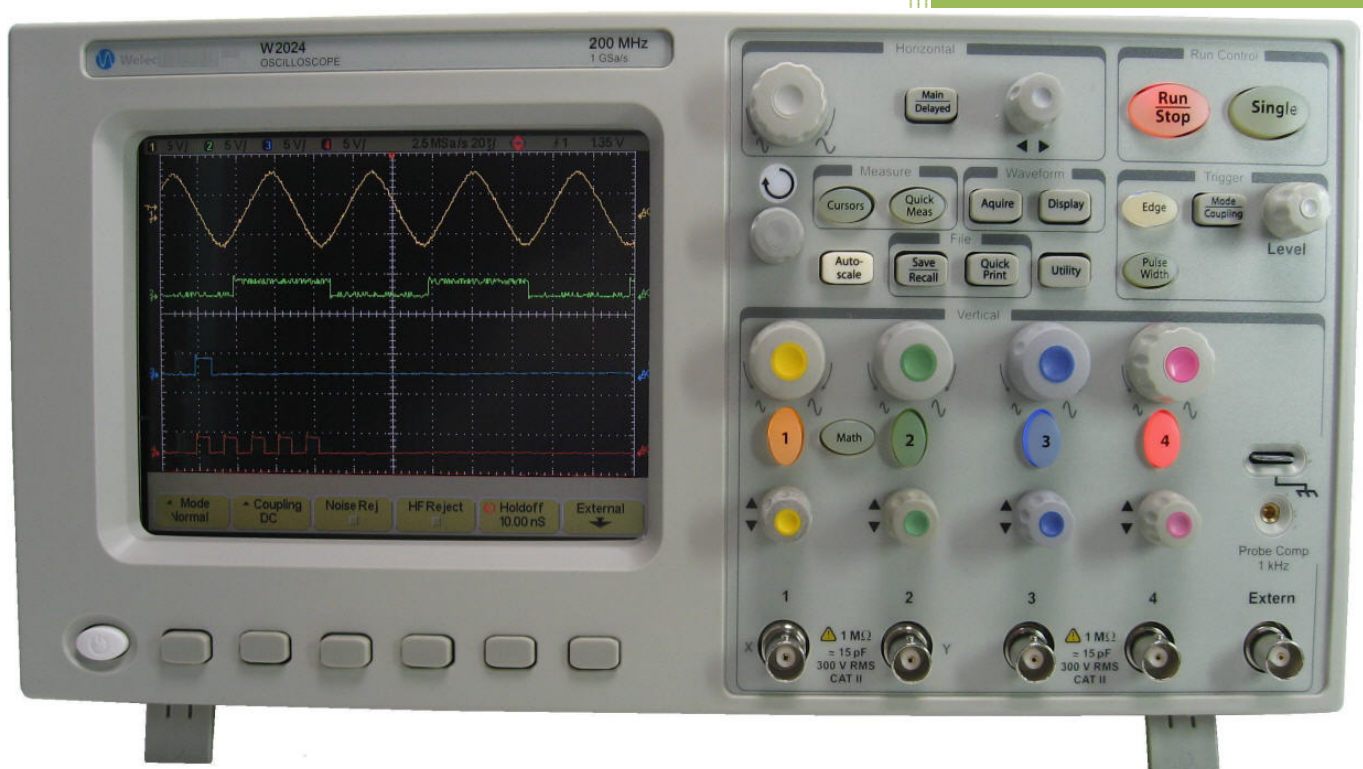


# DSO

## Kriterien für die Auswahl



# Kriterien für die Auswahl eines Oszilloskops

---

## ***Inhalt***

Inhalt.....	- 1 -
Die passende Bandbreite eines Oszilloskops auswählen .....	- 2 -
Welche Bandbreite passt zu meiner Messaufgabe? .....	- 3 -
Der Frequenzgangunterschied.....	- 3 -
Spezifikation der Eigen-Anstiegszeit .....	- 6 -
Die Signal-Anstiegszeiten messen .....	- 7 -
Bandbreite zur Messung von analogen Signalen .....	- 8 -
Sampling- vs. Echtzeit-Oszilloskop – worauf zu achten ist.....	- 9 -
Das Echtzeit-Oszilloskop und das Signal.....	- 10 -
Der Unterschied zu einem Sampling-Oszilloskop .....	- 11 -
Wie sich das Sampling-Oszilloskop triggern lässt.....	- 12 -
Vor- und Nachteile der Oszilloskop-Typen .....	- 14 -

## Die passende Bandbreite eines Oszilloskops auswählen

Die Systembandbreite beschreibt die fundamentale Eigenschaft eines Oszilloskops bei der Signalerfassung – sie entspricht der maximalen Frequenz aller Komponenten eines analogen Signals, die ein Oszilloskop gerade noch erfassen kann.

Während man früher eher die Bandbreite definiert hatte, ist heute für gepulste Signale oder Hochgeschwindigkeitsdatenbusse die maximale Anstiegszeit von größerer Bedeutung. Die Anstiegszeit des Oszilloskops bestimmt die messbare, kürzeste Anstiegszeit von Signalen. Anzeige

Die Anzahl der analogen und digitalen Eingänge bestimmen den Einsatzzweck eines Oszilloskops. Neue Verbindungen zwischen der digitalen und analogen Welt ermöglichen neue Diagnosemöglichkeiten. Die Genauigkeit der Kanäle spielt für Konformitätstests eine zunehmende Rolle.

Die Abtastrate eines Oszilloskops ist vergleichbar mit der Auflösung oder der Anzahl der Pixel eines Bildes. Es bestimmt die maximal erfassbare Frequenzkomponente eines Signals und wie viele Details von der Wellenform durch das Oszilloskop aufgenommen werden können. Weiterhin beeinflusst die Abtastrate die Genauigkeit der Messung.

Die Speichertiefe bestimmt die Anzahl der Punkte in einer vollständigen Signalaufzeichnung. Ein Oszilloskop kann nur eine begrenzte Anzahl von Abtastwerten speichern und begrenzt damit bei gegebener Abtastrate die maximale Dauer einer Signalaufzeichnung.

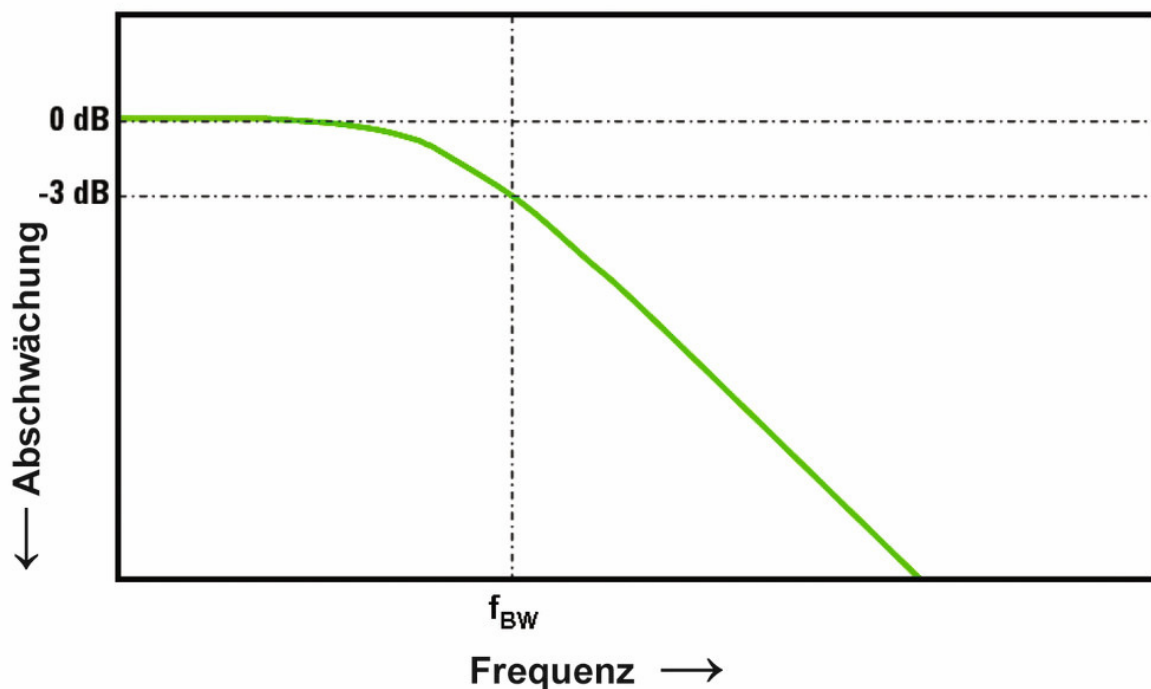


Bild 1a: Oszilloskop mit einem Gaußschen-Frequenzgang bei  $f_{BW} < 1$  GHz

# Kriterien für die Auswahl eines Oszilloskops

---

## Welche Bandbreite passt zu meiner Messaufgabe?

Bandbreite ist die wichtigste Spezifikation bei der Selektion eines Oszilloskops. Passt das Scope zu meiner jeweiligen Messaufgabe? Alle Oszilloskope weisen im Prinzip einen Frequenzgang wie ein Tiefpassfilter auf. Allerdings unterscheiden sie sich darin, wie der Frequenzgang ab der -3 dB-Grenze abfällt. Die meisten Sopes mit einer Bandbreite  $> 1$  GHz weisen einen steileren Abfall auf. Scopes mit einer Bandbreite  $< 1$  GHz haben ein Gaußsches Verhalten, was bedeutet, dass sie bereits ca.  $1/3$  ihrer Bandbreite vor dieser -3dB-Grenze die Eingangssignale dämpfen (roll-off).

## Der Frequenzgangunterschied

Breitbandigere Oszilloskope ( $> 1$  GHz) weisen einen möglichst flachen Frequenzgang bis kurz vor diesem -3dB-Punkt auf, um dann sehr schnell abzufallen (Bild 1). Der Frequenzgangunterschied wird für weitere Überlegungen noch eine wichtige Rolle spielen. Ein Oszilloskop hoher Bandbreite ( $> 1$  GHz) kann wesentlich genauere Messungen der Puls-Flankensteilheit durchführen als der andere Oszilloskop-Typ, sofern die Signale und deren Signalfrequenzanteile innerhalb der Bandbreite fBW liegen. Haben beide Oszilloskop-Typen die gleiche Bandbreite, so weist das Oszilloskop mit dem Gaußschen Verlauf eine schnellere Eigen-Anstiegszeit auf, sofern in der Nähe der Bandbreite fBW gemessen wird, da die höheren Frequenzanteile nicht so stark gedämpft werden.

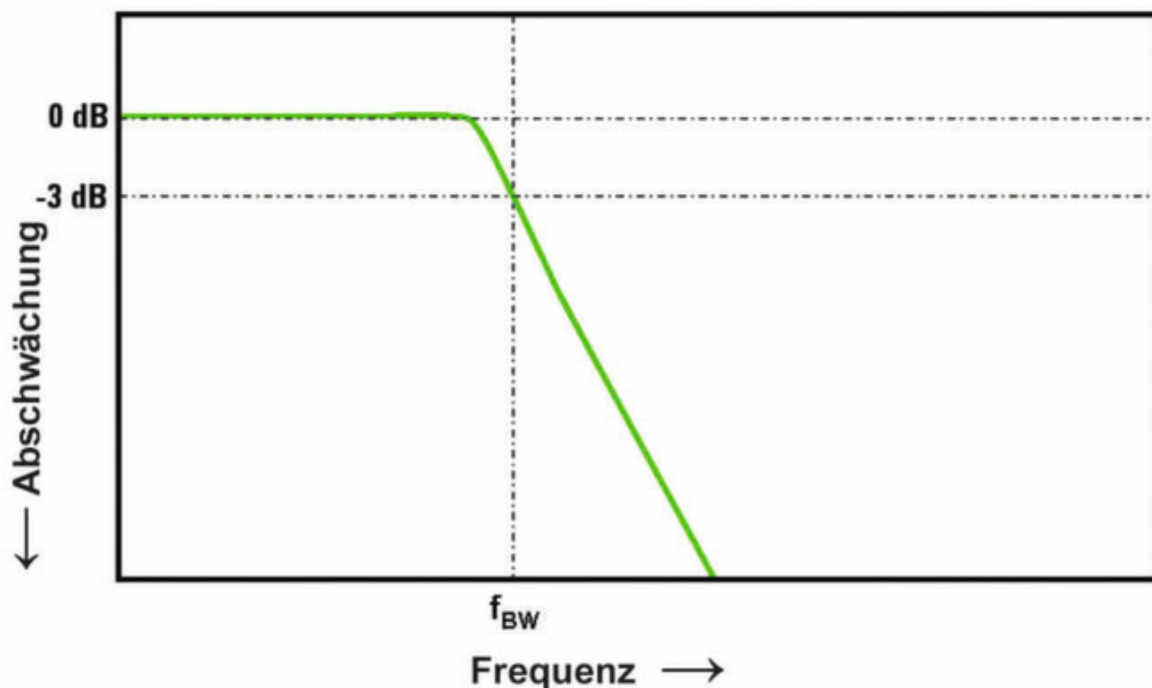


Bild 1b: Typischer Frequenzgang eines Oszilloskops mit einer Bandbreite  $f_{BW} > 1$  GHz.

## Kriterien für die Auswahl eines Oszilloskops

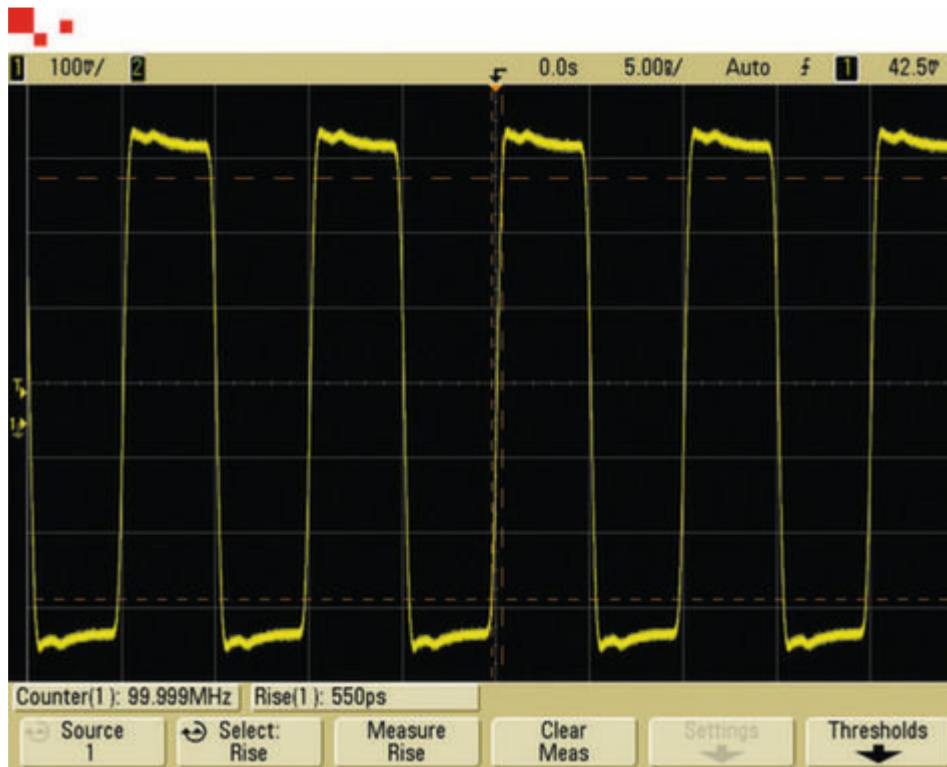


Bild 2: Ein 100-MHz-Rechteck aufgenommen mit dem Oszilloskop MSO7104B und einer Bandbreite von 1 GHz.

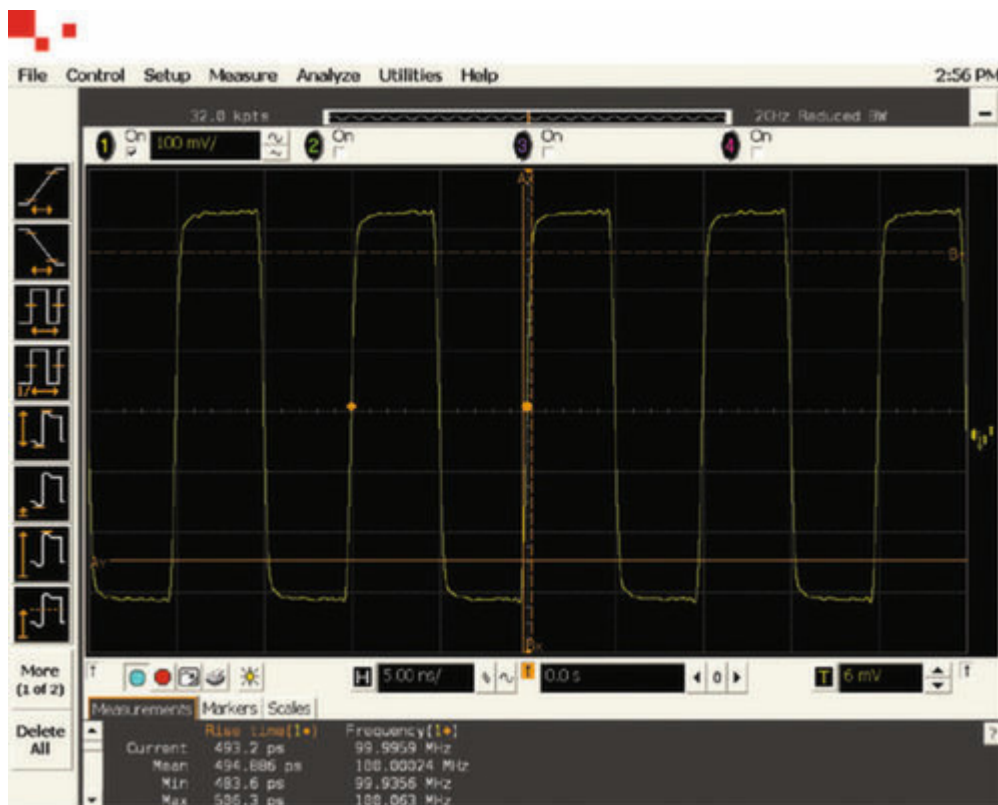


Bild 3: Ein 100-MHz-Rechteck aufgenommen mit dem Agilent DSO80204B mit 2-GHz-Bandbreite.

## Kriterien für die Auswahl eines Oszilloskops

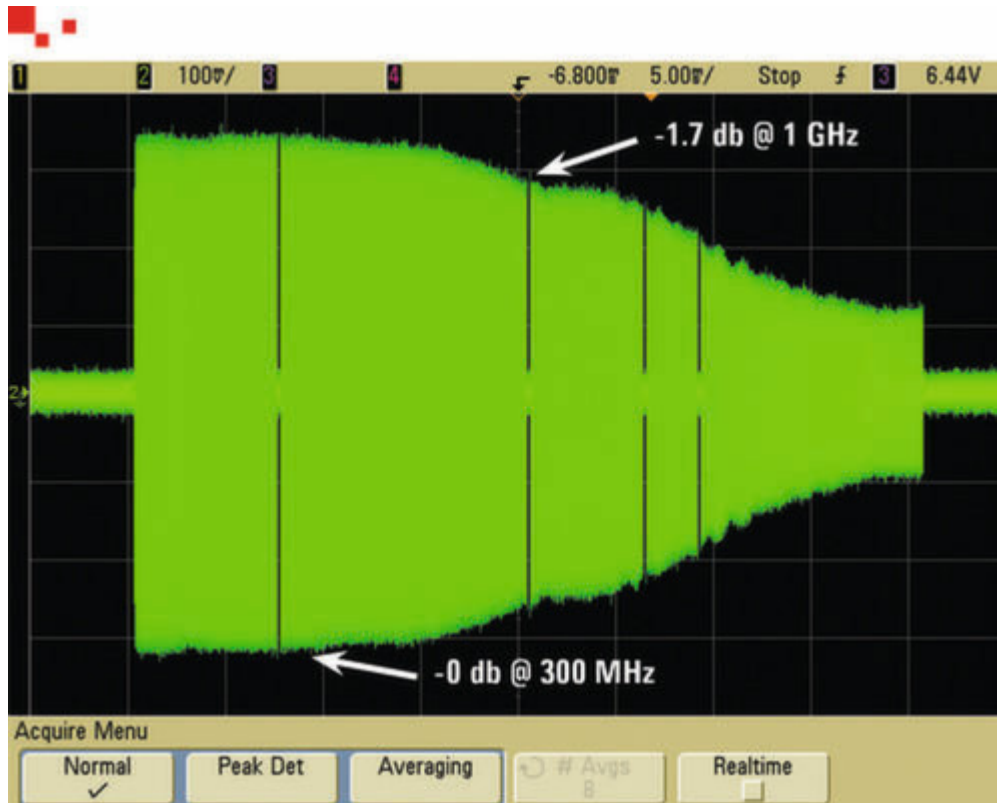


Bild 4: Frequenzgang des Oszilloskops MSO7104B mit spezifizierter Bandbreite von 1 GHz.

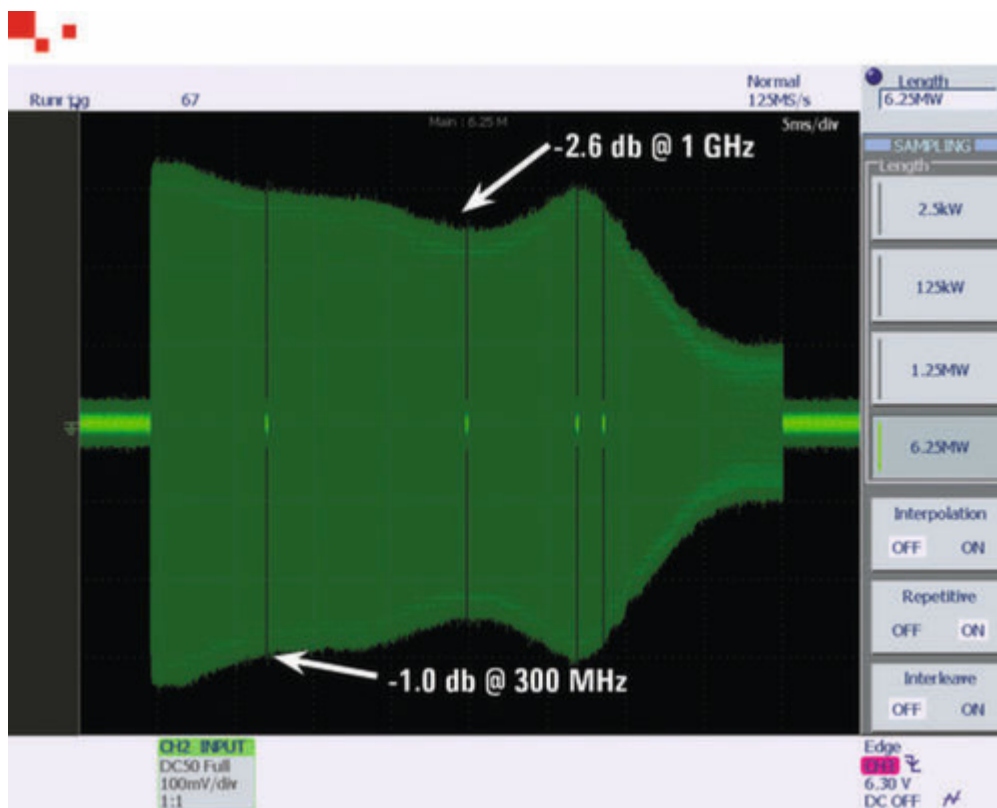


Bild 5: Oszilloskop eines anderen Herstellers mit einer angegebenen Bandbreite von 1,5 GHz.

## Kriterien für die Auswahl eines Oszilloskops

<b>Berechnete Oszilloskopbandbreite</b>		
<b>Geforderte Genauigkeit</b>	<b>Oszilloskop mit Gauß'schem Frequenzgang</b>	<b>maximal flacher Frequenzgang</b>
20%	$f_{BW} = 1.0 \times f_{knee}$	$f_{BW} = 1.0 \times f_{knee}$
10%	$f_{BW} = 1.3 \times f_{knee}$	$f_{BW} = 1.2 \times f_{knee}$
3%	$f_{BW} = 1.9 \times f_{knee}$	$f_{BW} = 1.4 \times f_{knee}$

Tabelle: Die errechnete und benötigte Oszilloskopbandbreite in Abhängigkeit von der geforderten Messgenauigkeit, der zu messenden Signal-Anstiegszeit mittelbar durch  $f_{Knee}$  und dem Frequenzgang-Typs des Oszilloskops.

Andererseits ist es oft nützlich höhere Signal-Frequenzanteile zu unterdrücken, um das Aliasing zu vermeiden, um damit auch dem Nyquist-Kriterium  $f_S = 2 \times f_{MAX}$  zu genügen. Egal welchen Frequenzgang nun das Oszilloskop aufweist – der -3 dB-Punkt legt definitionsgemäß die Bandbreite des Oszilloskops fest. Dies bedeutet aber, dass Frequenzanteile bei dieser Bandbreitenfrequenz bereits mit ca. 30% geringerer Amplitude angezeigt werden bzw. in die Messung eingehen. Dies führt dazu, dass keine genauen und aussagekräftigen Ergebnisse erwartet werden können, wenn die zu messenden Signale bedeutende Frequenzanteile in der Nähe der Oszilloskop-Bandbreite aufweisen.

### **Spezifikation der Eigen-Anstiegszeit**

In gleichem Zusammenhang mit der Oszilloskop-Bandbreite ist auch die Spezifikation der Eigen-Anstiegszeit des Oszilloskops zu sehen. Scopes mit der Gaußschen Übertragungsfunktion weisen eine Anstiegszeit (10 bis 90%) von ca.  $0,34 / f_{BW}$  auf, während bei den anderen Oszilloskop-Typen die Anstiegszeit (10 bis 90%) mit  $0,4 / f_{BW}$  gerechnet werden darf – wobei dieses natürlich von der Schärfe des Knicks im Frequenzgang abhängt.

Es ist allerdings auseinander zu halten: Die Eigen-Anstiegszeit des Oszilloskops ist der Wert, der auf dem Display zu sehen wäre, wenn das Eingangssignal eine theoretische Anstiegszeit von 0 ps aufweisen würde. Die Spezifikation der Eigen-Anstiegszeit eines Oszilloskops lässt sich nicht direkt messen, da es keinen Pulsgenerator gibt, der eine Anstiegszeit von 0 ps liefert. Allerdings lässt sie sich abschätzen, wenn man Eingangsimpulse hat, die 3 bis 5 mal schneller als die Eigen-Anstiegszeit des Oszilloskops ist.



# Kriterien für die Auswahl eines Oszilloskops

---

## Die Signal-Anstiegszeiten messen

Als Daumenregel kann man aufstellen: Die Oszilloskopbandbreite sollte 5-mal der Taktfrequenz des schnellsten zu messenden Signals entsprechen, dann ist das Scope in der Lage die 5. Harmonische des Taktsignals zu erfassen. Und damit lässt sich ein Rechteck-Signal als solches auf dem Bildschirm erkennen. Anders sieht es aus, wenn man die Signal-Anstiegszeiten messen will. In diesen Anstiegszeiten „stecken“ die hohen Frequenzanteile und die oben genannte Daumenregel beinhaltet nicht die hohen Frequenzanteile, um die schnellen Flankenzeiten auszumessen.

Welche Bandbreite muss denn nun ein Oszilloskop aufweisen, wenn man bestimmte Flankensteilheiten messen will? Howard W. Johnson führt in seinem Buch „High Speed Digital Design – A Handbook of Black Magic“ eine  $f_{knee}$ -Frequenz ein, die abhängig von der Anstiegszeit (Abfallzeit) ist. Alle schnellen Signalflanken haben eine unbegrenzte Anzahl an Frequenzanteilen in ihrem Spektrum. Dennoch, so zeigt er, gibt es einen Knick, bei eben diesem  $f_{knee}$ , wonach höhere Frequenzanteile nicht mehr signifikant sind, wenn eine Genauigkeitsgrenze einkalkuliert wird.

$$f_{knee} = \frac{0,5}{t_r} \dots und \dots f_{knee} = \frac{0,4}{t_r}$$

Die Hilfs-Formel für die Praxis

Die Formel wird für Genauigkeiten von 10 bis 90% und von 20 bis 80% benutzt. Dabei ist  $t_r$  die Anstiegszeit des Signals, das gemessen werden soll. Es ist also nicht mit der Eigen-Anstiegszeit des Oszilloskops zu verwechseln. Mit der Hilfsformel kann dann auf die notwendige Bandbreite des Oszilloskops geschlossen werden, wenn eine entsprechende Genauigkeit zu Grunde gelegt wird (Tabelle). Soll ein Rechteck-Takt von 100 MHz mit einer Flankensteilheit von 500 ps, was nach obiger Gleichung  $f_{knee} = 1$  GHz (10 bis 90%) vermessen werden, so kann mit einem Oszilloskop mit einer Bandbreite von 100 MHz nur die Grundwelle dargestellt werden, die zudem noch näherungsweise einer Sinuskurve entspricht.

Wird ein Oszilloskop mit 500 MHz gewählt, so kann noch die 2. Harmonische mit  $f = 5 \cdot 100$  MHz des Rechtecksignals vom Oszilloskop erfasst werden. Die gemessene Anstiegszeit liegt dann bei 750 ps. Die Messung der Anstiegszeit ist also nicht genau und es wird in etwa die Anstiegszeit des Oszilloskops mit 700 ps angezeigt. Wird ein Oszilloskop mit einer Bandbreite von 1 GHz verwendet, verbessert sich die Messung der Anstiegszeit auf 550 ps, was einer Genauigkeit von 10% entspricht. Um die Anstiegszeit auf 3% genau zu messen, ist ein 2 GHz-Oszilloskop notwendig.



# Kriterien für die Auswahl eines Oszilloskops

---

Damit ist die Vorgehensweise zur Bestimmung der Bandbreite eines Oszilloskops zur Lösung der jeweiligen digitalen Messaufgabe klar:

- Kürzeste Anstiegszeit bestimmen oder schätzen, die es zu messen gilt.
- $f_{Knee}$  nach obiger Formel bestimmen.
- Je nach Typ des Oszilloskops und der geforderten Messgenauigkeit die geforderte Bandbreite nach Tabelle bestimmen.

## ***Bandbreite zur Messung von analogen Signalen***

Lange Zeit galt die Regel, dass eine dreifache Bandbreite der maximal zu messenden Signalfrequenz für ein Oszilloskop ausreichend ist. Das gilt allerdings nur für analoge, annähernd sinusförmige Signale und nicht für digitale. Mit einem Sweep eines Generators von 20 MHz bis 2 GHz mit konstanter Ausgangsamplitude kann die Bandbreite und der Einfluss des Frequenzgangs des Oszilloskops gezeigt werden – beispielsweise das MSO7104B von Agilent mit 1 GHz. Der Frequenzgang ist bis 1 GHz flach und das Eingangssignal wird um 1,7 dB abgeschwächt, obwohl nach der Bandbreitendefinition für Oszilloskope eine Abschwächung von 3 dB erlaubt wäre.

Für Messungen an analogen Signalen sollte immer in dem recht flachen Bereich des Scope-Frequenzgangs gemessen werden. Bei 1/3 bis 2/3 der spezifizierten Bandbreite haben viele Oszilloskope einen flachen Frequenzgang.

## Sampling- vs. Echtzeit-Oszilloskop – worauf zu achten ist

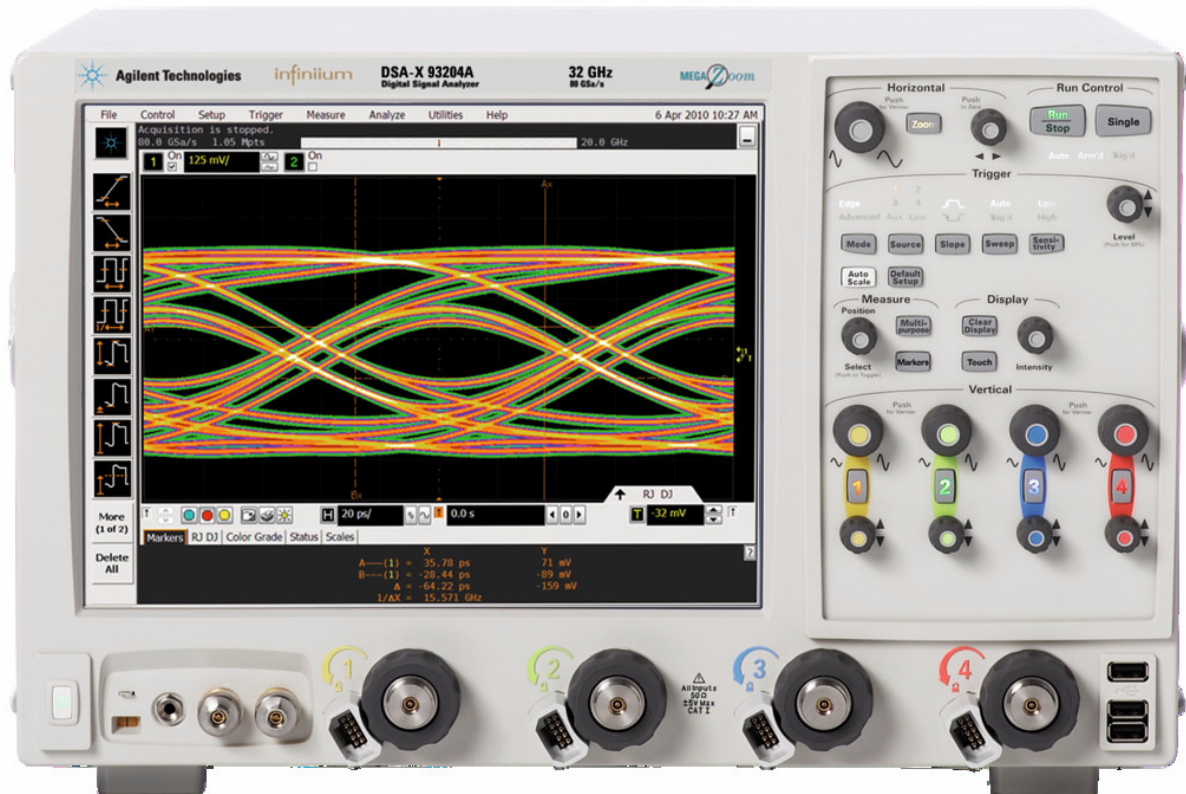


Bild 6: Echtzeit- oder Sampling-Oszilloskop: Das DSA-X 93204A von Agilent ist ein Sampling-Scope, dessen Display ein Augendiagramm zeigt.

Die Wahl des richtigen Oszilloskop-Typs ist nicht nur eine Frage der nötigen Bandbreite, sondern auch eine Frage, welchem Fehler man in einem System auf der Spur ist. Wählt man den falschen Oszilloskop-Typ, so können Fehler retuschiert werden. Das bedeutet, dass man ihn nicht einmal erkennt.

Auch mit den heutigen hochperformanten Systemen ist diese Entscheidung nicht immer klar. Es wird aufgezeigt, wie sich die Signalaufnahme und -verarbeitung unterscheiden und welche Fehlerarten sich am Besten mit welchem Oszilloskop-Typ beobachten bzw. finden lassen. Dazu sind nicht nur die unterschiedlichen Signalaufnahmen zu beachten sondern auch der Trigger-Verarbeitung kommt wesentliche Bedeutung zu.

## Das Echtzeit-Oszilloskop und das Signal

Oft wird ein Echtzeit-Oszilloskop auch als sogenanntes Single-Shot-Oszilloskop bezeichnet. Zu einer definierten Triggerbedingung wird eine Signal-Aufnahme und -Digitalisierung gestartet und in zeitäquidistanten Abständen eine jeweilige Signalprobe aufgenommen, digitalisiert und in den Speicher geschrieben. Je kürzer die Folge der einzelnen Abtastungen ist, desto originalgetreuer kann das Signal auf dem Bildschirm dargestellt werden. Das bedeutet eine hohe Anzahl an Signalpunkten, die während einer Signalerfassung aufgenommen und verarbeitet werden müssen, bis der Speicher voll geschrieben ist.

Diese Art der Datenerfassung erfordert einen sehr schnellen Analog-Digital-Wandler, wobei die Abtastrate die Aufeinanderfolge der Abtastzeitpunkte definiert, während die Speichertiefe die Anzahl der darstellbaren Messpunkte auf dem Display bestimmt. Und damit liegt schon eine Randbedingung fest: die Abtastrate muss deutlich höher sein wie die Frequenz des zu messenden Signals. Bei heutigen Echtzeit-Oszilloskopen liegt die Samplerate bei einem Wert von 80 GSa/s, mit der Signale mit einer Bandbreite von 63 GHz erfasst werden können.

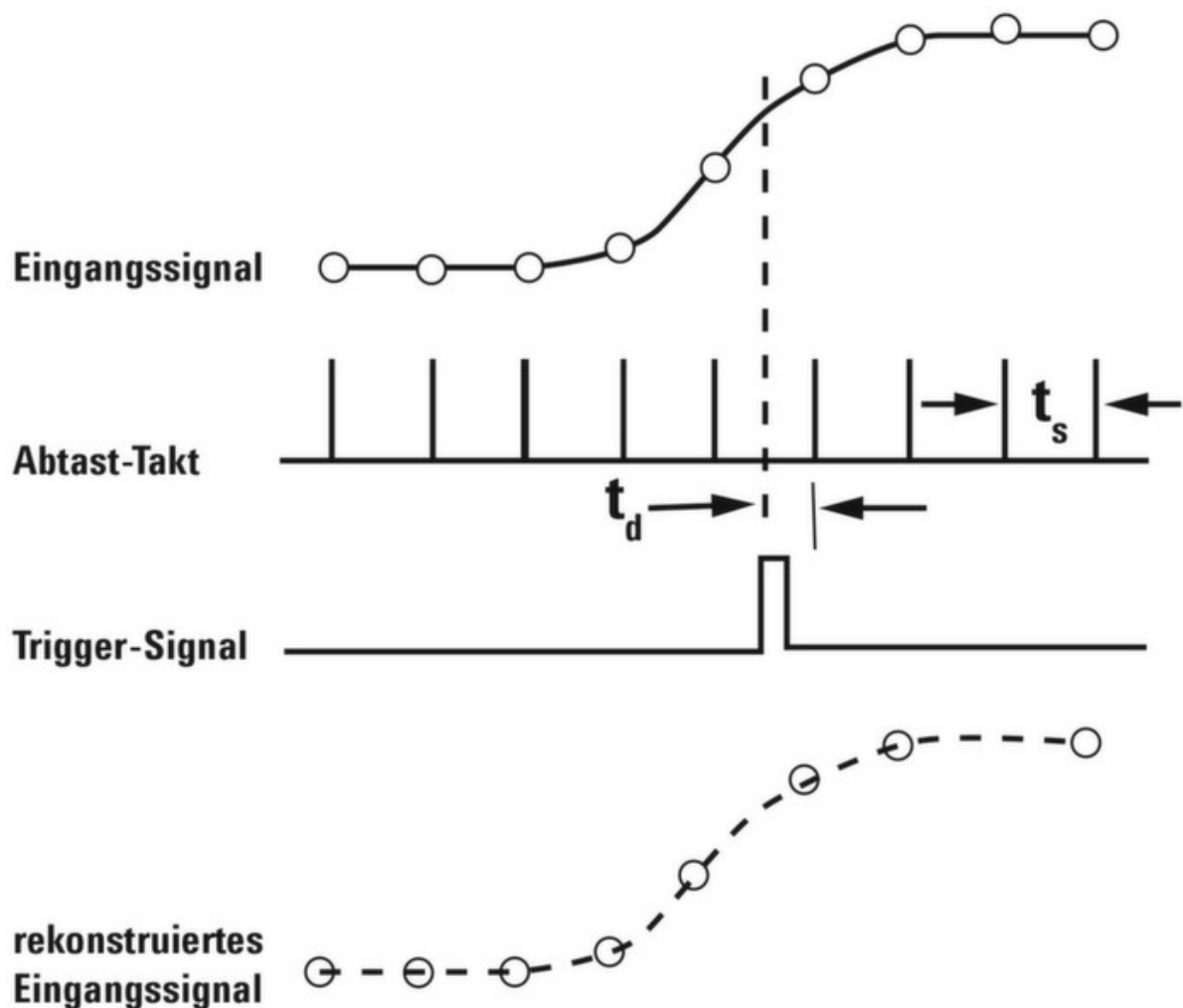


Bild 7: Ablauf einer Signalerfassung bei einem Echtzeit-Oszilloskop;  $t_d$  = Zeitverzögerung (Delay) zwischen dem Trigger-Schwellwert und dem ersten Abtastpunkt;  $t_s$  = Zeitdauer zwischen zwei Samplingzeitpunkten.

## Kriterien für die Auswahl eines Oszilloskops

Bei einem Echtzeit-Oszilloskop kann die Triggerung durch das Signal selbst erfolgen, wenn die Triggerbedingungen zuvor definiert sind. In den meisten Fällen wird ein Trigger ausgelöst, wenn die Amplitude eines Signals einen bestimmten Schwellwert erreicht hat. Das ist dann der Zeitpunkt an dem das Oszilloskop unkorreliert und asynchron zur Datenrate des Eingangssignals die Messwertaufnahme startet, wobei die Abtastrate von einem internen Taktgenerator bestimmt wird. Der zu diesem Zeitpunkt aufgenommene Signalwert wird digitalisiert und im Speicher abgelegt. Danach erfolgt die nächste Datenaufnahme (Bild 7).

### Der Unterschied zu einem Sampling-Oszilloskop

Bei diesem Oszilloskop-Typ wird im Gegensatz zu den Echtzeit-Oszilloskopen pro Trigger-Ereignis nur ein Amplitudenwert des Eingangssignals digitalisiert. Wird das Trigger-Ereignis ein weiteres Mal ausgelöst, so wird jeweils zum darauffolgenden Abtastzeitpunkt ein kleines Zeitinkrement dazu addiert. Dieses Vorgehen führt dazu, dass für  $n$  Abtastzeitpunkte auch  $n$  Zyklen des Eingangssignals benötigt werden, um das Eingangssignal zu digitalisieren und auf dem Display zu reproduzieren. Die Messbandbreite wird durch die Bandbreite der Abtasteinheit bestimmt, die derzeit bei über 80 GHz liegt.

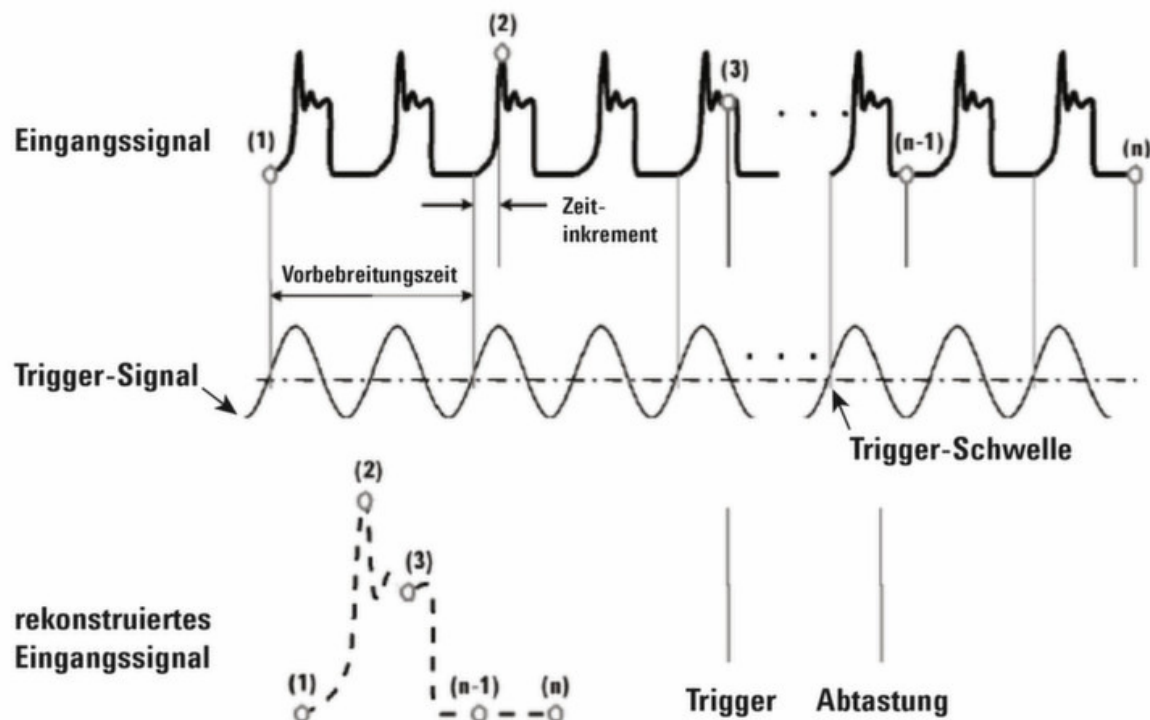


Bild 8: Abtastung eines Signals mit einem Sampling-Oszilloskop.

# Kriterien für die Auswahl eines Oszilloskops

Es besteht ein wesentlicher Unterschied zwischen der Triggerung bei einem Sampling- und bei einem Echtzeit-Oszilloskop. Und der wichtigste Unterschied ist, dass für das Sampling-Oszilloskop ein expliziter Trigger notwendig ist. Denn dieser Trigger wiederum muss synchron mit dem Eingangssignal erfolgen. Typischer Weise wird der Trigger von Seiten des Anwenders zur Verfügung gestellt in selteneren Fällen kann der Trigger aus einem Modul zur Taktwiederaufbereitung herrühren. Der Messablauf geht folgendermaßen von Statten: Ein Triggerereignis initiiert eine Abtastung des ersten Wertes. Danach bereitet sich das Oszilloskop auf das zweite Triggerereignis vor, wobei diese Zeitspanne der Vorbereitung ungefähr 25 µs dauert.

Trifft das zweite Triggerereignis ein, wird eine Abtastung vorbereitet, die aber um ein Zeitinkrement später erfolgt wie beim vorigen Abtastereignis. Das Zeitinkrement wird bestimmt durch die am Oszilloskop eingestellte Zeitsbasis und durch die Anzahl der am Display dargestellten Punkte. Dieser Prozess läuft so lange weiter, bis der Speicher für eine Signaldarstellung auf dem Display voll ist (Bild 8).

## Wie sich das Sampling-Oszilloskop triggern lässt

Es gibt zwei Möglichkeiten ein Sampling-Oszilloskop zu triggern, was sich in unterschiedlichen Darstellungsformen widerspiegelt. Es ist einmal die Darstellung einer Bitfolge zum anderen die Augendiagramm-Darstellung.

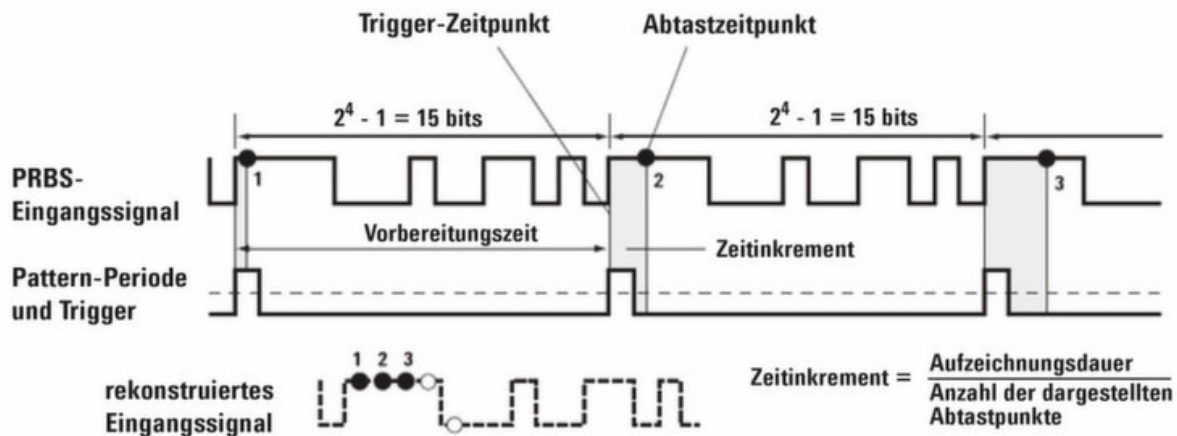


Bild 9: Abtast-Prozess eines periodischen Bitstromes mit dem Sampling-Oszilloskop.

Bei der Darstellung einer Bitfolge kann der Anwender die Abhängigkeit des Bitmusters im System verfolgen. Der Trigger muss nur einmal pro Periode des Bitmusters erfolgen und muss sich für die nachfolgenden Bitmusterperioden an derselben relativen Stelle des Bitmusters befinden (Bild 9).

# Kriterien für die Auswahl eines Oszilloskops

Die andere Darstellungsart ist das sogenannte Augendiagramm, welches kein periodisches Signal erfordert. Es wird typischer Weise zur Messung von Jitter, Verzerrungen und zur Beurteilung der Signalqualität eingesetzt. Das Augendiagramm bietet einen statistischen Überblick der System-Performance denn es legt unabhängig vom Bitzustand die einzelnen Pulse und Pulsfolgen übereinander. Der notwendige Trigger ist ein zum Bitstrom synchroner Takt. Bei jedem Trigger-Event, der auf die Vorbereitungszeit folgt, wird das Signal abgetastet und alle möglichen Kombinationen von „0“ und „1“ werden übereinander gelegt.

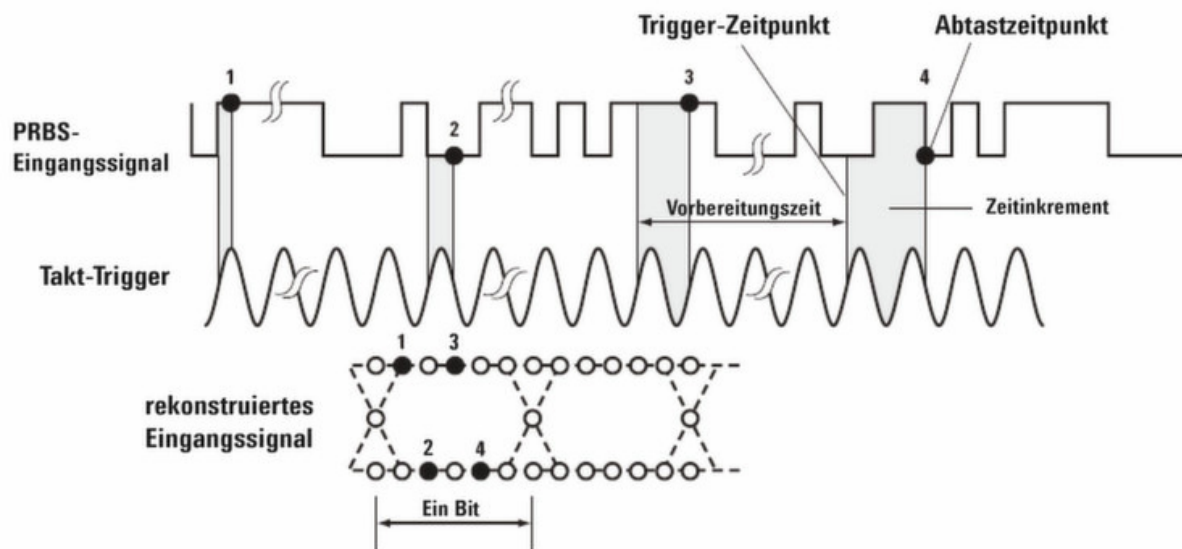


Bild 10: Sampling-Prozess bei der Darstellung eines Augendiagramms mit dem Sampling-Oszilloskop.

Sowohl die Signaltaktrate als auch Bruchteile davon können als Trigger-Signal genutzt werden. Ist allerdings die Signal-Bitfolgenlänge ein Vielfaches der Taktfolge, so wird nur ein Teil der Bitfolge für die Darstellung des Augendiagramms genutzt. Der fehlende Teil geht verloren und kann zur Beurteilung nicht herangezogen werden. Wird der Datenstrom als sein eigener Trigger verwendet, so mag das Augendiagramm als komplett erscheinen. Das Augendiagramm wird beispielsweise nur mit positiven Flanken des Datenstromes auf das Display geschrieben. Das ist zu vermeiden, um genaue Augendiagramm-Messungen durchzuführen.

In Bild 10 ist der Triggerprozess für ein Augendiagramm durch ein Sampling-Oszilloskops dargestellt. Das Bild am Anfang des Beitrags zeigt das DSA-X 93204A, dessen Display ein Augendiagramm zeigt. Auffällig bei diesem Augendiagramm ist, dass es Signalzustände gibt, die nicht die übliche Signalthöhe beziehungsweise nicht ganz auf den 0-Pegel gehen. Das Auge wird kleiner und schmaler. Für ein Übertragungssystem wird es schwieriger, die Signalzustände eindeutig nach Zeit und Amplitude zu interpretieren. Ein Augendiagramm lässt sich erzeugen, indem softwaremäßig aus dem abgetasteten Signal ein Takt regeneriert oder ein externer Takt zugeführt wird. Das aufgenommene Signal wird in gleich lange Teile aufgeteilt, entsprechend einer ganzen Anzahl an Taktperioden. Die gleichlangen Signaleile werden auf dem Display übereinander gelegt.

# Kriterien für die Auswahl eines Oszilloskops

---

## ***Vor- und Nachteile der Oszilloskop-Typen***

Für das Echtzeit-Oszilloskop sprechen:

- Es ist möglich, einmalige oder sehr selten vorkommende Transienten darzustellen
- Es wird bei solch einem Gerät kein expliziter Trigger benötigt
- Es muss kein periodisches Eingangssignal vorliegen
- Messungen des Jitters sind Zyklus für Zyklus möglich
- Es sind lange Aufzeichnungen des Eingangssignals möglich und nur abhängig von der Speichergröße
- Sehr gut geeignet zum Erkennen von singulären oder seltenen Signalereignissen und Signal-Fehlabweichungen

Für das Sampling-Oszilloskop sprechen:

- Eine geringere Abtastrate erlaubt eine höhere Amplitudenauflösung beim Analog-Digital-Konverter
- Höhere Bandbreite
- Geringerer Eigenjitter
- Das Sampling-Oszilloskop kann sowohl mit rein elektrischen Eingängen als auch mit optischen Eingängen bestückt werden.
- Ist typischer Weise ein günstigeres Investment.