

IX Kalibrierung von und mit Oszilloskopen

IX Kalibrierung von und mit Oszilloskopen	1
IX.1 Kalibrierverfahren	2
IX.1.1 Kalibrierumfang	2
IX.1.2 Kalibriernormale und Verfahren	2
IX.1.3 Kalibrierung der Vertikalablenkung	3
IX.1.4 Kalibrierung der Horizontalablenkung	5
IX.1.5a Bestimmung der Bandbreite ≤ 100 MHz	6
IX.1.5b Bandbreite > 100 MHz	7
IX.1.6a errechnete Anstiegszeit	7
IX.1.6b Anstiegszeitkalibrierung mit schnellen Pulsen	8
IX.2 Messunsicherheitsbudgets	8
IX.2.1 Vertikale Ablenkeinheit über AC/DC-Kalibrator oder kalibrierten Oszilloskopkalibrator	8
IX.2.2 horizontale Ablenkeinheit an Sinusgenerator oder Oszilloskopkalibrator	9
IX.2.3a Bestimmung der Bandbreite ≤ 100 MHz (hochohmig und 50Ω)	10
IX.2.3b Bestimmung der Bandbreite > 100 MHz, siehe IX.2.5.3	11
IX.2.4a Errechnung der Anstiegszeit	11
IX.2.4b Bestimmung der Anstiegszeit mit schnellen Pulsen („Fast Edge“)	12
IX.2.5 Kalibrierung am Oszilloskopkalibrator	13
IX.2.5.1 Vertikalablenkung, s.a. IX.2.1	13
IX.2.5.2 Horizontalablenkung	13
IX.2.5.3 Bandbreite am Oszilloskopkalibrator	13
IX.2.6 Bandbreite > 6 GHz über Powersplitter und HF-Leistungsmessung	14
IX.2.7 HF-Stromstärke – Oszilloskopstromzangen	15
IX.2.8 Zeitbasiskalibrierung von Digital-Sampling Oszilloskopen (DSO)	17
IX.3 Kalibrierung am Samplingoszilloskop (Oszilloskop als Normal)	20
IX.3.1 Ablenkung (horizontal / vertikal)	20
IX.3.2 Anstiegszeitkalibrierung ohne Korrektion der Systemanstiegszeit	21
IX.3.3 Anstiegszeitkalibrierung von Pulsen mit Korrektion der Systemanstiegszeit	22
IX.4 Kalibrierung mit schnellen Pulsen	24
IX.4.1 Bestimmung der Anstiegszeit von schnellen Pulsen („Fast Edge“-Generatoren)	24
IX.4.1.1 Messunsicherheitsbudget	26
IX.4.1.2 Ergebnisse	28
IX.4.1.3 Verifikation	28
IX.4.2 Bestimmung der Anstiegszeit von Oszilloskopen	29
IX.4.2.1 Messunsicherheitsbudget	31
IX.4.2.2 Ergebnisse	31

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am:07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	1 von 1

IX.1 Kalibrierverfahren

IX.1.1 Kalibrierumfang

Die Kalibrierung von Oszilloskopen gliedert sich die Bereiche: Kalibrierung von
Vertikalsystem (Amplitude)
Horizontalsystem (Zeitbasis)
Bandbreite (Anstiegszeit)

IX.1.2 Kalibriernormale und Verfahren¹

Bereich	Bedingung	Impedanz	Verfahren / Normal	Rückführung / QMH	
Vertikal	5 mV bis 200 V	DC	1 MΩ	Kalibrator Fluke 5700A	DKD direkt, Sinussignale Kapitel II
	22 mV bis 200 V	45 Hz bis 20 kHz			
	5 mV bis 200 V	DC bis 10 kHz	1 MΩ oder 50 Ω	Oszilloskopkalibrator Tektronix CG5001 Tektronix CG5010 Fluke 5500A-SC300 Fluke 5500A-SC600 Wavetek 9500B / 9530 Fluke 9500B / 9560	HP 3458A, Kapitel IV.1 (DC) und Kapitel IV.3 (AC), Rechtecksignale
Horizontal	25 ps bis 50 ns	Sinussignale	Zeitmarken in 1 MΩ oder Sinus in 50 Ω	Halbperioden am Sinusgenerator R&S SMP04	Normalfrequenz- synchronisation an DCF77 Empfänger, Kapitel VIII
	150 ps bis 2 s	Sinussignale		Sinusgenerator R&S SME / SMT03 Marconi 2031	
	0,5 ns bis 5 s	Zeitmarken		Oszilloskopkalibrator Tektronix CG5001 Tektronix CG5010	
Horizontal	2 ns bis 5 s	Zeitmarken oder Sinussignale	1 MΩ oder 50 Ω	Oszilloskopkalibrator Fluke 5500A-SC300 Fluke 5500A-SC600	Normalfrequenz- synchronisation an DCF77 Empfänger, Kapitel VIII
	180 ps bis 55 s			Oszilloskopkalibrator Fluke 9500B / 9560	
	450 ps bis 55 s			Oszilloskopkalibrator Wavetek 9500B / 9530	
Frequenzgang und Bandbreite	20 kHz bis 100 MHz	0,2 V bis 1 V	1 MΩ oder 50 Ω	T-Abgriff R&S URV5-Z7	Kapitel XIII.2.5
	20 kHz bis 550 MHz	0,1 V bis 1 V		Oszilloskopkalibrator Tektronix SG5030	Kapitel XIII.1.6
	20 kHz bis 1100 MHz	0,1 V bis 3 V		Oszilloskopkalibrator Wavetek 9500B / 9530	
	20 kHz bis 6 GHz	0,1 V bis 3 V	50 Ω	Oszilloskopkalibrator Wavetek 9500B / 9560	Kapitel XIII.2.5
	20 kHz bis 18 GHz	0,1 V bis 2 V		Powersplitter R&S NRV-Z51	
	20 kHz bis 26,5 GHz	0,1 V bis 2 V		Powersplitter R&S NRV-Z55	DKD direkt, Kapitel IX.2.5.4, Kapitel II
Anstiegszeit	60 ps bis 1 ms		1 MΩ oder 50 Ω	Pulsgenerator / Oszilloskopkalibrator	IX.4.1 – High BW Sampling Scope

Tabelle IX.1, Kalibrierverfahren und Rückführung

Eine Abschätzung der Anstiegszeit wird durch die Bandbreitenmessung möglich oder die Kalibrierung mit schnellen elektrischen Pulsen (Kapitel IX.4). Die vorgestellten Messmethoden gelten sowohl für Analogoszilloskope (AO) als auch für Digitalspeicheroszilloskope und Digitalsamplingoszilloskope (DSO).

¹ Die jeweils besten Verfahren sind der Anlage der Akkreditierung und den Ergebnissen der Messunsicherheitsberechnungen zu entnehmen.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am: 07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	2 von 2

Analog-Oszilloskope (Elektronenstrahlröhren)	digitale Oszilloskope (Elektronenstrahl) mit Cursor	Sampling-Oszilloskope mit Cursor	Sampling-Oszilloskope mit Measurement- Funktion	typ. MU
Vertikalsystem (Amplitude)				
alle Kanäle bei 1 M Ω	alle Kanäle bei 1 M Ω	alle Kanäle bei 1 M Ω	alle Kanäle bei 1 M Ω	0,5 %
alle Kanäle bei 50 Ω	alle Kanäle bei 50 Ω	alle Kanäle bei 50 Ω	alle Kanäle bei 50 Ω	
Angabe in 5,00 SKT	Cursormessung in mV oder V		Measurement „Amplitude“ in mV oder V	
Horizontalsystem (Zeit)				
CH1, alle Zeitbereiche Angabe in 8,00 SKT	CH1, alle Zeitbereiche Aussteuerung 8 SKT Angabe in ns, μ s, ms, s	Unterabtastung 10 MHz Cursormessung in einem Bereich z.B. 0,800 ms im 0,1ms-Bereich	Unterabtastung 10 MHz Cursormessung in einem Bereich z.B. 0,800 ms im 0,1ms-Bereich Periodenmessung in einem Bereich z.B. 0,100 ms im 0,1ms Bereich	1,0·10 ⁻⁶ 0,5 % 0,5 %
Frequenzgang				
alle Kanäle 50 kHz bis zur Nennbandbreite				2 % bis 5 %
-3 dB Bandbreite BB_{3dB} bei 70,7% U_{ref}				
SKT-Ablesung	Cursorablesung		RMS Measurement	5 %
3,54 SKT bei U _{ref} =5,00 SKT	353,5 mV _{PP} bei U _{ref} =500 mV _{PP}	353,5 mV _{PP} bei U _{ref} =500 mV _{PP}	125,0 mV _{rms} bei U _{ref} =176,8 mV _{rms}	
Anstiegszeit				
nicht erforderlich			alle Kanäle über Measurement Risetime 10%-90% T _{A, Sol} =0,4 / Nennbandbreite	3 %
Triggerbandbreite				
als i.O. Funktionstest \geq Nennbandbreite				-
Triggerempfindlichkeit				
als i.O. Funktionstest \leq Spezifikation				-
Interne Kalibriersignale				
Kalibriergenerator Amplitude				0,5 %
Kalibriergenerator Frequenz				1 Digit
Reflexionsfaktor Γ des 50 Ω-Signaleingangs				
erforderlich für Oszilloskope mit Bandbreiten \geq 1 GHz, alle Kanäle				0,015

Tabelle IX.2, empfohlene Kalibrierumfänge

Die Kalibrierung erfolgt in Anlehnung an **VDI/ VDE/ DGQ/ DKD 2622 Blatt4:1998 [1]**. Wenn vorhanden werden zur Auswertung die Messergebnisse bei DSO über mehrere Aufzeichnungen gemittelt, um den Einfluss der Digitalisierung zu vermindern.

Bei Mehrkanaloszilloskopen, Doppelzeitbasisgeräten oder Einschuboszilloskopen werden sämtliche Konfigurationen berücksichtigt und eigens kalibriert. Das Kalibrierverfahren ist dann für die verschiedenen Komponenten anzuwenden.

Die Ergebnisse (sowohl eingestellter Wert am Kalibrator als auch abgelesener Wert am Kalibriergegenstand) sind gemäß der dem Oszilloskop eigenen Darstellungsweise oft in Skalenteilen angegeben. Die angegebene Stellenzahl ergibt sich bei Analoggeräten aus dem Auflösungsvermögen der Bildschirmeneinheit (im Bereich von $1 \cdot 10^{-3}$ bis $20 \cdot 10^{-3}$) und bei DSO aus der Genauigkeit der Auslesefunktion. Im Zweifelsfall sind die Herstellerangaben heranzuziehen.

Bei allen Kalibrierungen befinden sich die Regler der Einstellelemente für die Ablenkoeffizienten in einer definierten Stellung (Feinregler am linken oder rechten Anschlag, mechanischer Rastpunkt, LED oder Anzeige im Display etc.). Abweichende Einstellungen am Kalibriergegenstand oder sonstige Messmodi werden –soweit erforderlich und sinnvoll- im Kalibrierschein vermerkt.

IX.1.3 Kalibrierung der Vertikalablenkung

Die Amplitudenkalibrierung erfolgt im linearen Bereich des Frequenzgangs des Oszilloskops. In der Regel wird ein periodisches Signal mit 1 kHz bis 100 kHz Wiederholfrequenz (Sinus oder Rechteck) und definierter Amplitude zum Vergleich herangezogen. Falls die Arbeitsbereiche des Oszilloskops vom Hersteller nicht anders angegeben werden, wird die Amplitude mit etwa fünf Skalenteile (SKT =

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am: 07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	3 von 3

Hauptgitterlinien der Bildschirmeinheit) angesteuert². Die Messung kann in der AC- oder DC-Einstellung des Oszilloskops erfolgen, die Strahlage wird über die vertikale Verschiebung so eingestellt, dass die Anzeige etwa in der Mitte des Schirms erfolgt und der untere Scheitelpunkt auf einer der waagrechten Linien zu liegen kommt um den Ablesefehler (abgelesen wird Spitze-Spitze) so gering wie möglich zu halten. Bei Geräten mit Cursor- oder Anzeige-Funktion wird diese zur Ermittlung der Messergebnisse herangezogen.

Die Kalibrierung wird in allen Einstellungen des Spannungsteilers durchgeführt. Auch die zusätzliche Abweichung einer Vervielfachung (z.B. x 10) wird -falls vorhanden- ermittelt und vermerkt. Besitzt das Oszilloskop eine schaltbare Eingangsimpedanz (50 Ω oder 1 MΩ), so muss auch diese in mindestens einer Spannungsteilereinstellung und für jeden Kanal kalibriert werden.

Kalibriersignale und Anschluss

Für die Bereitstellung der Kalibriersignale sind zwei Messaufbauten möglich:

a) Messung am Bezugnormal Fluke 5700A (Bild IX.1a)

Prinzipiell erfolgt ein Anschluss am Kalibrator genauso wie es von der Voltmeter-Kalibrierung bereits bekannt ist. Die Verbindung zum Oszilloskop erfolgt über ein kurzes Standard-Koaxialkabel Typ RG 58 C/U. Am Kalibratorausgang sorgt ein Bananenstecker auf BNC-Buchse für die richtige Verbindung. Der Guard-Anschluss muss nicht angeschlossen werden. Da der Kalibrator sinusförmige Wirkspannungen erzeugt muss die nötige Vertikalablenkung über den Scheitelfaktor mit

$$U_{eff} = \frac{U_{p-p}}{2\sqrt{2}}$$

ausgerechnet und eingestellt werden.

Somit erlaubt direkte Messung am Kalibrator gemäß DC bzw. AC-Volt Akkreditierung die Kalibrierung des Spannungsteilers am Oszilloskop von 10 mV pro SKT bis 100 V pro SKT³. Die beste Performance wird hierbei im Bereich DC bis 20 kHz erreicht.

Daneben ist die Kalibrierung mit Gleichspannungen ab 10 mV also ca. 2 mV pro SKT möglich.

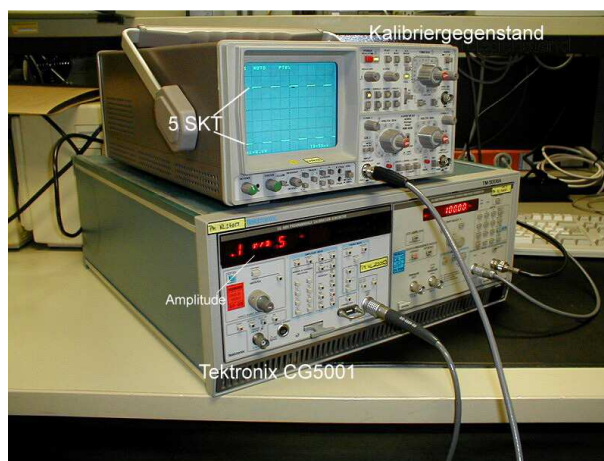


Bild IX.1a und IX.1b Oszilloskop an Fluke 5700A und Oszilloskopkalibrator Tektronix 5001

b) Messung am Oszilloskopkalibrator z.B. Tektronix CG5001 (Bild IX.1.b)

Eine einfachere Bedienung und Handhabung der Kalibrierung ist mit einem der im Labor befindlichen Oszilloskopkalibratoren Tektronix CG5001, CG5010, SG5030 oder Wavetek / Fluke 9500 (1,1 GHz und 6 GHz) möglich. Zusätzlich steht auch mehrere Fluke 5500A mit Scope-Option zur Verfügung.

² Das tatsächliche Maß der Aussteuerung sollte bei DSO bei ≥80% bei Analoggeräten bei ca. 70% des Messgitters erfolgen

³ Die minimal rückführbar entnehmbare Spannung am Fluke 5700 ist 22 mV-U_{eff}. Nach der Formel ergibt sich die Spitze-Spitze-Spannung zu 62,23 mV. Das bedeutet für die erwähnte Aussteuerung 10 mV pro SKT also 6,22 Skalenteile. Für gute Ablesergebnisse sind 6,5 Skalenteile in diesem Bereich mit 22,98 mV-U_{eff} einstellbar. Für handelsübliche Oszilloskope liegt dieser Wert im darstellbaren Bereich optimaler Aussteuerung.

Eine ähnliche Betrachtung ergibt sich für den maximalen Wert. Hier ergeben 176,78 V-U_{eff} die bestimmenden 500 V-U_{p-p} (5 SKT mit 100 V pro SKT).

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am:07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	4 von 4

Das umständliche Umrechnen über Scheitelfaktor auf Spitze-Spitze-Werte entfällt bei dieser Methode, da die Größen der benötigten Kalibriersignale in oft hinreichender Genauigkeit direkt ablesbar und einstellbar sind.

Die Oszilloskopkalibratoren wurden hinsichtlich der DC-Spannungsakkreditierung im Gleichspannungsbereich über die Bezugsnormale HP3458, bzw. Fluke 5700A rückgeführt und vermessen. Die Rückführung bezüglich HF-Spannung U_{ein} im 50 Ω Koaxialeitersystem erfolgt mit den HF-Leistungs-Bezugsnormalen R&S NRV-Z1 und NRV-Z51 (Kapitel XIII.1) gemäß der Beziehung $U_{\text{ein}} = \sqrt{(P_{\text{ein}} \cdot Z_0)}$ (s.XIII.1.6 und XIII.1.7.4).

IX.1.4 Kalibrierung der Horizontalablenkung

Für die Kalibrierung der Zeitablenkeinheit werden periodische Signale verwendet, die Wiederholfrequenz ist so gewählt, dass mindestens eine vollständige (ganzzahlige) Signalperiode pro SKT abgebildet wird. Damit steile, charakteristische Flanken entstehen und der Ablesefehler so gering wie möglich gehalten wird eine ausreichende vertikale Aussteuerung eingestellt. Die Ablesung erfolgt entweder

- durch Cursor/Auslesefunktion, bei DSO, soweit vorhanden oder
- durch visuelle Ablesung: Hierbei wird die Deckung der Signalfanke an der ersten Haupttrasterlinie mit Hilfe des Reglers für die horizontale Strahlage eingestellt.

Abgelesen wird der Wert an der letzten Gitterteilung, d.h. es ist auch auf eine ausreichende horizontale Aussteuerung zu achten (s. Bild IX.2). Der richtige Wert der Zeitbasis ergibt sich dann durch Mittelung über die gesamte horizontale Aussteuerung gemäß

$$T = \frac{1}{n} T_{\text{gesamt}}$$

n: ganzzahlige Perioden innerhalb T_{gesamt}

Um Triggerfehler bei langen Periodendauern (>1 ms) zu vermeiden sollten bei DSO mehrere Messungen im Modus „Single“ -sofern vorhanden- ausgewertet werden. Eine zusätzliche Dehnung der Zeitbasis wird ebenfalls kalibriert.

Korrektur des Leitungsabschlusses ist nicht zwingend notwendig aber zweckmäßig und wird daher berücksichtigt.

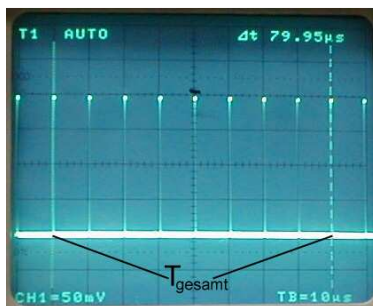


Bild IX.2 Zeitmarker am Bildschirm

Kalibriersignale und Anschluss

a) Messung am Signalgenerator (Bild IX.3a)

Es ist möglich, die benötigten Kalibriersignale -analog zum Kalibrierverfahren für Frequenzzähler- an einem der vorhandenen Funktionsgeneratoren oder Signalgeneratoren zu entnehmen.

Im dargestellten Beispiel wird der Funktionsgenerator Wavetek 395 im Modus „Pulse“ betrieben. Das Oszilloskop wird an „Main out“ angeschlossen. Die Periodendauer des Signals ist einfach über die entsprechenden Funktionstasten einstellbar, wobei jeweils eine Halbperiode pro Skalenteil zur Darstellung zu empfehlen ist.

b) Messung am Oszilloskopkalibrator (Bild IX.3.b)

Die komfortablere Variante der Messung stellt wieder einer der Oszilloskopkalibratoren z.B. Tektronix CG5001 dar. Dieser liefert steile Nadelimpulse definierten Abstands („Time Markers“). Der Kalibrator kann an externer Referenzfrequenz betrieben werden, so dass auch für die Kalibrierung der

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am:07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	5 von 5

horizontalen Strahlablenkung dieses Gerät gemäß der Frequenzakkreditierung verwendet werden kann.

Die Rückführung erfolgt in allen Fällen gemäß der Frequenzakkreditierung.

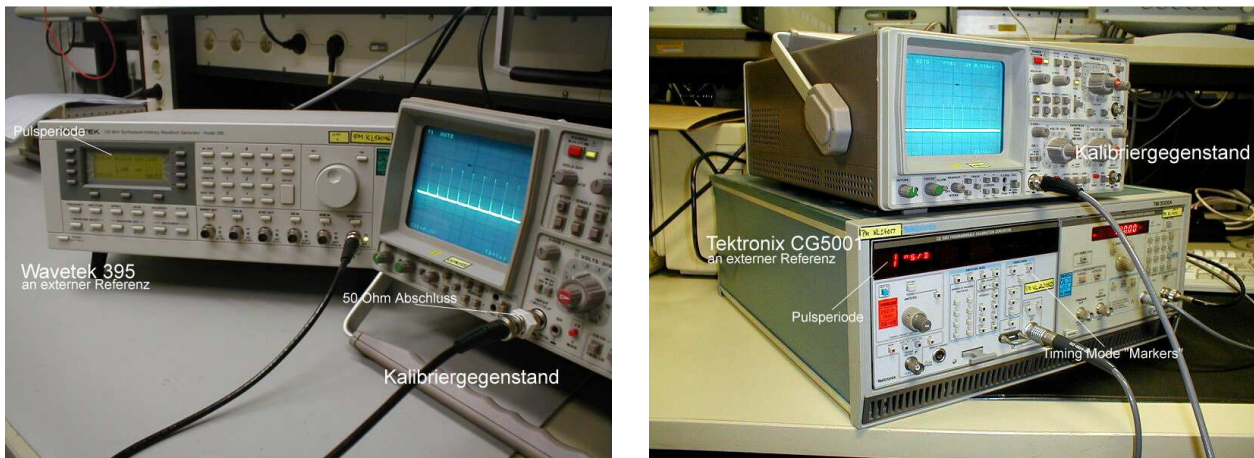


Bild IX.3a und IX.3b Oszilloskop an Oszilloskopkalibrator Wavetek 395 und Tektronix CG5001

Der Anschluss am Oszilloskop erfolgt wieder über die Ausgangsleitung des Kalibrators. Gemessen wird im Modus „Markers“ an 1 M Ω oder 50 Ω , wobei der Impulsabstand direkt am Kalibrator eingestellt wird.

IX.1.5a Bestimmung der Bandbreite ≤ 100 MHz

Gemessen kann - neben der 3-dB-Bandbreite - auch der Frequenzgang an ausgewählten Stellen im Arbeitsbereich des Oszilloskops. Hierzu wird mit einem Signalgenerator mit stufenlos einstellbarem Ausgangspegel (geeignet beispielsweise Marconi 2031, Wavetek 395 etc.) Amplitude und (Sinus-) Frequenz im interessierenden Bereich in 50 Ω hergestellt. Gleichzeitig wird die Spannung am Oszilloskopeingang mit dem HF-Millivoltmeter Rohde&Schwarz URV5 (oder alternativ R&S NRVD) an der Leitungsteilung (BNC-Adapter) R&S Typ 241.110.02 mit dem HF-Tastkopf R&S URV5-Z7 abgegriffen und mitgemessen. Der Messwert am Oszilloskopeingang (Referenzebene) gilt somit immer als Bezugswert und wird einmal im linearen Frequenzbereich des Oszilloskops auf beispielsweise 5 SKT unter Beachtung des Kal.-Faktors aus dem Kalibrierschein des Tastkopfes angesteuert (üblich 500 mV- U_{p-p} bei 50 kHz). Wird nun die Frequenz des Sinusgenerators erhöht darf die Signalamplitude nur im Rahmen einer Veränderung am Eingang (=gemessener Pegel am Tastkopf) wieder nachjustiert werden (manuelles „leveling“ – Kal.-Faktor beachten). Dazu besitzt das Voltmeter eine nützliche Null-Funktion, die das Ablesen bei dieser Messung vereinfacht: Die Bezugsamplitude wird einmal als externe Referenz gespeichert (Tasten „Shift – Store“ und „AINT“)

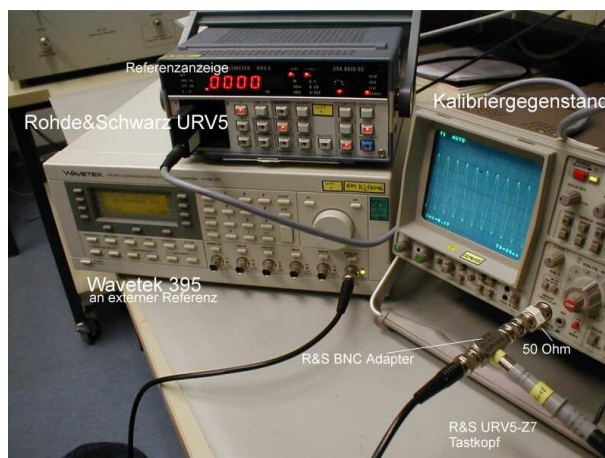


Bild IX.4 Messaufbau und Anschluss - Bandbreite

und muss über den gesamten betrachteten Frequenzbereich unverändert anliegen, d.h. die Anzeige muss weiterhin auf Null bleiben.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am: 07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	6 von 6

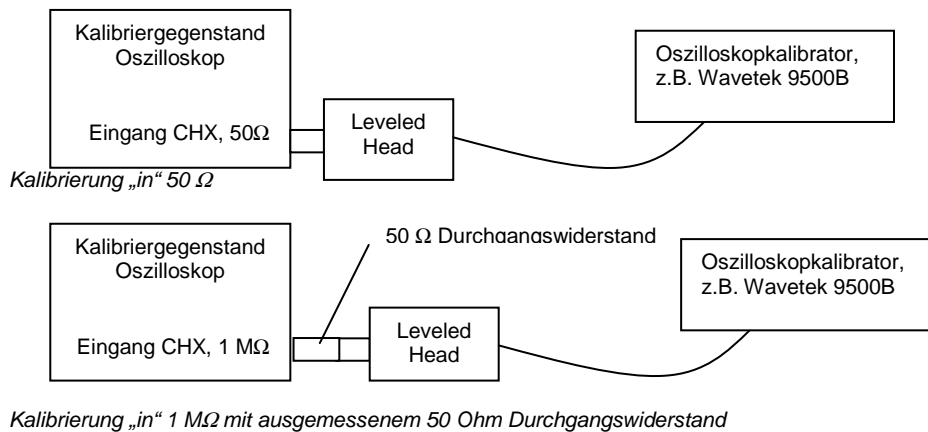
Die Einflüsse des Messaufbaus (Reflexionen, Dämpfungen) und der Frequenzgang des Generators gehen somit nicht in die Messung ein, da das Oszilloskop eine definierte Eingangsgröße auf der Referenzebene erhält. Der absolute (Zahlen-)Wert am Eingang spielt dabei eine untergeordnete Rolle – bewertet werden soll nur der Abfall von 3 dB bezogen auf einen anliegenden Referenzwert. Im 5 SKT-Beispiel also diejenige Frequenz bei dem die angezeigte Spannungsamplitude auf 3,54 SKT (70,8% der Referenzamplitude, Bild IX.5) zurückgegangen ist. Für die 3dB-Bandbreite gilt:

$$B_{3dB} = f_{\sin} \Big|_{U=U_{ref}-3dB}$$



Bild IX.5: 3 dB Abfall

IX.1.5b Bandbreite >100 MHz



Bei Frequenzen größer 100 MHz und im 50 Ω Koaxialleitersystem wird die HF Spannung allgemein, also auch bei Oszilloskopen, als der Effektivwert der Amplitude der einfallenden (inc) Spannung U_{inc} bestimmt. Er wird berechnet zu $U_{inc} = \sqrt{(P_{inc} \cdot Z_0)}$ aus der gemessenen einfallenden Leistung (s. Kap. XIII). Für diese Messung kann man entweder 1. einen HF-Generator der, an einen Leistungsteiler angeschlossen ist und an dessen einen Seitenarm ein Referenzleistungsmesser angeschlossen ist (s.Kap XIII.2.1 und IX 2.5.4) oder 2. einen Oszilloskopkalibrator verwenden , der die oben genannte Bauteile (meist in einem externen Messkopf- „Leveled head“) bereits enthält. Das 1. System erzeugt eine bekannte einfallende Leistung aus der die einfallende Spannung berechnet werden muss, während beim Oszilloskopkalibrator bereits eine geregelte bekannte Spannung U_{inc} an seinem Ausgang zur Verfügung gestellt wird. Für die Messung mit den Oszilloskopkalibrator erfolgt der Anschluss der geregelten einfallenden Sinusspannung über den zugehörigen Messkopf ohne zusätzliches Verbindungskabel (ausgenommen Fluke 55xxA, siehe dazu Kapitel auch XXII.3.8 und s. Abb. XXII.3, diese dürfen für kleine Messunsicherheiten nur mit dem zugehörigen Kabel betrieben werden) . Ausgangsspannung und Frequenz sind am Kalibrator direkt einstellbar, die Nachregelung des Generators erfolgt immer automatisch. Auch kann der Bezugswert durch Aktivieren einer „Ref.“-Funktion am Gerät immer wieder kontrolliert werden.

IX.1.6a errechnete Anstiegszeit

Zusätzlich kann über die Formel :

$$T_{a,AO} = 0,34 \cdot \frac{1}{f_{3dB}} \quad \text{bzw.} \quad T_{a,DSO} = 0,40 \cdot \frac{1}{f_{3dB}}$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am:07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	7 von 7

die Anstiegszeit aus der 3dB-Bandbreitenfrequenz bestimmt werden. **Sie gilt unter der Annahme, dass das Frequenzverhalten des Oszilloskops durch ein Gauss-Tiefpass (AO) bzw. einen Filter höherer Ordnung (DSO) beschrieben werden kann**

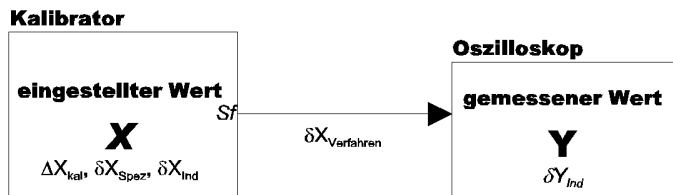
IX.1.6b Anstiegszeitkalibrierung mit schnellen Pulsen
 siehe Kapitel IX.4

IX.2 Messunsicherheitsbudgets

IX.2.1 Vertikale Ablenkeinheit über AC/DC-Kalibrator oder kalibrierten Oszilloskopkalibrator

- an Fluke 5700A, Sinussignale Tektronix CG5001, Wavetek 9500, Fluke 5500

Skizze des Messaufbaus:



Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:

- X eingestellter Wert am Kalibrator
- Y Anzeige am Kalibriergegenstand

Gesuchte Größe:

- ΔY Abweichung der Anzeige des Kalibriergegenstandes vom richtigen Wert

Ausgabe: 5.5.11	erstellt von: PF / WR / KR am:07.01.09	geprüft/genehmigt von: PF am: 07.01.09	Kapitel IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	Seite 8 von 8
---------------------------	---	---	--	-------------------------

IX.2.2 horizontale Ablenkeinheit an Sinusgenerator oder Oszilloskopkalibrator

- an Wavetek 395, Marconi 2031, Tektronix CG5001(Wavetek 9500, Fluke 5500A)

Für die Erzeugung der Kalibriersignale werden die Generatoren an externer Referenz betrieben, d.h. hier gelten die Unsicherheitsbetrachtungen der Frequenzakkreditierung. Diese leiten aus der externen Referenzfrequenz des Rubidiumstandards ein periodisches Signal im Frequenzbereich von 1 MHz bis 2,7 GHz ab, d.h. Vertikalablenkungen 1 ns bis 10 s pro Skalenteil sind problemlos kalibrierbar. Die korrekte Funktion wird durch Plausibilitätsmessung am Universalzähler Philips PM6680B überprüft, wobei dieser ebenfalls das 10 MHz-Signal des Rubidiumstandards als externe Referenz verwendet.

Zeitmarken von 10 ns bis 5 s können direkt am Tektronix Oszilloskopkalibrator CG5001 entnommen werden. Laut Hersteller ergeben sich keine zusätzlichen Unsicherheiten aus der Ableitung der Referenzfrequenz. Messungen mit dem Zähler Philips PM6680 konnten dies jedoch nicht vollständig bestätigen. Die statistische Auswertung der gemessenen Frequenzen zeigte, dass bei ausreichender Stichprobenlänge trotzdem leicht erhöhte Standardabweichungen auftraten.

Auch für die Funktionsgeneratoren Wavetek 395 und Marconi 2031 erfolgt die Unsicherheitsbetrachtung aufgrund der Auswertung der Messergebnisse am Zähler Philips PM6680B (siehe auch Messunsicherheitsanalyse für Frequenzakkreditierung):

Messbereich	Normal	Maximal beobachtete Standardmessunsicherheit	erweitert k=2
10 ns bis 5 s	Tektronix CG5001	$2 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$
50 ns bis 5 s	Wavetek 395	$2 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$
1 ns bis 0,1 ms	Marconi 2031	$1 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$

Vereinfacht ergibt sich analog zu IX.2.1:

Skizze des Messaufbaus:



Einflussgrößen:

δX Abweichung des Kalibriersignals von der eingestellten Frequenz. Unsicherheiten wurden empirisch am Zähler bestimmt, sind jedoch so klein, dass dieser Anteil gegenüber den übrigen Beiträgen auch vernachlässigt werden kann.

δY_{IND} Rundungsfehler aufgrund der Auflösung des Oszilloskopes, d.h. Genauigkeit der Auslesefunktion oder die Auflösung der Bildschirmeinheit (abhängig vom Kalibriergegenstand). Für die kleinste angebbare Messunsicherheit wird von einem „guten“ Messobjekt ausgegangen und dieser Anteil zu Null abgeschätzt mit einer rechteckverteilten, auflösungsbedingten Unsicherheit von $5 \cdot 10^{-3}$.

$\delta X_{Verfahren}$ Aus den Ergebnissen des nationalen Ringvergleichs zur Kalibrierung von Oszilloskopen 2000/ 2001 werden zusätzliche verfahrensbedingte Unsicherheitsbeiträge (Triggerfehler etc.) mit $1 \cdot 10^{-3}$ berücksichtigt.

Modellgleichung:

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich aus

$$Y - \Delta Y + \delta Y_{IND} = X + \delta X + \delta X_{Verfahren}$$

die für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit maßgebliche Modellgleichung

$$\Delta Y = Y + \delta Y_{IND} - X - \delta X_{Verfahren} - \delta X$$

Tabellarische Darstellung des Messunsicherheitsbudget:

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am:07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	9 von 9

Größe	Schätzwert	Standard-messunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	x_i	$u(x_i)$		c_i	$u_i(y)$
X δY_{IND}	x 0	$\delta Y_{IND} / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta Y_{IND})$
$\delta X_{Verfahren}$	0	$\delta X_{Verfahren} / \sqrt{3}$	Rechteck	-1	$u(\delta X_{Verfahren})$
δX	0	$u(\delta X)$	Normal	-1	$u(\delta X_{IND})$
Y	y				
ΔY	$y-x$				$u(\Delta Y)$

Relative erweiterte Messunsicherheit (k=2):

$$U(\Delta Y) = 2 \frac{u(\Delta Y)}{Y}$$

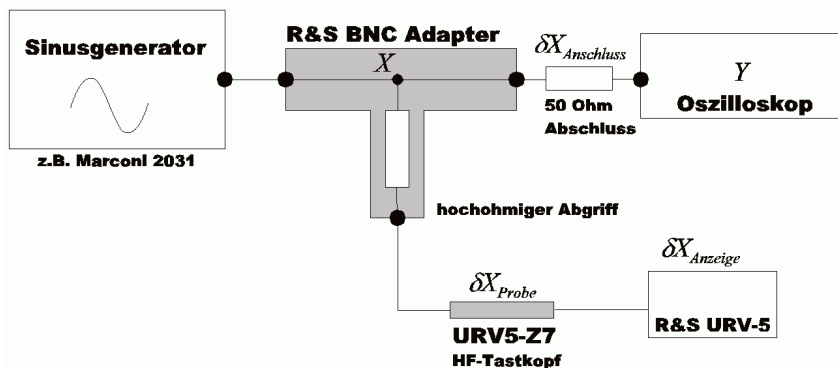
IX.2.3a Bestimmung der Bandbreite ≤ 100 MHz (hochohmig und 50 Ω)

- mit HF-Sinusgenerator, HF-Millivoltmeter Rohde & Schwarz URV-5 und URV-5Z7 HF-Tastkopf

Mit diesem Verfahren wird der Effektivwert der Amplitude der tatsächlich am Oszilloskop anliegende Eingangsspannung U gemessen. Dagegen wird bei $f > 100$ MHz in 50 Ω Leitungssystemen allgemein die einfallende (inc) Spannung $U_{inc} = \sqrt{P_{inc} \cdot Z_0}$ am Oszilloskop-Eingang bestimmt (Kapitel IX.2.5.3). Das hier beschriebene Verfahren für $f < 100$ MHz wird sowohl für hochohmige Eingangsimpedanzen (1 M Ω) als auch bei einem schaltbaren 50 Ω -Abschluss am Oszilloskopeingang verwendet. Sofern der hochohmige Eingang kalibriert wird, wird mit einem nach XIII.3.1 ausgemessenen 50-Ohm-Durchgangswiderstand („50 Ω -Feed-Thru“) eine Anpassung an die HF-Generatorimpedanz von 50 Ω vorgenommen (siehe Bild IX.4)

Da die Größe Frequenz weit genauer als die HF-Amplitude hergestellt werden kann, erfolgt im Folgenden nur die Aufstellung des Messunsicherheitsbudgets für die Bereitstellung eines konstanten Pegels über variabler Frequenz. Daneben ist bekannt, dass die Unsicherheit der Spannungsmessung am Oszilloskop etwa linear auf die Frequenzachse zunimmt und in der Nähe der -3dB-Bandbreite linear abgebildet wird, so dass die ermittelte Unsicherheit für die Angabe der Grenzfrequenz verwendet werden kann.

Skizze des Messaufbaus:



Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am: 07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	10 von 10

Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:

X, X_{ref}, X_f Amplitude am Oszilloskopeingang (bzw. am T-Abgriff). Die Indizes bezeichnen diesen Wert bei Referenzfrequenz und bei der variablen Frequenz f .
 Y, Y_{ref}, Y_f Anzeige am Oszilloskop

Gesuchte Größe:

Y_{BB} Abfall von der Referenzamplitude Y_{ref} aufgrund der eingeschränkten Bandbreite des Oszilloskops.

IX.2.3b Bestimmung der Bandbreite >100 MHz, siehe IX.2.5.3

Größer 100 MHz wird am Oszilloskopkalibrator gemessen. Diese Generatoren sind dagegen allerdings in U_{z0} kalibriert, d.h. die am 50Ω-Eingang anliegende Spannung ist abhängig von der Eingangsimpedanz des Kalibriergegenstandes. Dies erfordert dementsprechend die dazugehörige Messunsicherheitsbetrachtung aus IX.2.5.3.

IX.2.4a Errechnung der Anstiegszeit
 aus der gemessenen –3dB-Bandbreite

Vorgegebene Größen:

f_{3dB} Gemessene –3dB-Bandbreite

Gesuchte Größe:

T_a Anstiegszeit des Oszilloskops

Modellgleichung:

Mit den oben angeführten Größen ergibt sich die für die Berechnung der kleinsten angebaren Unsicherheit maßgebliche Modellgleichung:

$$T_a = A_{Filter} \cdot \frac{1}{f_{3dB}}$$

Messunsicherheitsbudget:

Die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit berechnet sich daraus:

$$u^2(T_a) = c_{A_{Filter}}^2 u^2(\Delta A_{Filter}) + c_{f_{3dB}}^2 u^2(f_{3dB})$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am:07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	11 von 11

Relative erweiterte Messunsicherheit (k=2):

$$W(T_a) = 2 \frac{u(T_a)}{T_a}$$

Die Zahlenwerte der Berechnungen für die einzelnen Messgrößen sind der Tabelle

- „Messunsicherheiten Tabelle IX.4 – Anstiegszeit zu entnehmen, die Ergebnisse sind im Leistungsnachweis aufgeführt

IX.2.4b Bestimmung der Anstiegszeit mit schnellen Pulsen („Fast Edge“)
siehe Kapitel IX.4

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am:07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	12 von 12

IX.2.5 Kalibrierung am Oszilloskopkalibrator

Wird an einem der Oszilloskopkalibratoren wie z.B. Wavetek 9500 bis 1,1 GHz bzw. 6 GHz kalibriert, können Modellgleichung und Messunsicherheitsbudget ähnlich wie in IX.1.1 dargestellt werden, z.B.

IX.2.5.1 Vertikalablenkung, s.a. IX.2.1

$$Y - \Delta Y + \delta Y_{Res} = X + \delta X_{Spez} + \delta X_{Konf} + \delta X_{Verfahren} + \delta X_{Mismatch}$$

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich gemäß DKD-3:2002 Abschnitt 4 aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis ΔY beizuordnende erweiterte Messunsicherheit (k=2) die **relative erweiterte Messunsicherheit (k=2)**:

$$W_{rel}(\Delta Y) = 2 \frac{u(\Delta Y)}{Y}$$

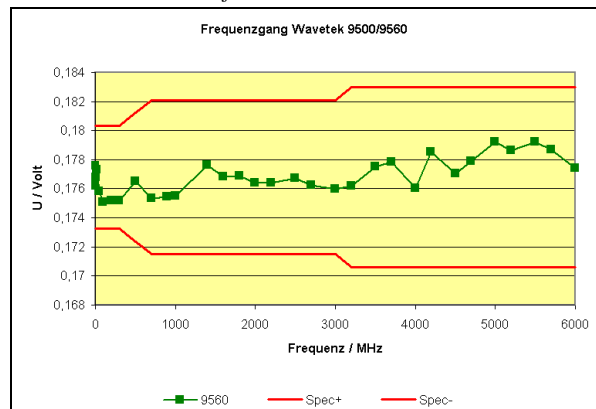
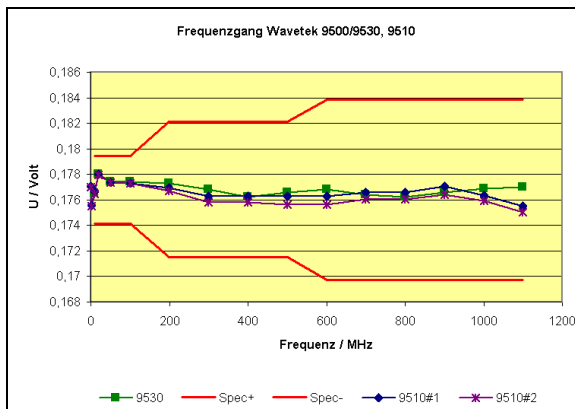
IX.2.5.2 Horizontalablenkung

Für die Ermittlung der Messunsicherheit kann die **Modellgleichung aus IX.2.5.1 der Vertikalablenkung** verwendet werden, wobei Präzisionsoszilloskope heute schon Ableseunschärfen und Wiederholbarkeiten von $1 \cdot 10^{-4}$ bieten, die durch Mittelwertbildung auch noch erhöht werden kann. Jitter- und Trigger-Abweichungen ($\delta X_{Verfahren}$) bewegen sich bei guten Sampling-Oszilloskopen oft unterhalb von 1 ppm und werden daher gegenüber der Ableseunschärfe vernachlässigt. Da der Kalibrator über die externe Zeitbasis mit dem Frequenznormal synchronisiert werden kann entfällt der Anteil δX_{Spez} . Durch die Digitalisierung des Signals mit der Abtastrate R in GS/s ergäbe sich eine weitere verfahrensabhängige Abweichung von $\pm(0,5ns/R \cdot 8 \text{ DIV})$, die allerdings erst im konkreten Fall berücksichtigt werden kann. Kalibriersignale schneller als 1ns Periodendauer können direkt an einem der HF-Signalgeneratoren als Sinus-Halbperioden erzeugt werden.

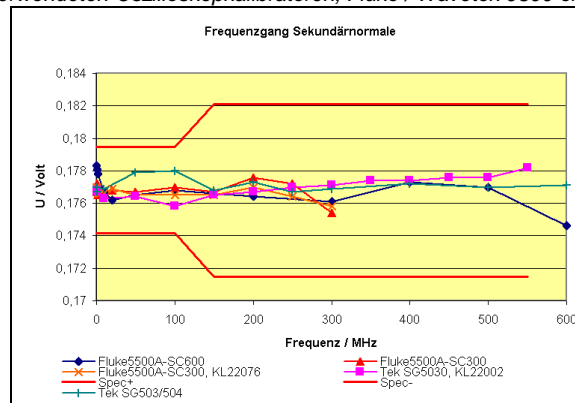
IX.2.5.3 Bandbreite am Oszilloskopkalibrator

Es wird angenommen, dass sich die Unsicherheit der Spannungsmessung am Oszilloskop linear auf die Frequenzachse abbildet. Dadurch lässt sich die Modellgleichung der Bandbreitenbestimmung aus den Zusammenhängen der Frequenzgangmessung darstellen:

$$Y - \Delta Y + \delta Y_{Res} = X + \delta X_{Res} + \delta X_{FU} + \delta X_{Kal} + \delta X_{Verfahren} + \delta X_{Mismatch}$$



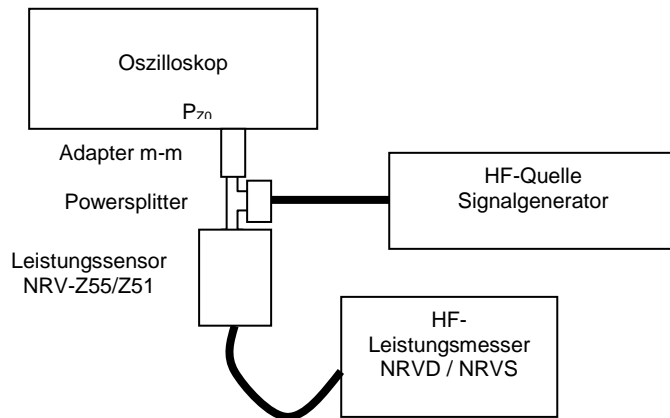
Frequenzgangauswertung der verwendeten Oszilloskopkalibratoren, Fluke / Wavetek 9500 oben und Sekundärnormale unten



Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am: 07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	13 von 13

IX.2.6 Bandbreite >6 GHz über Powersplitter und HF-Leistungsmessung

Der Frequenzgang von Oszilloskopen mit Bandbreiten >6 GHz kann über eine HF-Leistungsmessung direkt mit einem Powersplitter über dem Oszilloskopeingang und angeschlossenem Leistungsmesssystem bestimmt werden (siehe auch Kapitel XIII.2.6):



Die Unsymmetrie des Splitters kann durch Drehung um 180°, Messung mit vertauschten Seiten und nachfolgender Mittelwertbildung minimiert werden.

Analog zu Kapitel XIII.2 ergibt sich die Modellgleichung für die am Oszilloskop eingestrahlte Leistung $P_{inc,dBm}$ (in dBm, Korrekturen in dB)

$$P_{inc,dBm} = P_{NRVS} - \eta_{n,dB} - \delta P_{GG} - \delta P_{Drift,\eta} - \delta P_{ind} - \delta P_{noise} - \delta P_{Offset} - \delta P_{Lin} - \delta P_{mismatch} - \delta P_{mismatch,DUT} - \delta P_{Temp} - \delta P_{Conn}$$

$$\text{bzw. } P_{inc} = 10^{\frac{P_{inc,dBm}}{10}} [mW]$$

und daraus die am Oszilloskopeingang anliegende Spannung

$U_{inc} = \sqrt{P_{inc} \cdot Z_0}$. Da Z_0 die Nominalimpedanz $Z_0 = 50 \Omega$ des Koaxialleitersystems ist, die selbst keine Unsicherheit hat, ergibt sich die relative erweiterte Messunsicherheit $W(U_{inc})$ unmittelbar aus der relativen erweiterten Messunsicherheit $W(P_{inc})$ (s. XIII.1.5 und XIII.1.6 bzw. XIII.2.5) der Leistung P_{inc} :

$$W(U_{inc}) = \frac{1}{2} W(P_{inc})$$

Die relativen Messunsicherheitsanteile summieren sich gemäß

$$W^2(U_{inc}) = w^2(P_{inc}) = w_{GG}^2 + w_{\eta}^2 + w_{Drift}^2 + w_{ind}^2 + w_{noise}^2 + w_{Offset}^2 + w_{Lin}^2 + w_{mismatch}^2 + w_{mismatch,DUT}^2 + w_{Temp}^2 + w_{Conn}^2$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am:07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	14 von 14

IX.2.7 HF-Stromstärke – Oszilloskopstromzangen

Ähnlich wie in direkter Messung an einer Stromquelle (Kapitel XIX) können Oszilloskopstromzangen an einem der geregelten Generatoren (Tektronix SG5011, Fluke 5500A-SC, Wavetek 9500, etc.) im HF-Bereich kalibriert werden. Dazu ermöglicht ein 50 Ω-Kurzschlussbügel (Tektronix 015-0601-50) den Abgriff von HF-Stromstärke bis etwa 65 MHz an passenden Stromzangen. Unter Berücksichtigung der von der Messfrequenz f abhängigen Lastimpedanz Z_L (Reflexionsfaktor Γ_L bezogen auf die ideale Systemimpedanz $Z_0=50\ \Omega$, s. Abb. IX.2.7.1, kann die Stromstärke I_L an der Last aus der Spannung U_{Z0} des Generators (G) unter Beachtung der Fehlanpassung zwischen Generator (Γ_G) und Stromzange (Γ_L) mit:

$$|I_L| = \frac{|U_{\text{ein}}|}{Z_0 \cdot |1 - \Gamma_L|} = \frac{|U_{Z0}|}{Z_0 \cdot |1 - \Gamma_L| \cdot |1 - \Gamma_G \Gamma_L|^2}$$

berechnet werden.

Es zeigt sich, dass - bedingt durch die offene Koaxialstruktur des Strombügels -, der Betrag des Reflexionsfaktors $|\Gamma_L|$ mit f signifikant ansteigt, siehe unten. Da I_L linear von Γ_L abhängt, ist Γ_L bei höheren Frequenzen der dominierende Unsicherheitsanteil, weil die Phase von Γ_L nicht bekannt und daher eine Korrektur nicht möglich ist. Eine Korrektur ist auch deshalb nicht möglich, da der Reflexionsfaktor am Eingang des Strombügels gemessen wird, der Strom mit der Zange jedoch in der Mitte des geraden Teils des Strombügels abgegriffen wird.

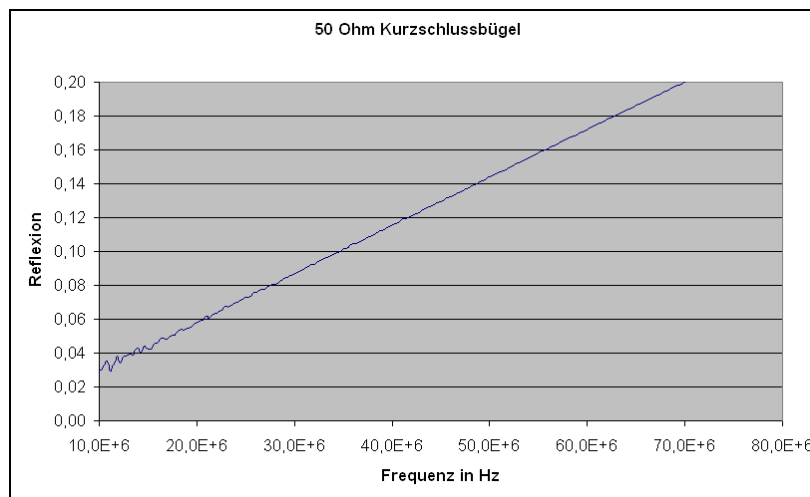


Abb IX.2.7.1 Gemessener Reflexionsfaktor $|\Gamma_L|$ am Eingang des Kurzschlussbügels, dieser Verlauf kann durch die Funktion $|\Gamma_L| \approx 0,0028 \cdot f / \text{MHz}$ angenähert werden.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am:07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	15 von 15

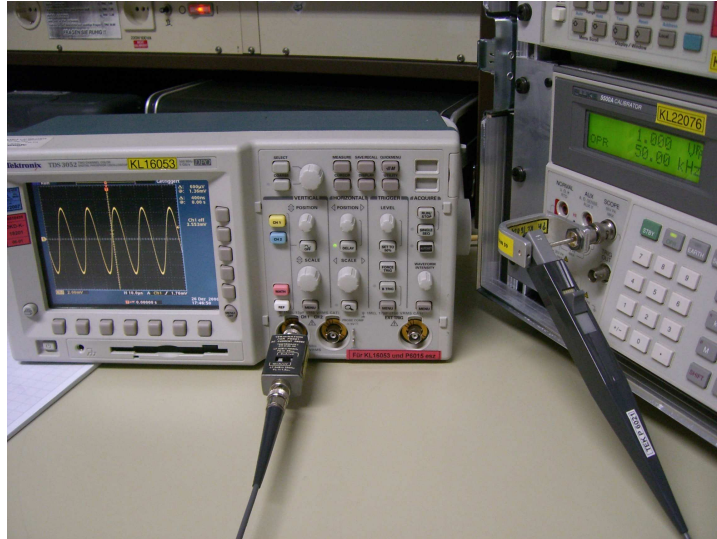


Bild IX.2.5.5.1 Kalibrierung von Oszilloskopstromzangen über 50Ω-Kurzschlussbügel am Sinusgenerator

Für an einem Oszilloskop direkt anzeigende Stromzangen formuliert sich das Modell für die Kalibrierung zu

$$\Delta I_{HF} = I_{HF,ind} - I_L = I_{HF,ind} - \frac{U_{ind}}{50\Omega} \cdot K_U \cdot K_A \cdot K_{Kal} \cdot K_P \cdot K1_{mismatch} \cdot K2_{mismatch}$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am: 07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	16 von 16

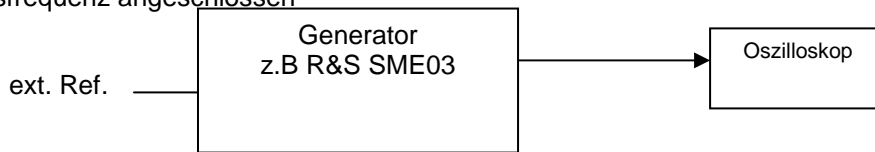
IX.2.8 Zeitbasiskalibrierung von Digital-Sampling Oszilloskopen (DSO)
auf Basis von Unterabtastung (s.a. Arbeitsanweisung AA0069)

Problemstellung:

Interne Oszillatorzeitbasen (10 MHz) von DSO werden oft nicht nach außen geführt, allerdings meist auf wenige ppm (10^{-6}) spezifiziert. Eine Kalibrierung über Cursor-, Marker oder Measurement Funktionen ist aufgrund der bedingten Anzeigeunschärfe und Stellenauflösung (ca. 0,8%) daher wenig sinnvoll. Über einen Umweg auf Basis von Unterabtastung lässt sich dennoch die Zeitbasisspezifikation unter der Annahme, dass die Samplingfrequenz direkt aus der Zeitbasis abgeleitet wird nachweisen.

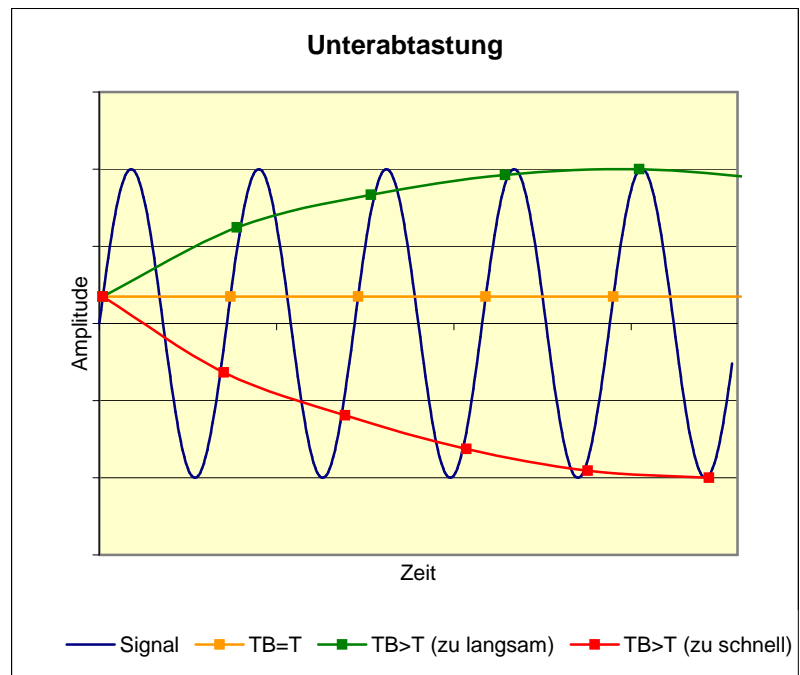
Kalibrierverfahren:

Das zu kalibrierende Oszilloskop wird an einen zeitbasisstabilisierten Generator mit verstimmbarer Ausgangsfrequenz angeschlossen

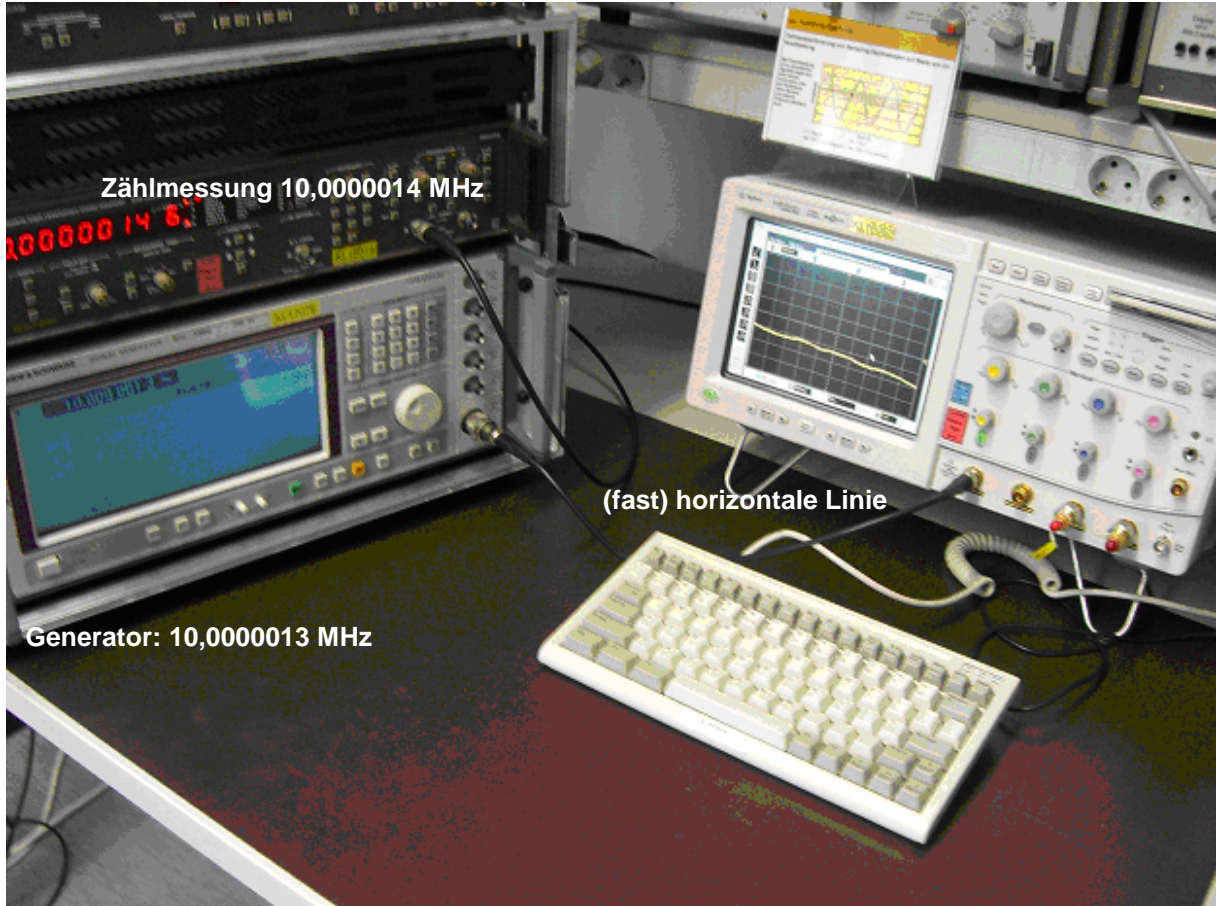


Generatoreinstellung z.B. 0 dBm (223 mV), 10 MHz
Oszilloskopeinstellung 100 mV / Div, **20 ms (Unterabtastung)**

Da das Signal jetzt unterabgetastet wird, ergibt sich abhängig von der Frequenzabweichung von Signal (Periodendauer T) und Samplingfrequenz (Time Base TB) ein Schein-Signal auf dem Bildschirm (Aliasing). Am Generator wird das Signal jetzt solange verstimmt bis sich eine nahezu **horizontale Linie** auf dem Oszilloskopschirm ergibt. Die Signalfrequenz ist dann ein ganzzahliges vielfaches der Samplingfrequenz und erlaubt den direkten Bezug zum wahren Wert der internen Zeitbasis.

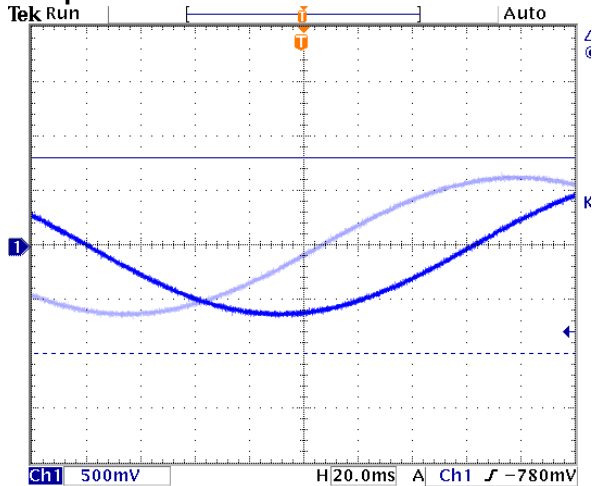


Messaufbau



Vergleich des Messverfahrens auf Basis von Unterabtastung und direkte Zählmessung am Agilent 54854A

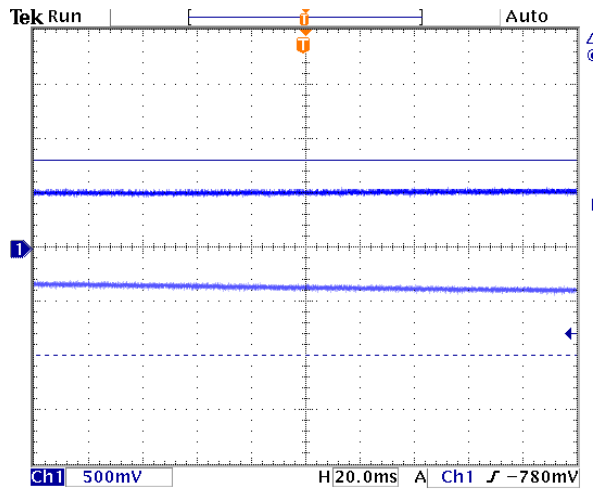
Beispiel: Rohde & Schwarz SME03 an Tektronix TDS 3052B



$f_{gen}=10,000055$ MHz

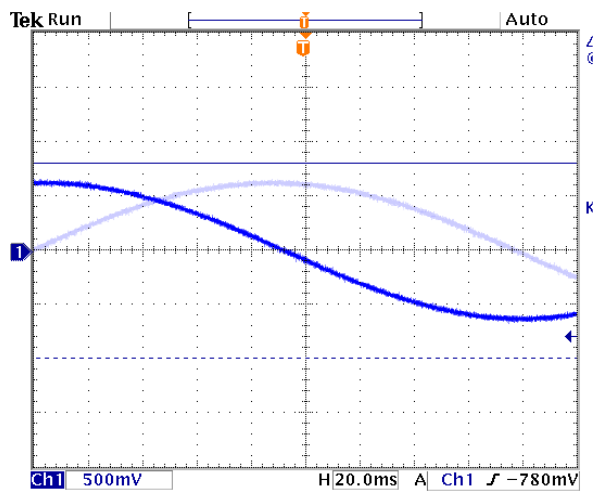
(zu langsam)

Ausgabe: 5.5.11	erstellt von: PF / WR / KR am:07.01.09	geprüft/genehmigt von: PF am: 07.01.09	Kapitel IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	Seite 18 von 18
---------------------------	---	---	--	---------------------------



$f_{\text{gen}} = 10,0000091 \text{ MHz}$

(gleich schnell)



$f_{\text{gen}} = 10,0000116 \text{ MHz}$

(zu schnell)

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am: 07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	19 von 19

Messunsicherheit

Für die Messung der internen Zeitbasis von digitalen Sampling-Oszilloskopen formuliert sich das Modell zu

$$TB_{Osc} = f_{Gen} + \delta f_{ind,Gen} + \delta f_{st} + \delta f_{ind,Osc}$$

Die beigeordnete **relative** erweiterte Messunsicherheit (k=2) für die Messung internen Oszilloskopzeitbasis ergibt sich zu:

$$W(TB_{Osc}) = 2 \cdot w = 2 \cdot \sqrt{w_{Gen}^2 + w_{ind,Gen}^2 + w_{st}^2 + w_{ind,Osc}^2}$$

IX.3 Kalibrierung am Samplingoszilloskop (Oszilloskop als Normal)

IX.3.1 Ablenkung (horizontal / vertikal)

In Sonderfällen oder zur Bestimmung von Kurvenformen und deren Parameter wie Spannung Spitze-Spitze, Über- und Unterschwingen, Dachschräge oder Amplitude kann es nötig sein Signale direkt am nach IX.2.5 kalibrierten Oszilloskop Agilent infinium 54854A (4 GHz, 20 GS/s) oder Tektronix TDS 3052 (siehe XXII.4.1) zu bestimmen.

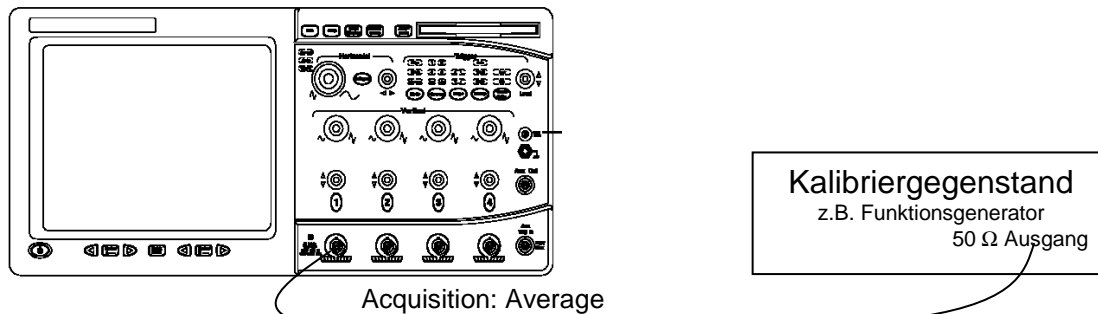


Bild IX.3.1 direkte Messung mit Oszilloskop als Normal

Unter Berücksichtigung der Anzeigeunschärfe und möglichen Fehlanpassungen am Eingang gilt die **Modellgleichung**:

$$Y - \Delta Y + \delta Y_{Res} = X + \delta X_{Res} + \delta X_{Spez} + \delta X_{Konf} + \delta X_{Verfahren} + \delta X_{Mismatch}$$

Messunsicherheitsbudget:

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich mit allen Sensitivitätskoeffizienten $|c_i|=1$ und $\delta Y_{Res}=0$ daraus:

$$u^2(\Delta Y) = u^2(Y) + u^2(\delta X_{Res}) + u^2(\delta X_{Spez}) + u^2(\delta X_{Konf}) + u^2(\delta X_{Verfahren}) + u^2(\delta X_{Mismatch})$$

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich gemäß DKD-3:2002 Abschnitt4 aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis ΔY beizuordnende erweiterte Messunsicherheit (k=2) die **relative erweiterte Messunsicherheit (k=2)**:

$$W_{rel}(\Delta Y) = 2 \frac{u(\Delta Y)}{Y}$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am:07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	20 von 20

IX.3.2 Anstiegszeitkalibrierung ohne Korrektion der Systemanstiegszeit

Die Anstiegszeit eines Rechtecksignals charakterisiert die Zeit, die ein Impuls benötigt um von 10 % auf 90 % des Maximalwertes anzusteigen. Die Messung erfolgt direkt am Oszilloskop, bei hoher horizontaler Abtastrate und kann bereits direkt über die „Measurement“-Funktion angezeigt werden. Um Triggerabweichungen zu minimieren sollte im Idealfall mit externem Trigger oder über mehrere Messungen im Betrieb „Single“ gemittelt werden.

Optimale Messungen haben sich bei folgenden Einstellungen erwiesen (Beispiel für Sprung mit $t_r=370$ ps, $U_T=1$ V, $f_{rep} = 1$ MHz):

Parameter	Richtwert	Einstellwert
Horizontal	ca. $5 \cdot t_r$	2ns / Div
Vertikal	ca. $U_T / 5$	200 mV / Div
Offset	dass $50 \% \cdot U_T$ in Bildschirmmitte	-500 mV
Time-Position	dass $0\% \cdot U_T$ und $100 \% \cdot U_T$ erfasst werden und t_r stabil	0 s
Trigger	extern oder $50 \% \cdot U_T$	-500 mV, pos. slope, auto, edge
Aquisition	maximal	20 GSa/s, Average 256, Skew 0s

Tabelle IX.3.2.1 – Optimale Einstellungen am Oszilloskop zur Erfassung von Sprungübergängen

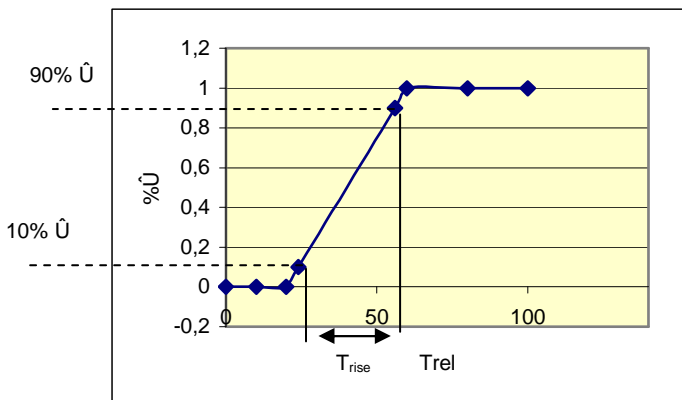


Bild IX.3.1a Anstiegszeit



Bild IX.3.1b Anstiegszeit am Oszilloskop

Die Modellgleichung bei Anstiegszeitmessung wird formuliert als

$$T_{gemessen} = T_{Signal} + \delta T_{Re.s} + \delta T_{System} + \delta T_{Amplitude} + \delta T_{TB} + \delta T_{Trigger} + \delta T_{Sample}$$

Messunsicherheitsbudget:

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich mit allen Sensitivitätskoeffizienten $|c_i|=1$ daraus:

$$u^2(T_{gemessen}) = u^2(\delta T_{Re.s}) + u^2(\delta T_{System}) + u^2(\delta T_{Amplitude}) + u^2(\delta T_{Trigger}) + u^2(\delta T_{TB}) + u^2(\delta T_{Sample})$$

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich gemäß DKD-3:2002 Abschnitt 4 aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis ΔY beizuzordnende erweiterte Messunsicherheit ($k=2$) die **relative erweiterte Messunsicherheit ($k=2$)**:

$$W_{rel}(T_{Signal}) = 2 \frac{u(T_{Signal})}{T_{Signal}}$$

IX.3.3 Anstiegszeitkalibrierung von Pulsen mit Korrektur der Systemanstiegszeit

Sofern mit einem nach IX.4.1 ausgemessenen Puls die Anstiegszeit des als Normal verwendeten Oszilloskopes, z.B. Agilent Infinium 54854A, gemäß IX.4.2 bestimmt wurde kann die Messunsicherheit bei Korrektur der Systemanstiegszeit verkleinert werden. Die Anstiegszeitbestimmung empfiehlt sich unmittelbar vor der Messung unter etwa identischen Bedingungen wie bei Messung des Messobjektes, siehe Tabelle IX.3.2.1, lediglich Zeitposition und Horizontale Auflösung sollten im Rahmen der optimalen Anzeige verändert werden.



Bild IX.3.3.1a „Einmessen“ des Oszilloskops mit dem 65,8ps Puls und Bestimmung von $t_{System}=74$ ps

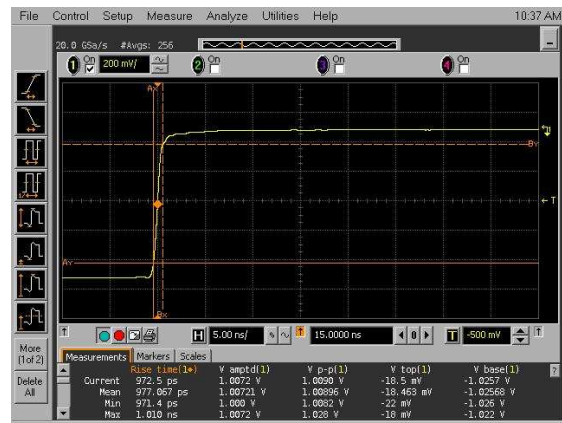


Bild IX.3.3.1b Bestimmung der Anstiegszeit des Messobjektes bei gleichen Bedingungen

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am: 07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	22 von 22

Mit der Modellgleichung aus IX.4.1.1 errechnet sich die Unsicherheit mit den abweichenden Anteilen:

Für Sprünge ab 300 ps kann als Interpolation $U(t_r)=30 \cdot 10^{-3} t_r + 2$ ps ähnlich zu IX.4.1 verwendet werden (Verifikation der Ergebnisse siehe IX.4.1.3):

<i>tr_{measure}</i>	<i>tr_{System}</i>	<i>tr_{UUT}</i>	<i>erw. MU</i>	<i>interpoliert</i>
200 ps	74 ps	185,8 ps	8,6 ps	nicht gültig
300 ps	74 ps	291 ps	11,9 ps	12,2 ps
500 ps	74 ps	494 ps	18,8 ps	19,3 ps
600 ps	74 ps	595 ps	22,3 ps	22,8 ps
800 ps	74 ps	797 ps	29,5 ps	29,9 ps
1000 ps	74 ps	997 ps	36,8 ps	36,9 ps

Die Zahlenwerte der Berechnungen für die einzelnen Messgrößen sind der Tabelle

- „Messunsicherheiten Tabelle IX Oszilloskope - 9500.XLS“
- „Messunsicherheiten Tabelle IX.4 – Anstiegszeit zu entnehmen, die Ergebnisse werden im Leistungsnachweis aufgeführt

IX.4 Kalibrierung mit schnellen Pulsen

IX.4.1 Bestimmung der Anstiegszeit von schnellen Pulsen („Fast Edge“-Generatoren)

Um schnelle Anstiegszeiten (<1 ns, beispielsweise die Anstiegsszeiten der im Labor eingesetzten Oszilloskopkalibratoren), messen zu können wird das digitale Sampling Oszilloskop **Tektronix CSA 8000** mit dem Einschub **80E01** (Nennbandbreite 50 GHz) verwendet. Bei Spannungssprüngen größer 0,8 Volt muss zusätzlich ein 6dB Dämpfungsglied verwendet werden, um den Eingang nicht zu übersteuern. Zur Messunterstützung wird das zu diesem Zweck entwickelte LabView-Programm „CSA8000-Anstiegszeit.vi“ verwendet.

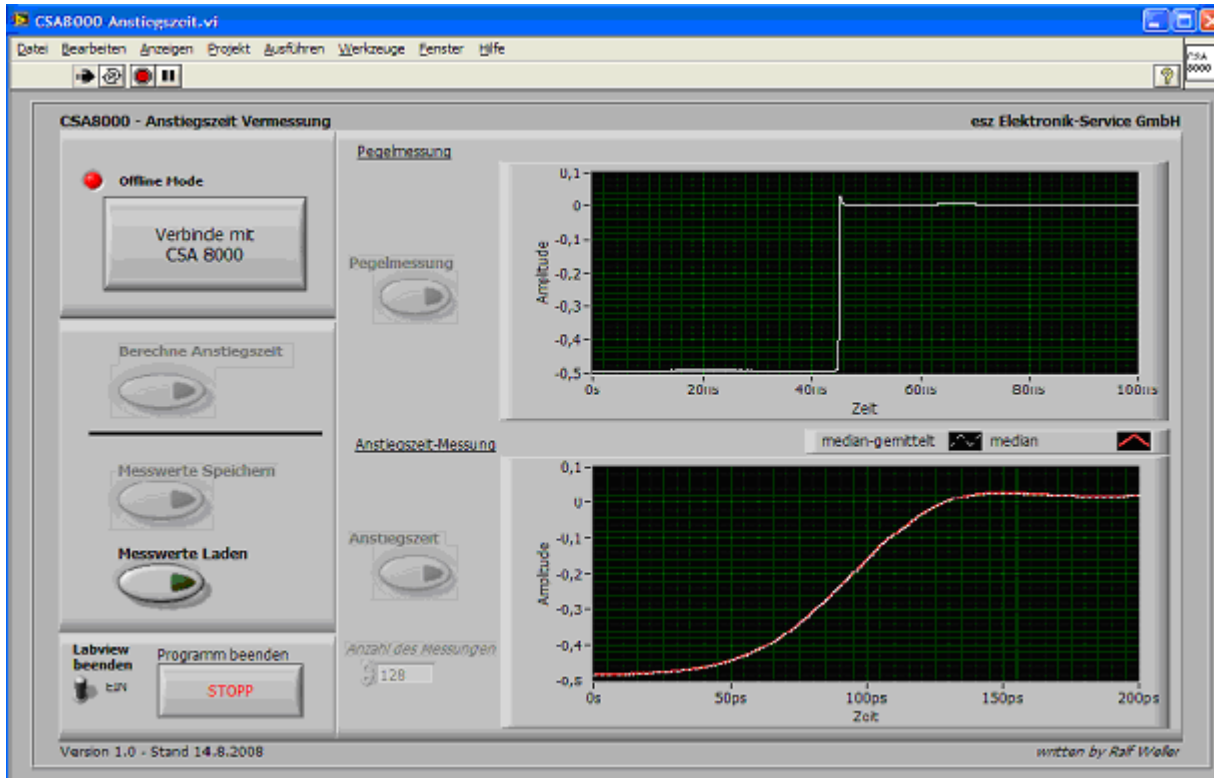
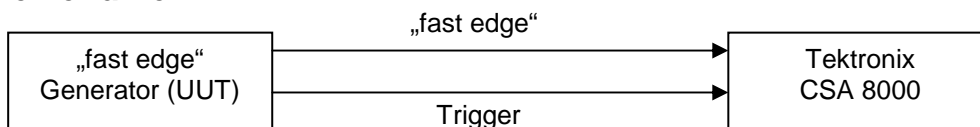


Bild IX.4.1.1 Bedienoberfläche des Programms „CSA8000-Anstiegszeit.vi“:

Kalibrierverfahren:



Der Kalibriergegenstand wird an den Einschub 80E01 des Tektronix CSA 8000 angeschlossen. Über GPIB wird ein PC mit dem CSA 8000 verbunden. Ein externes Triggersignal ist in jedem Fall erforderlich.

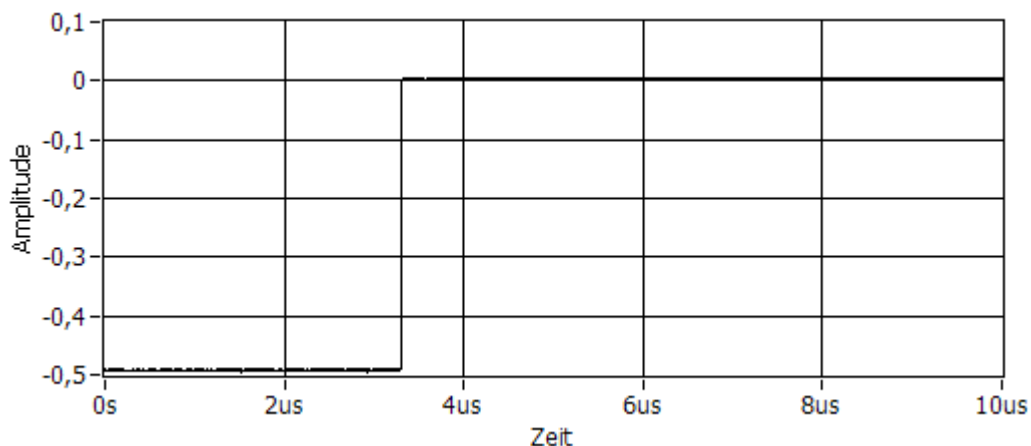
Jitter:

Bei schnellen Anstiegszeiten macht sich (zeitlicher) Jitter als wesentlicher störender Faktor bemerkbar. Ist das Signal stark mit Jitter überlagert, ist es oftmals nicht möglich eine Anstiegszeit zu bestimmen. Wird in solchen Fällen die eingebaute Average Funktion gewählt um die Kurve zu glätten, erhält man zu große Anstiegszeiten. Ein besseres Ergebnis erhält man, indem man von 128 Messkurven den Median⁴ wählt.

⁴ N. G. Paulter und D. R. Larson, *The „Median“ Method for the Reduction of Noise and Trigger Jitter on Waveform Data*; NIST 18.7.2005

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am: 07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	24 von 24

Pegelmessung (0% und 100%)



Zur korrekten Bestimmung der Anstiegszeit müssen zunächst die „High“ (100%) und „Low“ (0%) Pegel ermittelt werden. Dafür werden die Pegel im „flachen“ Bereich des Spannungssprunges analysiert, um dann die 10%- und 90%-Schwellen zu berechnen, welche für die Bestimmung der Anstiegszeit notwendig sind.

Um die Pegel exakt zu bestimmen, wird eine bessere Genauigkeit mit der Average Funktion erreicht (N=128). Da gemäß Hersteller-Handbuch des CSA8000 die beste Genauigkeit der Pegelmessung bei 20ns vor dem Sprung und nach 100ns nach dem Sprung erreicht wird, ist es notwendig eine möglichst große Zeitauflösung zu wählen.

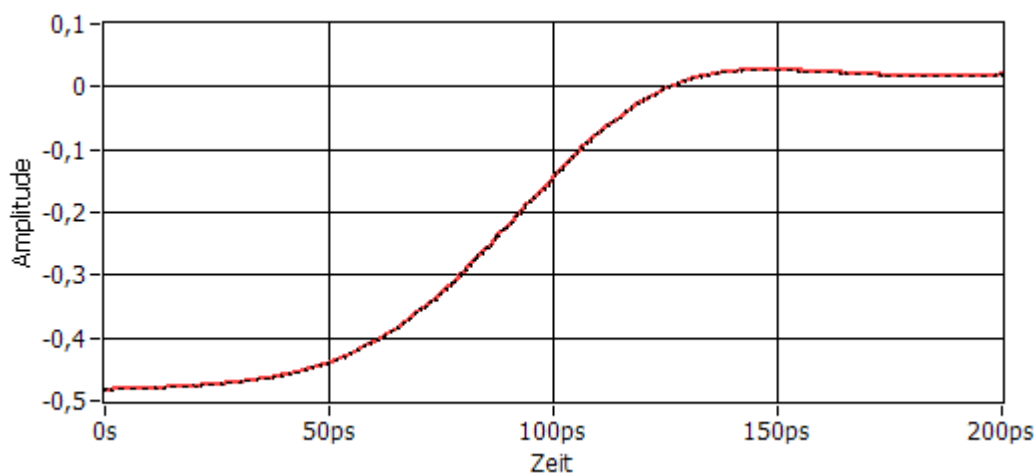
Es muss gelten:

VOR Sprung: $t > 40 \text{ ns}$ (gemessen wird von 40ns bis 20ns vor dem Sprung)

NACH Sprung: $t > 120 \text{ ns}$ (gemessen wird 100ns bis 120ns nach dem Sprung)

Das Messintervall entspricht also 20 ns, um über den Mittelwert dieser Achsenabschnitte auf möglichst exakte Werte schließen zu können. Das Einstellen des CSA 8000 zur Pegelmessung muss vom Benutzer erfolgen. Das LabView Programm „CSA8000-Anstiegszeit.vi“ liest dann über GPIB die Messkurve aus und berechnet die High- und Low-Level.

Messung der Anstiegszeit



Bei der Anstiegszeit soll die Zeit zwischen den 10%- und 90%-Level bestimmt werden. Bei dieser Messung spielt Jitter eine maßgebliche Rolle. Um einen guten Messwert zu erreichen werden daher mehrere Messungen durchgeführt (Richtwert N = 128) und dann mit Hilfe der Software für jeden Zeitpunkt der Median bestimmt.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am:07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	25 von 25

Folgende Einstellungen am CSA 8000 habe sich als sinnvoll und optimal erwiesen und sind daher Grundvoraussetzungen für eine genaue Messung:

Menu: Aquisition:

- Sample
- Stop After Condition 1

Menu: Trigger

- External Direct
- Level für minimalen Jitter am Bildschirm anpassen
- Mode: Normal
- Slope (Flanke), je nach Eingangssignal, in der Regel positiv
- High Frequency Triggering (wenn die Triggerflanke steiler als 1 V/ns)

Menu: Horizontal

- Scale so einstellen, dass der Sprung möglichst groß, jedoch vollständig angezeigt wird.
- Resolution möglichst groß -> Record Length = 4000
- Mode: Short Term Jitter

Außerdem sollte darauf geachtet werden, dass „Position“ möglichst klein ist („Eigenjitter“ ausschließen). Der betrachtete Sprung sollte möglichst zeitlich nahe am Triggersignal liegen. Nur so kann der Jitter schon bei der Messung minimal gehalten werden. Sind alle Einstellungen am CSA 8000 vorgenommen, können mit Hilfe des Programms „CSA8000-Anstiegszeit.vi“ die Messkurven automatisch aufgenommen werden. Des weiteren wird die Anstiegszeit automatisch berechnet. Zur Archivierung ist eine Speicherung der Messergebnisse möglich.

IX.4.1.1 Messunsicherheitsbudget

Vorgegebene bzw. ermittelte Größen:

$tr_{measure}$ Die gemessene Anstiegszeit, ohne Berücksichtigung der Anstiegszeit des Systems.

tr_{System} Anstiegszeit des Systems, bestehend aus dem Einschub 80E01 und dem Chassis CSA 8000. Die Anstiegszeit des Oszilloskopes kann nicht direkt vermessen werden, weil dafür ein ultraschneller Puls nötig wäre. Es kann jedoch ein Bereich angegeben werden in welchem die Anstiegszeit liegt. Aus der Kalibrierung des Einschubs 80E01 gegenüber die HF-Leistungsmessköpfe (siehe Kapitel XIII.2 bzw. Kapitel IX.2.6) geht hervor, dass die Bandbreite größer als 40 GHz ist. Daraus ergibt sich für die Anstiegszeit mit folgender Formel:

$$Anstiegszeit \equiv \frac{0,35}{Bandbreite}$$

$$CSA8000 \leq \frac{0,35}{40GHz} = 8,75 ps \approx 9 ps$$

Aufgrund der Tatsache, dass es sich um eine Näherung handelt wird zusätzlich aufgerundet und angenommen, dass der tatsächliche Wert der Anstiegszeit kleiner als 9ps ist.

Außerdem wird die Anstiegszeit nicht unter 5ps liegen, da dies allein die Konnektorgeometrie nicht erlauben würde.

Somit wird also eine Anstiegszeit von 7 ps angenommen, sowie zusätzlich der Unsicherheitsbereich $2a_{System} \in [-2 ps, 2 ps]$.

Dass aufgeführte Annahmen konservativ getroffen sind lässt sich aus Ergebnissen der PTB und NIST ableiten. Beide Institute haben für vergleichbare Geräte eine Anstiegszeit von etwa 6,6ps gemessen.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am:07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	26 von 26

Gesuchte Größe:

tr_{UUT} Anstiegszeit (10% bis 90% Level) der „fast edge“ des Prüflings.

Modellgleichung:

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich:

$$tr_{UUT} = \sqrt{(tr_{measure} + \delta_{timebase} + \delta_{Verfahren} + \delta_{Gleichung} + \delta_{reflevel} + \delta_{Wiederhol} + \delta_{Dämpfung})^2 - (tr_{System})^2};$$

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(tr_{UUT}) = c_2^2 u_{System}^2 + c_1^2 u_{timebase}^2 + c_1^2 u_{Verfahren}^2 + c_1^2 u_{Gleichung}^2 + c_1^2 u_{reflevel}^2 + c_1^2 u_{Wiederhol}^2 + c_1^2 u_{Dämpfung}^2$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am: 07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	27 von 27

IX.4.1.2 Ergebnisse

Zusammengefasst ergibt sich:

Spannung	$tr_{measure}$	tr_{System}	tr_{UUT}	Dämpfungsglied	erw. MU
0,5 V	20 ps	7 ps	18,7 ps	nein	1,9 ps
0,5 V	60 ps	7 ps	59,6 ps	nein	1,9 ps
0,5 V	150 ps	7 ps	150 ps	nein	2,5 ps
0,5 V	300 ps	7 ps	300 ps	nein	3,9 ps
0,5 V	500 ps	7 ps	500 ps	nein	6,1 ps
1 V	20 ps	7 ps	18,7 ps	ja	2,3 ps
1 V	60 ps	7 ps	59,6 ps	ja	2,2 ps
1 V	150 ps	7 ps	150 ps	ja	2,7 ps
1 V	300 ps	7 ps	300 ps	ja	4,1 ps
1 V	500 ps	7 ps	500 ps	ja	6,2 ps

Als Interpolationsformel für den darstellbaren Bereich kann somit angegeben werden:

Messgröße, Kalibriergegenstand <i>Measured Quantity or Instrument</i>	Messbereich, Messspanne <i>Range</i>	Messbedingungen, Verfahren <i>Conditions / Procedure</i>	kleinste angebbare Messunsicherheit <i>Best Measurement Capability</i>	Bemerkungen <i>Remarks</i>
Oszilloskopkalibrator, Pulsgenerator / <i>Oscilloscope calibrator, Edge Generator</i> Anstiegszeit <i>T</i> <i>Risetime T</i>	20 ps bis 10 ns	0,1 V bis 40 V in 50 Ω	$10 \cdot 10^{-3} \cdot T + 2 \text{ ps}$	Tektronix CSA8000 / 80E01 ; ext. Triggersignal erforderlich

Die zu Grunde liegenden **Zahlenwerte und Ergebnisse** der Berechnungen für die einzelnen Bereiche sind der mitgeltenden Excel-Tabelle

- „Messunsicherheiten Tabelle IX.4 – Anstiegszeit

zu entnehmen, die Ergebnisse werden im Leistungsnachweis aufgeführt.

IX.4.1.3 Verifikation

Zur Verifikation der Messunsicherheiten wurden verschiedene Pulse der Oszilloskopkalibratoren sowohl mit dem Verfahren aus IX.4.1 (CSA) und IX.3.3 (infinium) gemessen und die Ergebnisse miteinander verglichen. Bei erfolgreicher Verifikation muss gelten:

$$\left| |tr_{CSA}| - |tr_{infinium}| \right| \leq \sqrt{U_{CSA}^2 + U_{infinium}^2} \quad \text{bzw.} \quad E_n = \frac{\left| |tr_{CSA}| - |tr_{infinium}| \right|}{\sqrt{U_{CSA}^2 + U_{infinium}^2}} \leq 1$$

Messobjekt	CSA8000 t_{rCSA}	MU_{CSA}	infinium 54854 $tr_{infinium}$	$MU_{infinium}$	Delta	E_n
Fluke 9500B/9510, KL22094	412 ps	6,1 ps	410 ps	16,4 ps	2 ps	0,11
Wavetek 9500/9530, KL22058	368 ps	5,7 ps	364 ps	14,9 ps	4 ps	0,25
Fluke 5520A-SC1100, KL22097	714 ps	9,1 ps	712 ps	27,0 ps	2 ps	0,07
Tektronix CG5011, KL22048	981 ps	11,8 ps	967 ps	36,3 ps	14 ps	0,37

IX.4.2 Bestimmung der Anstiegszeit von Oszilloskopen

Die Kalibrierung der Anstiegszeit wird bei Oszilloskopen (tr_{scope}) mit automatischer oder Cursor-Messfunktion durchgeführt. Da die Anstiegszeit nur in Ausnahmefällen vom Hersteller angegeben wird, bzw. dann meist einen rechnerischen Wert aus

$$Anstiegszeit \equiv \frac{0,35}{Bandbreite}$$

darstellt, ermöglicht die Kalibrierung der Anstiegszeit darüber hinaus die Angabe des „Anstiegszeit-Bandbreiten-Verhältnisses“ des Oszilloskops. Messungen an digitalen Sampling Oszilloskopen haben dabei ergeben, dass meist mit Werten größer als bei der idealen Annahme eines Gauß-Tiefpasses von 0,35 zu rechnen ist (Tabelle IX.4.2.1).

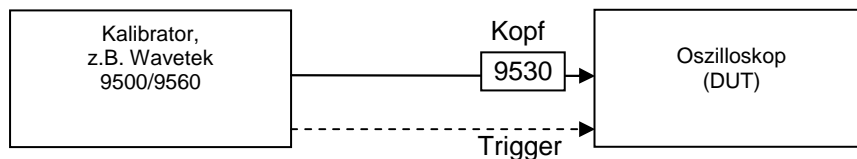
Messobjekt (DUT), Identifikation	Puls tr_{pulse}^5	gemessen $tr_{measured}$	errechnet tr_{scope}	Bandbreite BW_{scope}	Ergebnis $BW_{scope} \cdot tr_{oszi}$
Tektronix TDS 3052B, PM KL16066	146 ps	672 ps	656 ps	605 MHz	0,397
Tektronix TDS3052B, PM KL16053	146 ps	620 ps	603 ps	687 MHz	0,414
Tektronix TDS3052B, PM KL16051	146 ps	680 ps	664 ps	580 MHz	0,385
LeCroy WaveJet 352, PM KL16073	146 ps	720 ps	705 ps	575 MHz	0,405

Tabelle IX.4.2.1 – Anstiegszeit-Bandbreiten-Verhältnisse verschiedener 500 MHz Oszilloskope

Soll die Anstiegszeit des Oszilloskops, nicht aber nur die Systemanstiegszeit ($tr_{measured}$) von Oszilloskop und Puls (tr_{pulse} = Kalibrator) ermittelt werden, muss die des Kalibrators bekannt sein (Ermittlung siehe IX.4.1.).

Die in etwa zu erwartende Anstiegszeit errechnet sich dann wie oben beschrieben. Für die Realisierung möglichst kleiner Messunsicherheiten sollte die Anstiegszeit des Test-Pulses mindestens gleich, besser aber sogar kleiner als die zu bestimmende Anstiegszeit des Oszilloskopes sein.

Kalibrierverfahren:



Der Kalibriergegenstand wird an den Oszilloskopkalibrator angeschlossen. Je nach Kalibrator und Kopf ist es notwendig, einen sog. 50 Ohm-Durchgangswiderstand (Feedthru) zu benutzen, falls das Oszilloskop über keinen 50 Ohm-Eingang verfügt. Das Signal wird auf 1 Vpp, 1 MHz (alternativ 100 kHz) eingestellt.

Am Oszilloskop wird nun die Horizontalablenkung so verändert, dass nur noch die ansteigende Flanke des Spannungssprunges inklusive einer Beruhigungsstrecke für Überschwinger, sowie eine kurze „Base“-Strecke (0 % - Linie) zu sehen ist. Die Einstellung für das stabilste und am besten reproduzierbare Ergebnis variiert je nach Typ des Kalibriergegenstandes. Es sollte jedoch davon ausgegangen werden, dass das Oszilloskop die Messdaten für Amplitude (für die Berechnung der 10%-90%-Levels) und Zeit nur aus den am Bildschirm dargestellten Punkten nimmt. Je nach Typ kann also ein lokales Maximum („High“) oder Minimum („Low“) eines Überschwingers am Ende des Schirms

⁵ Wavetek 9500/9530 Oszilloskopkalibrator, 1 Vpp

die Amplitudenmessung verfälschen. Als zweckmäßig hat sich dabei eine horizontale Skalenteilaufösung von ca. 5facher Anstiegszeit bei maximaler Abtastrate erwiesen (siehe Bild IX.4.2.2).

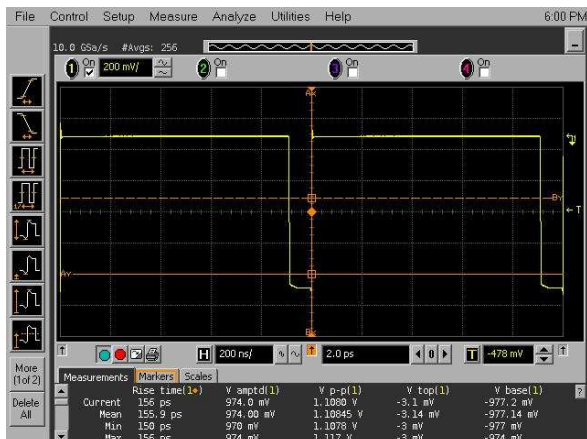


Bild IX.4.2.1 mehrere Pulse



Bild IX.4.2.2 optimale Darstellung am Bildschirm. Base- und Topline sind „gut“ eingeschungen.

Die vom Kalibriergegenstand gemessene Anstiegszeit stellt die des Systems aus Oszilloskop und Puls (Kalibrator) dar. Die Anstiegszeit des Oszilloskops alleine errechnet sich dann wie folgt:

$$tr_{Scope}^2 = \sqrt{tr_{measured}^2 - tr_{Pulse}^2};$$

typische Anstiegszeiten der relevanten Normale (ermittelt nach IX.4.2):

Hersteller	Modell	Identifikation PM-Nr.	Einstellung	Spg.	Frequenz	Anstiegszeit
Wavetek	9500/9530	KL22058	500 ps	1 V	1 MHz	368 ps
			150 ps	0,5 V		364 ps
	9500/9510	KL22094	500 ps	1 V		144 ps
			500 ps	0,5 V		145 ps
Fluke	9500B/9510	KL22093	500 ps	1 V	100 kHz	412 ps
			70 ps	0,5 V		418 ps
	5500A-SC600	KL22091	Edge	1 V		420 ps
			Edge	0,5 V		65,8 ps
	5500A-SC300	KL22079	Edge	1 V		67,3 ps
			Edge	0,5 V		212 ps
5520A-SC1100	KL22097	Edge	1 V	217 ps		
Tektronix	CG5011	KL22048	Edge	1 V	714 ps	
			FastEdge	1 V	736 ps	
	CG5011	KL24017	Edge	1 V	251 ps	
			FastEdge	1 V	250 ps	
	CG5011	KL17030	Edge	1 V	981 ps	
			FastEdge	1 V	133 ps	
PG506	KL22074	FastRise	1 V	961 ps		
						171 ps
						808 ps
						136 ps
						946 ps

Da erhebliche Abhängigkeiten von der Einstellung des Messobjektes nicht untypisch sind sollten im Kalibrierschein immer

- Horizontaleinstellung (Time / Div)
- Vertikaleinstellung (Gain / Div)
- Offset
- Position (Delay)

vermerkt werden.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am: 07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	30 von 30

IX.4.2.1 Messunsicherheitsbudget

Vorgegebene bzw. ermittelte Größen:

$tr_{measured}$ Die mit Hilfe der automatischen Mess- oder Cursorfunktion des Messobjektes gemessene bzw. angezeigte Anstiegszeit, ohne Berücksichtigung der Anstiegszeit des Kalibrators.

tr_{Pulse} Anstiegszeit des Kalibriernormals, bestehend aus dem Oszilloskopkalibrator und dem zugehörigen Kopf (Tektronix CG 5011, Wavetek 9500) bzw. der zugehörigen individuellen BNC-Leitung (Fluke 55xxA). Die Anstiegszeiten der Kalibriernormale werden wie in IX.4.1., die Messunsicherheiten wie in IX.4.1.2 beschrieben ermittelt.

Gesuchte Größe:

tr_{Scope} Anstiegszeit (10% - 90%) des Oszilloskopes unter Berücksichtigung der Anstiegsszeit des Normals

Modellgleichung:

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich:

$$tr_{Scope} = \sqrt{(tr_{measured} + \delta_{timebase} + \delta_{transmission} + \delta_{equation} + \delta_{reflevel} + \delta_{random})^2 - tr_{Pulse}^2}$$

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(\Delta Y) = c_2^2 u_{Pulse}^2 + c_1^2 u_{timebase}^2 + c_1^2 u_{transmission}^2 + c_1^2 u_{equation}^2 + c_1^2 u_{reflevel}^2 + c_1^2 u_{random}^2$$

IX.4.2.2 Ergebnisse

Zusammengefasst ergibt sich für die kleinsten angebaren Messunsicherheiten:

$tr_{measured}$	tr_{Pulse}	tr_{UUT}	erw. MU	in %	interpoliert
Fluke 9500/9560 als Normal					
89 ps	65,8 ps	60 ps	5,3 ps	9%	4,9 ps
100 ps	65,8 ps	75 ps	4,9 ps	7%	5,1 ps
150 ps	65,8 ps	135 ps	4,7 ps	3%	6,0 ps
300 ps	65,8 ps	293 ps	6,7 ps	2%	8,4 ps
500 ps	65,8 ps	496 ps	10,1 ps	2%	11,4 ps
1000 ps	65,8 ps	998 ps	19,0 ps	2%	19,0 ps
Tektronix CG5011 als Normal					
224 ps	133 ps	180 ps	6,9 ps	4%	6,7 ps
300 ps	133 ps	269 ps	7,4 ps	3%	8,0 ps
400 ps	133 ps	377 ps	8,8 ps	2%	9,7 ps
500 ps	133 ps	482 ps	10,4 ps	2%	11,2 ps
750 ps	133 ps	738 ps	14,7 ps	2%	15,1 ps
1000 ps	133 ps	991 ps	19,2 ps	2%	18,9 ps

Als Interpolationsformel für den darstellbaren Bereich kann somit angegeben werden:

Messgröße, Kalibriergegenstand <i>Measured Quantity or Instrument</i>	Messbereich, Messspanne <i>Range</i>	Messbedingungen, Verfahren <i>Conditions / Procedure</i>	kleinste angebare Messunsicherheit <i>Best Measurement Capability</i>	Bemerkungen <i>Remarks</i>
Oszilloskop <i>Oscilloscope</i> Anstiegszeit T <i>Risetime T</i>	70 ps bis 1 ms	0,1 V bis 3 V	$15 \cdot 10^{-3} \cdot T + 4$ ps	Fluke 9500/ 9560

Die zu Grunde liegenden **Zahlenwerte und Ergebnisse** der Berechnungen für die einzelnen Bereiche sind der mitgeltenden Excel-Tabelle

- „Messunsicherheiten Tabelle IX.4 – Anstiegszeit

zu entnehmen, die Ergebnisse werden im Leistungsnachweis aufgeführt.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am: 07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	31 von 31

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF / WR / KR am:07.01.09	von: PF am: 07.01.09	IX Kalibrieren von und mit Oszilloskopen	32 von 32