

# Laborversuch Messdatenerfassung: Messtechnik und Fehlerrechnung

---

DHBW Stuttgart – Laborentwurf: Prof. Dr. Axel Richter

## Vorbemerkungen

- 1) Zur Versuchs-Vorbereitung: Lesen Sie die im Anhang liegenden Dokumente. Sie müssen informiert sein über:
  - a. Den Aufbau und die Funktion der verwendeten Bauteile,
  - b. Die verwendeten Messverfahren und Fehlerrechnungen.
- 2) Der Laborablauf besteht aus 2 Terminen (je ca. 5 Std.) zur Versuchsdurchführung.
- 3) Am ersten Labor Tag wird eine kurze Prüfung (20 Min.) zu der zugrundeliegenden Theorie geschrieben. Diese wird benotet und trägt zu 25% zur Gesamtnote der Lehrveranstaltung bei.
- 4) Beachten Sie das gesonderte Blatt mit Hinweisen zu den Laborberichten bevor Sie anfangen diese zu schreiben.

# Versuch 1: Kapazitätsmessung eines unbekannten Kondensators (Black Box)

## Ziel der Messungen

- Bestimmung der Kapazität eines unbekannten Kondensators in einer Black-Box.

## Benötigte Geräte

- Kondensator unbekannter Größe,  $1 \text{ nF} \leq C_x \leq 10 \text{ nF}$ , in Black-Box (Nr. 18 - 30), Widerstand: Nominalwert  $4,7 \text{ k}\Omega$ , Toleranz 5%.
- Funktionsgenerator, Digital-Multimeter (DMM), Oszilloskop

## Vorgehen

- Geben Sie die Formel für die Lade- und Entladekurve eines Kondensators an und skizzieren Sie diese Funktion auf einem Blatt oder ihrem Computer.
- Erstellen Sie unter Benutzung der angegebenen Bauteile und Hilfsmittel eine Schaltung, mit der Sie das Lade- und Entladeverhalten des Kondensators mit dem Oszilloskop sichtbar machen können. Berücksichtigen und beantworten Sie dazu auch folgende Fragen:
  - Wie ist der Funktionsgenerator einzustellen? (Frequenz, Signalform, Amplitude, Offset)
  - Was muss für die verwendete Frequenz gelten?
- Bauen Sie die Schaltung auf:
  - Wie schließt man zweckmäßigerweise das Oszilloskop an den messenden Kondensator an?
  - Ermitteln Sie aus dem Verlauf der Lade-/Entladekurve die Zeitkonstante der Anordnung.
- Bestimmen Sie die Kapazität  $C_x$  des Kondensators. Messen Sie hierzu den benutzten ohm'schen Widerstand mit dem DMM. Benutzen Sie auch den Innenwiderstand des Funktionsgenerators ( $50\Omega$ )!
- Bestimmen Sie alle in der Schaltung und der Messanordnung vorkommenden absoluten bzw. relativen Einzelfehler und listen Sie diese in einer Tabelle auf. Vermerken Sie dabei auch jeweils, ob es sich um einen statistischen oder einen systematischen Fehler handelt.
- Bestimmen Sie den wahrscheinlichen und den maximalen absoluten sowie den jeweils zugehörigen relativen Gesamtfehler der Messung, und geben Sie das Messergebnis komplett an.

## Hinweise

- Die Genauigkeit bestimmt sich aus Art der Messung, Toleranz der Messgeräte (Datenblatt) und gegebenenfalls Ablesegenauigkeit (eigene Schätzung!). Bereichsendwert beim Scope ist die volle Höhe (bzw. Breite) des Schirms.
- Geräte-interne Fehlerbeiträge sind als Größtfehler zu addieren.
- Wie ist beim Oszilloskop der Spannungsmessfehler (Y-Kanal) auf einen entsprechenden Fehlerbeitrag zur Zeitablesung umzurechnen? (Stichwort: Steigung der Ladekurve).

## Zusatzfragen

- Welchen Fehler addiert der Anschluss per BNC-Kabel? Wie kann man diesen Fehler vermeiden?
- Wenn Sie in d) den Widerstand nicht gemessen hätten, sondern mit Nominalwert und Toleranz rechnen würden: hat dies einen Einfluss auf die Genauigkeit des Ergebnisses von  $C_x$  und auf seinen Gesamtfehler, und wenn ja, welchen?

## Versuch 2: Passiver Zweipol (Black Box)

### Ziel der Messungen

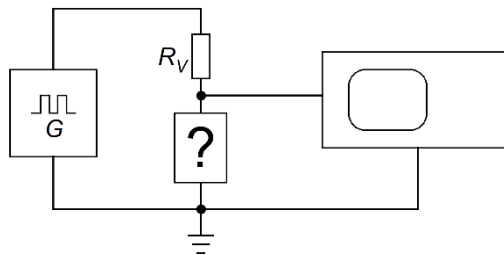
- Bestimmung der Bauteile Typen (Möglichkeiten: R, L oder C) und deren Anordnung innerhalb einer Black Box.

### Benötigte Geräte

- "Black Box" (Nr. 1 - 17) mit zwei passiven Bauelementen unbekannter Art, Größe und Verschaltung ("Zweipol"), Widerstand  $4,7\text{ k}\Omega$  Nominalwert, Toleranz 5%
- Funktionsgenerator, DMM, Oszilloskop, Netzgerät

### Vorgehen

Wir betrachten den folgenden Messaufbau, wobei der mit Fragezeichen markierte Kasten die Black Box darstellt:



- Verändern Sie die Frequenz des Rechteckgenerators und schließen Sie anhand des Oszilloskop-Schirmbilds auf den Inhalt der Black Box.
  - Versuchen Sie zunächst, prinzipiell die darin befindlichen Bauteile (Art und Verschaltung) zu erkennen.
  - Bestimmen Sie anschließend mittels der verfügbaren Hilfsmittel und der in den vorangegangenen Aufgaben erworbenen Kenntnisse die Größe dieser Bauelemente.
  - Klären Sie mit dem Betreuer, ob Ihr Ergebnis richtig ist.
  - Protokollieren Sie Ihre Daten und das Ergebnis sowie die Nummer der Black Box in Ihrer Dokumentation.

Eine Fehlerrechnung ist hier nicht erforderlich.

- Das Rechteck-Eingangssignal erscheint, wie Sie am Oszilloskop erkennen können, am Ausgang des Zweipols verzerrt.
  - Welches Bauteil (Art, Größe) ist wie (d.h. parallel oder in Serie) zu  $R_V$  zu schalten, damit das Oszilloskop einen zur Eingangsspannung proportionalen Signalverlauf darstellt?
  - Geben Sie die entsprechende Schaltskizze an! Wie wird dieses prinzipielle Verfahren in der Messtechnik benannt? Kennen Sie eine typische Anwendung?

### Zusatzfragen

- 1) Wie wirkt sich (vergl. Aufgabe 1) der Anschluss des Oszilloskops per BNC-Kabel im Vergleich zum Anschluss per Tastkopf aus? Wie sollte also gemessen werden?

## Versuch 3: Leistungsaufnahme eines elektrischen Widerstands

### Ziel der Messungen

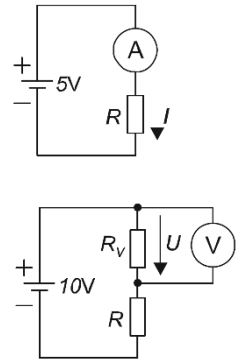
- Es soll die elektrische Leistung bestimmt werden, die bei Stromdurchfluss in einem Widerstand  $R$  anfällt.

### Benötigte Geräte

- Zwei Widerstände mit je  $1\text{ k}\Omega$  Nominalwert, Toleranz 5%
- Netzgerät, DMM (mit Datenblatt), Steckbrett

### Vorgehen

- Messen Sie beide Widerstände aus (Erhöhung der Genauigkeit).
- Bestimmen Sie die Leistung über  $P = I^2 R$  mittels direkter Strommessung gemäß Schaltskizze. Geben Sie dazu die Ungenauigkeit des Ergebnisses in Form des wahrscheinlichen, wie auch des maximalen Messfehlers (relativ sowie absolut) an, indem Sie die einzelnen Fehlerbeiträge bestimmen und diese nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz zum Gesamtfehler des Ergebnisses verrechnen.
- Bestimmen Sie erneut die Leistung durch indirekte Strommessung, gemäß  $P = \left(\frac{U}{R_V}\right)^2 R$ , wobei als  $R_V$  der zweite Widerstand dient. Machen Sie auch hier analog zu b) eine Betrachtung zur Fehlerfortpflanzung.
- Begründen Sie aus den Betrachtungen der Fehlerrechnung, welches der beiden Verfahren b) oder c) eine genauere Bestimmung der Leistung ergibt.



## Versuch 4: Widerstandsmessung mittels Vierdrahtmethode

### Ziel der Messungen

- Es soll der (sehr niederohmige) Übergangswiderstand eines Kabels inklusive seiner Steckverbinder mittels der Vierdrahtmethode gemessen werden.

### Benötigte Geräte

- Verschiedene Labor-Messkabel
- Netzgerät, DMM

### Vorgehen

- Skizzieren und realisieren Sie den hierzu erforderlichen Aufbau.
- Bestimmen Sie den Widerstand eines Kabels. Achten Sie genau darauf, dass Sie hierbei nur den gesuchten Widerstandswert bestimmen (und nicht zusätzliche "parasitäre" Widerstände weiterer Steckverbindungen einbezogen werden) und tragen Sie ihn in die Skizze ein!

Eine Fehlerrechnung ist bei dieser Aufgabe nicht erforderlich.

### Zusatzfragen

- In welchem Modus wird das Netzgerät betrieben: Konstantspannungs- oder Konstantstrom Modus?
- Welchen Einfluss hat die Höhe des eingestellten Werts der Messstrombegrenzung?
- Welche Grenzen hat die Höhe dieses Stroms
  - o seitens des Netzgeräts
  - o seitens der vorgegebenen Anwendung
  - o bei anderen Anwendungen? (Überlegen Sie, welche generelle Regel sinnvoll sein könnte).

## Versuch 5: Statistik

### Ziel der Messungen

- Bestimmung einer gemessenen Zufallsverteilung und ihrer Eigenschaften (Momente). Hierbei stellt das vorgegebene Los von Widerständen eine willkürlich entnommene Stichprobe einer vom Hersteller erzeugten Grundgesamtheit dar.

### Benötigte Geräte

- Stichprobe ("Los") aus 25 gleichen Widerständen, gegurtet; Nominalwert siehe Farbcode, Toleranz 5%; alle Widerstände im Gurt belassen!
- DMM

### Vorgehen

- Messen Sie die Werte aller 25 Widerstände.
- Wählen Sie anhand Ihrer Messwerte eine geeignete Klassengröße und zeichnen Sie die Verteilung der Messwerte (Histogramm-Darstellung).
- Berechnen Sie aus den Messwerten die beiden wichtigsten statistischen Momente einer Verteilung, den Mittelwert und die empirische Standardabweichung, und zeichnen Sie diese Werte in das unter b) erstellte Diagramm ein.
- Können Sie die vom Hersteller spezifizierte Bauteiltoleranz ebenfalls in das Diagramm einzeichnen? Um welchen Faktor ist sie größer als die von Ihnen ermittelte empirische Standardabweichung? Warum gibt der Hersteller seinen Toleranzwert wohl so "großzügig" an?
- Wir vergleichen die invertierende und die nicht-invertierende Grundsaltung eines Operationsverstärkers
  - Geben Sie jeweils die allgemeine Spannungsverstärkung  $A_V$  (Formel) an.
  - Der Gegenkopplungswiderstand werde nun durch einen an der oberen Toleranzgrenze (des Herstellers) liegenden Wert ersetzt. Wie groß ist in beiden betrachteten Fällen jeweils die relative Verstärkungsänderung? Allgemeine Herleitung über das Fehlerfortpflanzungsgesetz und Zahlenbeispiel.
  - Welche der beiden Grundsaltungen reagiert empfindlicher?

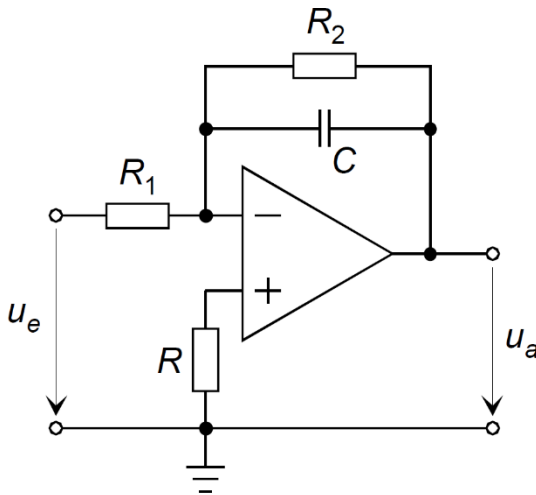
## Versuch 6: Aktiver Tiefpass erster Ordnung

### Ziel der Messungen

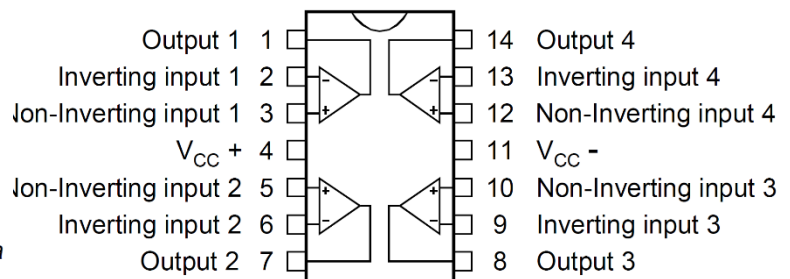
- Bestimmung der frequenzabhängigen Verstärkung eines aktiven Tiefpasses.

### Benötigte Geräte

- Bauteile und Schaltskizze für den aktiven Tiefpass
- Funktionsgenerator, Oszilloskop, Netzgerät



OpAmp: Typ TL074; Pinbelegung:



### Vorgehen

Wir betrachten die Schaltung eines aktiven Tiefpasses mit den Werten:

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega, R_2 = 10 \text{ k}\Omega, C = 10 \text{ nF}$$

- Welche Aufgabe hat der Widerstand  $R$ ? Wie ist er somit zu bemessen? Warum ist er bei der Schaltungsanalyse nicht zu berücksichtigen?
- Erläutern Sie die Schaltungsfunktion und leiten Sie die Funktion  $A_V = \frac{u_a}{u_e}$  als Funktion der Sinus-Signalfrequenz  $f$  ab (diese Funktion ist eine komplexe Größe!).  
*Hinweis:* Am einfachsten setzen Sie bei der Formel für den invertierenden Verstärker auf und ersetzen den Wert des ohm'schen Gegenkopplungswiderstands durch die Parallelschaltung mit der Kondensator-Impedanz (in komplexer Schreibweise).
- Messbar ist nur der reelle Betrag von  $|A_V| = \sqrt{A_V \times (A_V)^*}$ . Zeigen Sie, dass folgende Form gilt:  
 $|A_V| = C_1 \frac{1}{\sqrt{1+C_2(f)^2}}$ . Was ergibt sich für die Konstante  $C_1$  und was für das frequenzabhängige  $C_2(f)$ ?
- Zeichnen Sie den Verlauf von  $|A_V|$  doppelt-logarithmisch, entweder in das (doppelt-logarithmische) Papier oder über ein Zeichenprogramm (Skalierung geeignet wählen!).  
*Hinweis:* Gehen Sie beim Zeichnen per Hand wie folgt vor:
  - Bestimmen Sie zunächst die Grenzfrequenz  $f_c$  des Tiefpasses. Das ist die Frequenz, bei der  $C_2(f) = 1$ . Zahlenwert?
  - Für den Frequenzbereich FB1 ganz niedriger Frequenzen (also  $f \ll f_c$ ) ist der frequenzabhängige Term im Vergleich zum konstanten Summanden vernachlässigbar. Wie groß ist  $|A_V|$  hier? In der doppelt-logarithmischen Darstellung ergibt sich eine Gerade, die sich leicht zeichnen lässt.
  - Im Bereich der Grenzfrequenz (FB2, etwa  $0,25 f_c < f < 4 f_c$ ) sind die  $|A_V|$ -Werte für einige Punkte separat zu berechnen und die Kurve entsprechend zu zeichnen.
  - Wie ist die Formel für  $|A_V|$  im Frequenzbereich FB3 weit oberhalb der Eckfrequenz (also für  $f \gg f_c$ )? Es ergibt sich in der doppelt-logarithmischen Darstellung wieder eine Gerade für den Verlauf von  $|A_V|$ .
- Berechnen Sie anhand der in d) hergeleiteten Formeln für die beiden Frequenzbereiche FB1 und FB3 exemplarisch den relativen Größtfehler, der sich aus den Bauteiletoleranzen ergibt. Nehmen Sie hierbei der Einfachheit halber für die Toleranzen von  $R_1$  und  $R_2$  jeweils 5% an und 10% für  $C$ . Den Operationsverstärker betrachten wir als ideal. Rechnen Sie die so berechneten relativen Fehler für die

Bereiche FB1 und FB3 in absolute Fehler um und tragen Sie diese zu dem in d) berechneten Frequenzgang in Ihr Diagramm ein (beachten Sie dabei die logarithmische Skalierung!). Im Bereich FB2 skizzieren Sie den Verlauf des Toleranzbandes parallel zum  $|A_V|$ -Kurvenverlauf.

- f) Messen Sie den Frequenzgang des aktiven Tiefpasses bei geeignet ausgewählten Frequenzen, z. B. im 1:2:5-Muster (also z.B. 100Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1 kHz, bis 100 kHz), im Bereich von  $f_c$  etwas genauer. Erstellen Sie eine Messwert-Tabelle! Welche Signalform ist bei dieser Messung zu wählen? Warum? Messen Sie noch folgende Größen:

- 1) Die Spannungsverstärkung bei sehr niedrigen Frequenzen (Bereich FB1 mit  $f \ll f_c$ ).
- 2) Bei welcher Frequenz sinkt die Verstärkung auf einen Wert, der im Vergleich zu 1) um den Faktor Wurzel 2 kleiner ist (soll genau  $f_c$  sein)? Stellen Sie die beiden Y-Cursor entsprechend ein und erhöhen Sie die Frequenz langsam, bis die Ausgangsspannung die durch die Cursor gegebene Grenze erreicht. Wie groß ist die Differenz zwischen dieser Frequenz und der in c) berechneten Grenzfrequenz? Geben Sie diese Abweichung auch in Prozent von  $f_c$  an.
- 3) Bei welcher Frequenz erreicht die Verstärkung den Wert 1? Wie nennt man diese Frequenz?

- g) Prüfen und diskutieren Sie nun folgende Aspekte:

- 1) Liegen die nach e) gemessenen Werte der Verstärkung  $|A_V|$  innerhalb des Toleranzbandes (d.h. innerhalb der berechneten Fehlergrenzen)?
- 2) Ist grundsätzlich zu erwarten, dass alle gemessenen Werte innerhalb der (richtig berechneten) Fehlergrenzen liegen? Erläutern Sie Ihre Aussage!

Detaillierte Spezifikationen des Fluke 87			
Funktion	Bereich	Auflösung	Genauigkeit
mA (Gleichstrom)	60.0 mA	0.01 mA	$\pm (0.2\% + 4)$
	400.0 mA	0.1 mA	$\pm (0.2\% + 2)$
	6.0 A	0.001 A	$\pm (0.2\% + 4)$
	10.0 A	0.01 A	$\pm (0.2\% + 2)$
$\mu$ A (Gleichstrom)	600.0 $\mu$ A	0.1 $\mu$ A	$\pm (0.2\% + 4)$
	6000 $\mu$ A	1 $\mu$ A	$\pm (0.2\% + 2)$
V (Gleichspannung)	6.0 V	0.001 V	$\pm (0.05\% + 1)$
	60.0 V	0.01 V	$\pm (0.05\% + 1)$
	600.0 V	0.1 V	$\pm (0.05\% + 1)$
	1000.0 V	1 V	$\pm (0.05\% + 1)$
mV (Gleichspannung)	600.0 mV	0.1 mV	$\pm (0.1\% + 1)$
$\Omega$ (Widerstand)	600.0 $\Omega$	0.1 $\Omega$	$\pm (0.02\% + 2)$
	6.0 k $\Omega$	0.001 k $\Omega$	$\pm (0.02\% + 1)$
	60.0 k $\Omega$	0.01 k $\Omega$	$\pm (0.02\% + 1)$
	600.0 k $\Omega$	0.1 k $\Omega$	$\pm (0.6\% + 1)$
	6.0 M $\Omega$	0.001 M $\Omega$	$\pm (0.6\% + 1)$
	50.0 M $\Omega$	0.01 M $\Omega$	$\pm (1.0\% + 3)$

Funktionsgenerator Tektronix AFG3022B	
Eigenschaften	
Kanäle	2
Signalform	Sinus, Rechteck, Dreieck, etc.
Sinussignal	1 $\mu$ Hz bis 20 MHz
Rechtecksignal	1 $\mu$ Hz bis 12.5 MHz
Anstiegs- / Abfallszeit	$\leq 18$ ns
Amplitude (50 $\Omega$ Last)	10 mV <sub>p-p</sub> bis 10 V <sub>p-p</sub>
Amplitude, offener Kreis	20 mV <sub>p-p</sub> bis 20 V <sub>p-p</sub>
Genauigkeit	$\pm (1\% \text{ der Einstellung} + 1\text{mV})$
Ausgangswiderstand (Innenwiderstand)	50 $\Omega$
DC offset range, 50 $\Omega$ Last	$\pm (5 V_{pk} - \text{Amplitude}_{pp} / 2)$
DC offset range, offener Kreis	$\pm (10 V_{pk} - \text{Amplitude}_{pp} / 2)$
Genauigkeit	$\pm (1\% \text{ der Einstellung} + 5 \text{ mV} + 0.5\% \text{ der Amplitude } (V_{p-p}))$

- Aufwärmdauer ca. 20 Minuten.
- Positives TTL-Signal für 1k $\Omega$ .
- Frequenzeinstellung 1 $\mu$ Hz oder 12 Digits.





### Performance Characteristics

#### Oscilloscopes overview

	EDUX1002A/EDUX1002G	DSOX1102A/DSOX1102G
Bandwidth (-3 dB) <sup>1,2</sup>	50 MHz	70 MHz 100 MHz with option DSOX1B7T102
Calculated rise time (10 to 90%)	≤ 7 ns	≤ 5 ns ≤ 3.5 ns (100 MHz model)
Input channels	2	2
Maximum sample rate	1 GSa/s	2 GSa/s
Maximum memory depth	100 kpts	1 Mpts
Waveform update rate	≥ 50,000 waveforms/sec	≥ 50,000 waveforms/sec

#### Vertical system analog channels

	EDUX1002A/EDUX1002G	DSOX1102A/DSOX1102G
Input coupling	DC, AC (10 Hz cutoff frequency)	DC, AC (10 Hz cutoff frequency)
Input impedance/capacitance	1 MΩ ± 2%/16 pF ± 3 pF	1 MΩ ± 2%/16 pF ± 3 pF
Input sensitivity range <sup>3</sup>	500 μV/div to 10 V/div	500 μV/div to 10 V/div
Standard probes	N2142A 1/10 switchable 75 MHz (2 included)	N2140A 1/10 switchable 200 MHz (2 included)
Probe attenuation factor	0.1X to 1000X in 1-2-5 sequence; (-20 dB to +80 dB in 0.1 dB steps)	0.1X to 1000X in 1-2-5 sequence; (-20 dB to +80 dB in 0.1 dB steps)
Hardware bandwidth limits	Approximately 20 MHz (selectable)	Approximately 20 MHz (selectable)
Vertical resolution	8 bits	8 bits
Invert signal	Selectable	Selectable
Maximum input voltage	150 Vrms, 200 Vpk	150 Vrms, 200 Vpk
DC vertical accuracy	± [DC vertical gain accuracy + DC vertical offset accuracy + 0.25% full scale]	± [DC vertical gain accuracy + DC vertical offset accuracy + 0.25% full scale]
DC vertical gain accuracy <sup>1</sup>	+3% full scale (> 10 mV/div) +4% full scale (< 10 mV/div)	+3% full scale (> 10 mV/div) +4% full scale (< 10 mV/div)
DC vertical offset accuracy	± 0.1 div ± 2 mV ± 1% of offset setting	± 0.1 div ± 2 mV ± 1% of offset setting
Skew	Channel to channel: 1 ns (without deskew) Channel to external: 2 ns (without deskew)	Channel to channel: 1 ns (without deskew) Channel to external: 2 ns (without deskew)
Offset range	500 uV/div to 200 mV/div: +2 V > 200 mV/div to 10 V/div: +100 V	500 uV/div to 200 mV/div: +2 V > 200 mV/div to 10 V/div: +100 V

1. Denotes warranted specifications; All others are typical. Specifications are valid after a 30-minute warm-up period and from ± 10 °C user calibration temperature.
2. For 1 mV/div to 10 V/div settings. Bandwidth is 20 MHz at the 500 μV/div setting.
3. 500 μV/div is a magnification of 1 mV/div setting.

## Performance Characteristics (Continued)

### Horizontal system analog channels

	EDUX1002A/EDUX1002G		DSOX1102A/DSOX1102G
Time base range	5 ns/div to 50 s/div		5 ns/div to 50 s/div
Horizontal resolution	2.5 ps		2.5 ps
Time base accuracy <sup>1</sup>	50 ppm $\pm$ 5 ppm per year (aging)		50 ppm $\pm$ 5 ppm per year (aging)
Time base delay time range	Pre-trigger	Greater of 1 screen width or 200 $\mu$ s	Greater of 1 screen width or 200 $\mu$ s
	Post-trigger	1 to 500 s	1 to 500 s
Channel to channel deskew range	$\pm$ 100 ns		$\pm$ 100 ns
$\Delta$ Time accuracy (using cursors)	$\pm$ (time base acc. x reading) $\pm$ (0.0016 x screen width) $\pm$ 200 ps (same channel)		$\pm$ (time base acc. x reading) $\pm$ (0.0016 x screen width) $\pm$ 200 ps (same channel)
Modes	Main, zoom, roll, XY		Main, zoom, roll, XY
XY	X = channel 1, Y = channel 2, Z = external trigger, 1.4 V blanking		X = channel 1, Y = channel 2, Z = external trigger, 1.4 V blanking
	Bandwidth: Maximum bandwidth. Phase error at 1 MHz: < 0.5 degree		Bandwidth: Maximum bandwidth. Phase error at 1 MHz: < 0.5 degree

1. Denotes warranted specifications; All others are typical. Specifications are valid after a 30-minute warm-up period and from  $\pm$  10 °C user calibration temperature.

### Waveform measurements

	EDUX1002A/EDUX1002G/DSOX1102A/DSOX1102G	
Cursors	Single cursor accuracy: $\pm$ [DC vertical gain accuracy + DC vertical offset accuracy + 0.25% full scale]	
	Dual cursor accuracy: $\pm$ [DC vertical gain accuracy + 0.5% full scale]	
	Units: Seconds(s), Hz (1/s), phase (degrees)	
Automatic measurements	Measurements continuously updated with statistics. Cursors track last selected measurement. Select up to eight measurements from the list below:	
	Snapshot	Measure all single waveform measurements (24)
	Voltage	Peak-to-peak, maximum, minimum, amplitude, top, base, overshoot, pre-shoot, average- N cycles, average-full screen, DC RMS-N cycles, DC RMS-full screen, AC RMS-N cycles, AC RMS-full screen (standard deviation)
	Time	Period, frequency, counter, + width, - width, +duty cycle, -duty cycle, bit rate, rise time, fall time, delay, phase, X at min Y, X at max Y
Automatic measurement logging	Available via BenchVue BV0004B	

## Messungen mit dem Oszilloskop Keysight DSOX1102A: Fehlerrechnung

Beispiel:

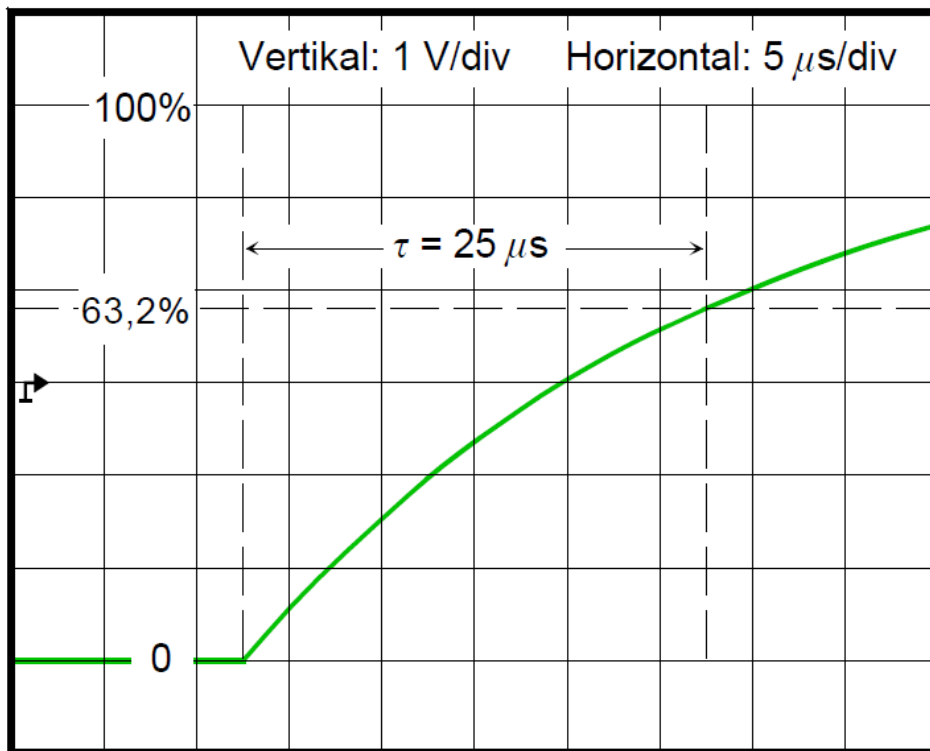
Ein Kondensator  $C$  wird über einen Widerstand  $R$  aufgeladen, wobei ein Spannungssprung  $U_0 = 6V$  angelegt und der Spannungsanstieg am Kondensator mit dem Oszilloskop gemessen werden soll. Es gilt hierbei:

$$U_C(t) = U_0 (1 - e^{-t/\tau}) \quad \text{mit} \quad \tau = RC \text{ (Zeitkonstante)}$$

Zum Zeitpunkt  $t = \tau$  ist der Kondensator auf  $(1 - 1/e)$  der Sprungamplitude aufgeladen, dies sind etwa 63,2% von  $U_0$ . An dieser Stelle ist der Wert von  $\tau$  sowie die gemäß Datenblatt zu berücksichtigende Messunsicherheit zu bestimmen.

Vorgehen:

Zuerst wird der Spannungsanstieg  $U_C(t)$  so auf dem Schirmbild dargestellt, dass der eingeschwungene Zustand (also die 100% des Spannungssprungs, die nach ca.  $5\tau$  erreicht sind) sauber gemessen werden können. Danach wird das Bild in  $x$ -Richtung gedehnt, bis die Bildschirmbreite weitgehend ausgenutzt ist:



Einstellungen:

Y: Signalamplitude = 6V; Signal mit 3V Offset dargestellt, damit das Signal (etwa) mittig ist;

Cursor Y1 auf unteren Pegel, Cursor Y2 auf 63,2% von  $U_0$ .

X: Cursor X1 auf Beginn des Spannungssprungs, Cursor X2 auf Schnittpunkt von Y2 mit Kurve.

Ablesung:  $\Delta X = X_2 - X_1 = \tau$  (hier:  $25 \mu s$ ). Dies ist der Messwert.

Messunsicherheit:

Der Messwert ist nun bzgl. seiner Genauigkeit zu bewerten, d.h. es ist  $\Delta\tau$  zu bestimmen.

Hierbei gehen sowohl die vertikalen und horizontalen Genauigkeiten des Oszilloskops ein, aber auch der Kurvenverlauf und die Einstellgenauigkeit der Cursor.



# Messungen mit dem Oszilloskop Keysight DSOX1102A: Fehlerrechnung

## A. Vertikale Messungenauigkeit

Es gibt zur Messung der Spannungsamplitude zwei Möglichkeiten: die einzelne Messung von niedrigem und hohem Pegel mit einem Cursor oder die Dual-Cursor-Differenzmessung.

### 1) Ein-Cursor-Messung

Das Datenblatt gibt für die Messgenauigkeit (single cursor accuracy) an:

$$\begin{aligned} \text{DC vertical accuracy} &= \text{DC vertical gain accuracy} + \\ &\quad + \text{DC vertical offset accuracy} + \\ &\quad + 0,25\% \text{ full scale} \\ \text{mit } \text{DC vertical gain accuracy} &= 3\% \text{ full scale} &= 3\% * 8\text{V} &= 240 \text{ mV} \\ \text{DC vertical offset accuracy} &= 0,1 \text{ div} + &= 0,1 * 1\text{V} &= 100 \text{ mV} \\ &2 \text{ mV} + & &= 2 \text{ mV} \\ &1\% \text{ of offset setting} &= 1\% * 3\text{V} &= 30 \text{ mV} \\ 0,25\% \text{ full scale} & &= 0,25\% * 8\text{V} &= 20 \text{ mV} \end{aligned}$$

Somit ist die single-cursor-Messungenauigkeit  $\Delta U = \pm 392 \text{ mV}$

Bemerkung: Misst man die beiden Pegel des Signals separat aus und bildet die Differenz zur Bestimmung der Amplitude, so können sich die Messungenauigkeiten im worst case addieren, so dass der Messwert mit einer Ungenauigkeit von  $\pm 784 \text{ mV}$  behaftet wäre.

### 2) Dual-Cursor-Messung

Das Datenblatt gibt für die Messgenauigkeit (dual cursor accuracy) hier an:

$$\begin{aligned} \text{Dual cursor accuracy} &= \text{DC vertical gain accuracy} + \\ &\quad + 0,5\% \text{ full scale} \\ \text{mit } \text{DC vertical gain accuracy} &= 3\% \text{ full scale} &= 3\% * 8\text{V} &= 240 \text{ mV} \\ 0,5\% \text{ full scale} & &= 0,5\% * 8\text{V} &= 40 \text{ mV} \end{aligned}$$

Somit ist die dual-cursor-Messungenauigkeit  $\pm 280 \text{ mV}$

Bemerkung 1: Diese Messung ist wesentlich genauer; das dual-cursor-Verfahren sollte daher möglichst immer angewendet werden.

Bemerkung 2: die „full scale“-Beiträge schlagen erheblich zu Buche (beim single cursor mit insgesamt 3,25% (hier: 260 mV) als der dominierende Anteil und beim dual cursor mit 3,5% (hier sogar der Gesamtfehler!).

**Daher ist es ganz wichtig, für eine genaue Messung das Signal so zu spreizen, dass der Bildschirm möglichst ausgefüllt wird!**

## B. Horizontale Messungenauigkeit

Laut Datenblatt ist die horizontale Ungenauigkeit ( $\Delta$  Time accuracy) bei Benutzung der Zwei-Cursor-Messung gegeben durch:

$$\begin{aligned} \Delta \text{ Time accuracy} &= \text{Time base accuracy} * \text{Messwert} + &= 80 \text{ ppm} * 25 \mu\text{s} &= 2,0 \text{ ns} \\ &0,0016 \text{ full scale} + &= 0,0016 * 50 \mu\text{s} &= 80,0 \text{ ns} \\ &0,2 \text{ ns} & &= 0,2 \text{ ns} \end{aligned}$$

(hierbei gilt: Time base accuracy = (50 ppm + 5 ppm \* Gerätealter in Jahren) => 80 ppm)

Somit ist die horizontale Cursor-Messungenauigkeit  $\Delta t = \pm 82,2 \text{ ns}$

Bemerkung: Auch im Horizontalsystem ist der maßgebliche Beitrag zur Messungenauigkeit gegeben durch den full-scale-Anteil

**=> Signal spreizen, um den Bildschirm optimal zu nutzen!**

## Messungen mit dem Oszilloskop Keysight DSOX1102A: Fehlerrechnung

### C. Einstellungenauigkeit der Cursor

Die Einstellung der Cursor (sowohl horizontal wie vertikal) ist nicht stetig möglich, sondern ist digital gerastet.

Bei den angegebenen Einstellungen beträgt diese Rastung:

- horizontal (bei  $5 \mu\text{s} / \text{div}$ ) : 100 ns

+ vertikal (bei  $1 \text{ V} / \text{div}$ ): 12,5mV

Es ist bei der Messung daher zu prüfen, ob die Cursor sich genügend genau und eindeutig positionieren lassen. Falls nicht, ist z.B. 1/2-Rasterschritt zur Messungenauigkeit zu addieren.

### D. Einfluss der vertikalen Messungenauigkeit auf die Messung der Zeitkonstante

Die Unsicherheit der Messung im Vertikal-Kanal wirkt sich über die Steigung der gemessenen Kurve auch auf die Messung im Horizontal-Kanal aus und gibt hier einen zusätzlichen Beitrag zur Messungenauigkeit.

Konkret gilt:

$$\text{Steigung } m = \frac{\Delta U}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{1}{m} \Delta U$$

Für die Ladekurve des Kondensators gilt:

$$U_C(t) = U_0 (1 - e^{-t/\tau}) \Rightarrow m_\tau = \left. \frac{dU_C}{dt} \right|_{t=\tau} = \frac{U_0}{e \tau} = \frac{6 \text{ V}}{e \cdot 25 \mu\text{s}} = 88,3 \text{ V/ms}$$

Die bei der Dual-Cursor-Messung der Spannungsamplitude ermittelte Messungenauigkeit von 280 mV wird damit in einen Beitrag zur horizontalen Messungenauigkeit umzurechnen sein gemäß

$$\Delta t_v = \frac{280 \text{ mV}}{88,3 \text{ V/ms}} = 3,17 \mu\text{s}$$

Die Gesamt-Ungenauigkeit für die Bestimmung der Zeitkonstanten ist also

$$\Delta t = \pm (3,17 + 0,082) \mu\text{s} = \pm 3,25 \mu\text{s}$$

Dieser Wert ist fast ausschließlich durch die Messunsicherheit der Spannungsmessung verursacht!

### E. Angabe des Messergebnisses

Das Messergebnis lautet insgesamt:

$$\tau = (25 \pm 3,25) \mu\text{s} \quad \text{bzw.} \quad \tau = 25 \mu\text{s} \pm 13\%$$