

E 3a „Messungen mit dem Oszilloskop“

Toshiki Ishii (Matrikel 3266690)

29.04.2013

Studiengang Chemie (Bachelor of Science)

Aufgabenstellung

1. Bestimmung der Ablenkempfindlichkeiten s des Oszilloskops durch Messung der Ablenkung (b_x, b_y) des Elektronenstrahls bei zwei unterschiedlichen Paaren von Ablenkoeffizienten (a_x, a_y) und bekannten eingehenden Gleichspannungen (U_x, U_y) .
2. Charakterisierung der aus einer Generatorbox ausgehenden Spannungen nach Signalform, Frequenz f und Spitze-Spitze-Wert U_{ss} . Messung der Effektivspannung U_{eff} mit Digitalmultimeter.
Bestimmung der Zeitbasis des Oszilloskops anhand der bekannten Frequenz eines Funktionsgenerators.
3. Bestimmung der Frequenz einer Sinusspannung anhand von mindestens fünf LISSAJOUS-Figuren.
4. Bestimmung der Zeitkonstante τ_{RC} einer RC-Schaltung für drei Widerstandswerte.
5. Bestimmung der Impedanz einer RC-Schaltung bei 100 Hz und 300 Hz.

Zubehör

- Analoges Oszilloskop
- Frequenzgenerator
- Generatorbox
- Digitalmultimeter
- OHMScher Drehwiderstand ($R = n \cdot 1000 \Omega$, mit $n \in \mathbb{N}$ und $n \leq 10$)
- Kondensator ($C = 0,315 \mu\text{F}$)
- Kabel

Grundlagen

Bewegung geladener Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern

In elektrischen Feldern werden positive Teilchen entlang der Feldlinien und negative Teilchen entgegen den Feldlinien beschleunigt, wobei die Beschleunigung \vec{a} des Teilchens mit der Ladung q und der Masse m im elektrischen Feld \vec{E} beschrieben wird durch die Gleichung

$$\vec{a} = \frac{q}{m} \cdot \vec{E}$$

In einem Magnetfeld werden elektrisch geladene Teilchen nicht beschleunigt, sondern durch die LORENTZ-Kraft abgelenkt. Dabei ist die Beschleunigung \vec{a} des geladenen Teilchens abhängig von seiner Ladung q , Masse m und Geschwindigkeit \vec{v} und dem umgebenden Magnetfeld \vec{B} :

$$\vec{a} = \frac{q}{m} \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Aufbau und Funktion eines Oszilloskops

Ein Oszilloskop ist ein Gerät zur optischen Darstellung des zeitlichen Verlaufs einer Spannung. Es besteht aus einem WEHNELT-Zylinder mit einer Glühkathode. Die Glühkathode wird durch Anlegen einer elektrischen Spannung geheizt, sodass Elektronen aus dem Kathodenmaterial freierwerden. Die Elektronen werden von einer zweiten Spannung beschleunigt und dabei zwecks Fokussierung durch eine Lochanode gelenkt. Die Elektronen werden in zwei Plattenkondensatoren mit jeweils definierter Ablenkspannung vertikal und horizontal abgelenkt und treffen dann auf einen Leuchtschirm. Dieser leuchtet beim Auftreffen des Elektronenstrahls.

Meist wird auf der x -Achse die Zeit dargestellt. Dies wird durch Anlegen einer Sägezahnspannung erreicht, die den Strahl mit konstanter Geschwindigkeit entlang der x -Achse entlangführt und bei Erreichen des rechten Randes wieder an den linken Rand positioniert. Auf der y -Achse wird eine Spannung dargestellt.

Sollte die Frequenz der auf der y -Achse darzustellenden Spannung nicht ein Vielfaches der auf der x -Achse angelegten Sägezahnspannung betragen, so wandert das Bild auf dem Oszilloskop. Um dies zu verhindern, kann eine Triggereinheit genutzt werden, die die Perioden erkennt und zwischen die Sägezahnimpulse Bereiche minimaler oder maximaler Spannung einfügt.

Messungen mit einem Oszilloskop

Eine Spannung kann mithilfe eines Oszilloskops direkt gemessen werden, indem sie als Ablenkspannung angelegt wird. Beispielsweise kann an die x -Ablenkung eine Sägezahnspannung und an die y -Ablenkung die darzustellende Spannung angelegt werden.

Ströme können über die Proportionalität

$$R = \frac{U}{I},$$

die für OHMSche Widerstände gilt, gemessen werden, indem der Spannungsabfall über einem bekannten OHMSchen Widerstand auf dem Oszilloskop dargestellt wird.

Kennt man die Frequenz f_0 der Sägezahnspannung, so kann man aus der Anzahl der auf dem Oszilloskop angezeigten Perioden die Frequenz f der dargestellten Spannung berechnen:

$$f = \frac{f_0}{n}$$

Effektivwerte

Der Effektivwert einer Spannung (eines Stromes) gibt denjenigen Wert der physikalischen Größe an, die über eine längere Zeit im Mittel die gleiche elektrische Leistung umsetzt wie eine Gleichspannung (ein Gleichstrom). Aus der Betrachtung

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot i(t) \, dt = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot \frac{u(t)}{r} \, dt \\ &= \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} r \cdot i(t) \cdot i(t) \, dt \end{aligned}$$

ergibt sich, dass dies der quadratische Mittelwert (besser: *root mean square*, Wurzel aus dem arithmetischen Mittel der über die Zeit gemittelten Quadrate) der entsprechenden Größe ist.

Frequenzmessung mittels Lissajous-Figuren

LISSAJOUS-Figuren entstehen, wenn der Elektronenstrahl der Oszilloskops sowohl auf der x - als auch auf der y -Achse durch eine sinusförmige Wechselspannung abgelenkt wird, wobei die beiden Wechselspannungen im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen zueinander stehen müssen. Dann ergibt sich auf dem Oszilloskop eine statische Figur, deren Aussehen vom Frequenzverhältnis und der Phasenverschiebung der Wechselspannungen abhängig ist. Für ein Verhältnis von $1 : 1$ ist dies beispielsweise eine Gerade ($\Delta\varphi = k \cdot \pi$ mit $k \in \mathbb{N}$), ein Kreis ($\Delta\varphi = (k + \frac{1}{2}) \cdot \pi$ mit $k \in \mathbb{N}$ und $\frac{U_x}{a_x} = \frac{U_y}{a_y}$) oder eine Ellipse (sonst).

Kennt man eine der Wechselspannungen und kann der dargestellten LISSAJOUS-Figur ein Frequenzverhältnis zuordnen, so kann man die Frequenz der anderen Wechselspannung bestimmen.

Kirchhoffsche Gesetze

Das erste KIRCHHOFFSCHE Gesetz (Knotensatz) besagt, dass die Summe der aus einem Punkt einer elektrischen Schaltung abfließenden Ladungen gleich der Summe der diesem Punkt zufließenden Ladungen ist. Anders gesagt: Die Summe aller Ströme ist in jedem Punkt einer elektrischen Schaltung null.

Das zweite KIRCHHOFFSCHE Gesetz (Maschensatz) sagt aus, dass sich die Teilspannungen einer Masche (eines Teilstromkreises) gegenseitig aufheben.

RC-Schaltungen

Eine RC-Schaltung ist eine Reihenschaltung aus einem OHMSchen Widerstand und einem Kondensator. Beim Anlegen einer Gleichspannung wird der Kondensator entsprechend seiner Kapazität aufgeladen und stellt nach vollständiger Aufladung einen unendlich großen Widerstand dar.

Beim Anlegen eines sinusförmigen Wechselstromes ist das Verhalten etwas komplexer. Hier wird der Kondensator mit steigender Spannung zunächst stärker aufgeladen. Nach Überschreiten der Spitzenspannung fängt der Kondensator dann bereits wieder an, sich zu entladen, sodass ein Strom fließt, der der momentanen Spannung entgegengerichtet ist. Kehren sich dann die Pole um, so wird der Kondensator wieder aufgeladen. In diesem Punkt fließt bei einem reinen kapazitiven Widerstand der maximale Strom, denn mit steigender Kondensatorladung reicht die (obwohl steigende) Spannung nicht mehr aus, um die große Ladung zu bewegen. Dies erklärt

die negative Phasenverschiebung des Stromes gegenüber der Spannung – in anderen Worten: der Strom eilt der Spannung voraus.

Impedanz bei RC-Schaltungen

Die Impedanz (auch der Scheinwiderstand oder Wechselstromwiderstand) einer RC-Schaltung ist das Verhältnis zwischen Effektivspannung und Effektivstrom in einem Wechselstromkreis an. In der komplexen Wechselstromrechnung wird sie definiert über

$$Z = R + j \cdot X$$

mit dem OHMSchen Widerstand R , dem Blindwiderstand X (Summe aus induktivem Widerstand $X_L = \omega \cdot L$ und kapazitiven Widerstand $X_C = \frac{-1}{\omega \cdot C}$) und der imaginären Einheit j . Demzufolge berechnet sich ihr Betrag nach

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Für eine RC-Schaltung ist dies

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

Phasenverschiebung bei RC-Schaltungen

Ein idealer OHMScher Widerstand hat keine Phasenverschiebung ($\varphi = 0$), ein idealer kapazitiver Widerstand eine von $\varphi = -90^\circ$ (Begründung oben).

Die Phasenverschiebung hängt vom Verhältnis zwischen dem kapazitiven Widerstand $\frac{1}{\omega \cdot C}$ und dem OHMSchem Widerstand R ab. Dabei ist der kapazitive Widerstand seinerseits von der Frequenz $f = \frac{\omega}{2\pi}$ der Wechselspannung abhängig. Deshalb gilt

$$\varphi = \arctan \frac{1}{-R \cdot \omega \cdot C}$$













Dies lässt sich anhand der komplexen Wechselstromrechnung leicht erkennen.

Messwerte

1.	$(a_x; a_y)$	$(U_x; U_y)$	$(b_x; b_y)$
	$(1 \frac{V}{cm}; 2 \frac{V}{cm})$	$(2,0 V; 2,0 V)$	$(2,0 cm; 1,0 cm)$
	$(2 \frac{V}{cm}; 0,5 \frac{V}{cm})$	$(1,0 V; 1,0 V)$	$(0,5 cm; 2,0 cm)$

2. Aufgenommen wurden die Werte der Box mit der Beschriftung „Neue Generatorbox 2“.

Form	T	U_{ss}	U_{eff}	Zeitbasis	$f_{Generator}$	$T_{Oszilloskop}$
Sinus	1,56 ms	6,6 V	2,31 V	0,1 ms	1000 Hz	1,00 ms
Rechteck	3,12 ms	10,0 V	5,54 V	0,2 ms	500 Hz	2,00 ms
Dreieck	6,2 ms	8,8 V	2,38 V	0,5 ms	500 Hz	2,00 ms
				1 ms	100 Hz	10,0 ms

LISSAJOUS-Figur	$f_{Generator}$	LISSAJOUS-Figur	$f_{Generator}$
	211 Hz		846 Hz
	238 Hz		952 Hz
	352 Hz		1269 Hz
	380 Hz		1692 Hz
	423 Hz		2220 Hz
	634 Hz		2538 Hz

4.	R	U_0	U_{max}	$T_{1/2}$
	1000 Ω	6,0 V	6,0 V	0,21 ms
	2000 Ω	6,0 V	6,0 V	0,43 ms
	4000 Ω	6,0 V	6,0 V	0,88 ms
	7000 Ω	6,0 V	4,8 V	1,53 ms
	10 000 Ω	6,0 V	3,9 V	2,2 ms

5.	R	f	U_{ss}	$U_{R,ss}$	Δt
	3000 Ω	100 Hz	12,0 V	6,2 V	-1,65 ms
	3000 Ω	300 Hz	12,0 V	10,4 V	-0,26 ms

Auswertung

1. Für die Ablenkempfindlichkeiten s gilt:

$$\begin{array}{l|l} (s_x; s_y) = \left(\frac{1}{a_x}; \frac{1}{a_y}\right) & s = \left(\frac{b_x}{U_x}; \frac{b_y}{U_y}\right) \\ \hline \left(1 \frac{\text{cm}}{\text{V}}; 0,5 \frac{\text{cm}}{\text{V}}\right) & \left(1 \frac{\text{cm}}{\text{V}}; 0,5 \frac{\text{cm}}{\text{V}}\right) \\ \left(0,5 \frac{\text{cm}}{\text{V}}; 2 \frac{\text{cm}}{\text{V}}\right) & \left(0,5 \frac{\text{cm}}{\text{V}}; 2 \frac{\text{cm}}{\text{V}}\right) \end{array}$$

2. Form	U_{eff} (Messwert)	U_{eff} (Rechenwert)	$\frac{\text{Messwert}}{\text{Rechenwert}} - 1$
Sinus	2,31 V	2,33 V	-1,0 %
Rechteck	5,54 V	5,00 V	+10,8 %
Dreieck	2,38 V	2,54 V	-6,3 %

Die Frequenz ist der Reziprok der Periodendauer:

Form	f
Sinus	641 Hz
Rechteck	321 Hz
Dreieck	161 Hz

Um zu überprüfen, ob die Zeitbasis des Oszilloskops gegebenenfalls korrigiert werden muss, wurden mehrere Werte für die Zeitbasis am Oszilloskop eingestellt, die auch bei den anderen Messungen verwendet worden waren, und am Frequenzgenerator eine möglichst große Frequenz eingestellt, sodass noch mindestens eine Periode auf dem Oszilloskop dargestellt werden konnte. Die auf dem Oszilloskop dargestellte Periodendauer wurde mit der Generatorfrequenz verglichen. Das Produkt beider Größen ergab immer genau 1. Es konnte also keine Abweichung festgestellt werden, sodass die Zeitbasis nicht korrigiert wurde.

3. Aus der LISSAJOUS-Figur lässt sich das Verhältnis zwischen Generatorfrequenz und Black-Box-Frequenz bestimmen. Multipliziert man die bekannte Generatorfrequenz mit dem Frequenzverhältnis, so erhält man folgende Werte für die Black-Box-Frequenz:

$f_{Generator}$	$\frac{f_{BlackBox}}{f_{Generator}}$	$f_{BlackBox}$	$f_{Generator}$	$\frac{f_{BlackBox}}{f_{Generator}}$	$f_{BlackBox}$
211 Hz	3/1	633,0 Hz	846 Hz	3/4	634,50 Hz
238 Hz	8/3	634,7 Hz	952 Hz	2/3	634,67 Hz
351 Hz	9/5	632,7 Hz	1269 Hz	1/2	634,50 Hz
380 Hz	5/3	633,3 Hz	1692 Hz	3/8	634,50 Hz
423 Hz	3/2	634,5 Hz	2220 Hz	2/7	634,29 Hz
634 Hz	1/1	634,0 Hz	2538 Hz	1/4	634,50 Hz

Da die Streuung bei kleinen Generatorfrequenzen größer ist, ist eine Berechnung aus den größeren Generatorfrequenzen (rechte Tabelle) sinnvoller. Auf diese Weise ergibt sich ein Mittelwert von $\bar{f}_{BlackBox} = 634,49 \text{ Hz}$.

4. R	$T_{1/2}$	$\tau_{exp} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$	$\tau_{th} = R \cdot C$	$\frac{\tau_{exp}}{\tau_{th}} - 1$
1000 Ω	0,21 ms	0,30 ms	0,315 ms	-3,8 %
2000 Ω	0,43 ms	0,62 ms	0,630 ms	-1,5 %
4000 Ω	0,88 ms	1,27 ms	1,26 ms	+0,8 %
7000 Ω	1,53 ms	2,20 ms	2,20 ms	+0,1 %
10000 Ω	2,2 ms	3,17 ms	3,15 ms	+0,8 %

5. Für die Impedanz gilt

$$Z_{exp} = \frac{U_{ss}}{I_{ss}}$$

Da der Strom in jedem Punkt der Reihenschaltung der gleiche ist, kann er aus dem Spannungsüberfall über dem OHMSchen Widerstand berechnet werden. Für den OHMSchen Widerstand gilt

$$R = \frac{U_{R,ss}}{I_{ss}}$$

$$I_{ss} = \frac{U_{R,ss}}{R}$$

Es folgt

$$Z_{exp} = R \cdot \frac{U_{ss}}{U_{R,ss}}$$

Die Berechnung des theoretischen Wertes für die Impedanz wurde bereits unter den Grundlagen betrachtet und beträgt

$$Z_{th} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

Unter der Annahme, dass induktive Anteile vernachlässigbar sind, lässt sich die Impedanz auch aus der Phasenverschiebung bestimmen. Die Phasenverschiebung ist einerseits nach

$$\varphi = \arctan \frac{1}{-R \cdot \omega \cdot C}$$

vom OHMSchen und kapazitiven Widerstand abhängig und kann andererseits aus der Zeitverschiebung Δt berechnet werden:

$$\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\Delta t}{T}$$

$$\varphi = \omega \cdot \Delta t$$

Dies ergibt

$$\omega \cdot C = \frac{1}{-R \cdot \tan(\omega \cdot \Delta t)}$$

$$Z_{\varphi} = R \cdot \sqrt{1 + \tan^2(\omega \cdot \Delta t)}$$

f	Z_{exp}	Z_{φ}	Z_{th}	$\frac{Z_{exp}}{Z_{th}} - 1$	$\frac{Z_{\varphi}}{Z_{th}} - 1$
100 Hz	5,81 k Ω	5,89 k Ω	5,88 k Ω	-1,2 %	+0,3 %
300 Hz	3,46 k Ω	3,40 k Ω	3,44 k Ω	+0,6 %	-1,2 %

Messunsicherheit

- Bei der Messung der angelegten Gleichspannung $U_x = U_y$ war der einzige quantifizierbare Fehler die Genauigkeit des Messgerätes, das die Spannung in Schritten von 0,1V digital ausgab. Andere eventuelle systematische und zufällige Fehler (Netzfluktuationen, starke elektromagnetische Felder in der Umgebung) waren so klein, dass sie nicht aufgefallen sind.

Die Messung der Ablenkungen ($b_x; b_y$) auf dem Oszilloskop hat einen Fehler in vergleichbarer Dimension. Die Skalierung und Fokussierung auf dem Oszilloskop ermöglichte unter den für diesen Versuchsteil gegebenen Bedingungen eine Ablesegenauigkeit von $\pm 0,02$ cm. Unter den in anderen Versuchsteilen vorherrschenden Bedingungen fiel diese jedoch teilweise auf bis zu $\pm 0,1$ cm ab.

Die Messunsicherheit für s (berechnet nach $s = \frac{b}{U}$) ergibt sich nach

$$u(s) = \left| \frac{\partial s}{\partial b} \right| \cdot u(b) + \left| \frac{\partial s}{\partial U} \right| \cdot u(U)$$

$$u(s) = \frac{1}{U} \cdot u(b) + \frac{b}{U^2} \cdot u(U)$$

Es ergeben sich

$(U_x; U_y)$	$(b_x; b_y)$	$u(s)$
(2,0 V; 2,0 V)	(2,0 cm; 1,0 cm)	$(\pm 0,060 \frac{\text{cm}}{\text{V}}; \pm 0,035 \frac{\text{cm}}{\text{V}})$
(1,0 V; 1,0 V)	(0,5 cm; 2,0 cm)	$(\pm 0,070 \frac{\text{cm}}{\text{V}}; \pm 0,22 \frac{\text{cm}}{\text{V}})$

Form	Zeitbasis	Messung von	$u(T)$
Sinus	$0,2 \frac{\text{ms}}{\text{cm}}$	T	$\pm 0,01 \text{ ms}$
Rechteck	$0,2 \frac{\text{ms}}{\text{cm}}$	$T/2$	$\pm 0,02 \text{ ms}$
Dreieck	$0,5 \frac{\text{ms}}{\text{cm}}$	$T/2$	$\pm 0,05 \text{ ms}$

Die Unsicherheit für die Frequenz ergibt sich aus

$$u(f) = \left| \frac{\partial f}{\partial T} \right| \cdot u(T)$$

$$= \frac{1}{T^2} \cdot u(T)$$

Dies bedeutet folgende Unsicherheiten:

Form	$u(f)$
Sinus	$\pm 4,1 \text{ Hz}$
Rechteck	$\pm 2,1 \text{ Hz}$
Dreieck	$\pm 1,3 \text{ Hz}$

Die Spannung wurde in allen Fällen im Spannungsbereich $2 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ gemessen. Dies ermöglichte eine Ablesegenauigkeit von $\pm 0,05 \text{ V}$.

3. Bei der Frequenzbestimmung mittels LISSAJOUS-Figuren kann das Frequenzverhältnis sehr genau eingestellt werden. In der Praxis gelang dies so gut, dass pro Phasendurchgang mindestens 30 s vergingen. Der Fehler, der auf diese Weise entsteht, ist mit der gegebenen Messgenauigkeit nicht mehr erfassbar. Die Messungenauigkeit des Frequenzgenerators ist nicht bekannt. Es wird deshalb von der Genauigkeit der Angabe ($\pm 0,5 \text{ Hz}$) ausgegangen. Dadurch wird der relative Fehler umso kleiner, je größer die Generatorfrequenz ist. Der Fehler von $\pm 0,5 \text{ Hz}$ wird durch das Aufnehmen mehrerer Werte noch weiter gesenkt. Die Standardabweichung beträgt

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^6 (f_i - \bar{f})^2} = 0,12 \text{ Hz}$$

Daraus berechnet sich die Unsicherheit der Frequenz einem Konfidenzintervall von 90 % von

$$u(f) = t \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$= 2,015 \cdot \frac{0,12 \text{ Hz}}{\sqrt{6}}$$

$$= 0,10 \text{ Hz}$$

4. Bei dieser Messung ist zweifelsohne die Ablesegenauigkeit bei der Bestimmung der Halbwertszeit der begrenzende Faktor. Alle anderen Fehler sind von der Auswirkung her so klein, dass sie vernachlässigt werden können.

$T_{1/2}$	$u(T_{1/2})$	$u(\tau_{exp})$
0,21 ms	$\pm 0,01 \text{ ms}$	$\pm 0,014 \text{ ms}$
0,43 ms	$\pm 0,01 \text{ ms}$	$\pm 0,014 \text{ ms}$
0,88 ms	$\pm 0,01 \text{ ms}$	$\pm 0,014 \text{ ms}$
1,53 ms	$\pm 0,02 \text{ ms}$	$\pm 0,029 \text{ ms}$
2,2 ms	$\pm 0,05 \text{ ms}$	$\pm 0,072 \text{ ms}$

5. Die Unsicherheit für die Spannung über dem OHMSchen Widerstand war hier in beiden Fällen $\pm 0,1\text{V}$. Unter der Annahme, dass der Drehwiderstand eine vernachlässigbare Ungenauigkeit hat, ergibt sich für die Impedanz eine Unsicherheit von

$$\begin{aligned}
 u(Z) &= \left| \frac{\partial Z}{\partial U_{ss}} \right| \cdot U_{ss} + \left| \frac{\partial Z}{\partial U_{R,ss}} \right| \cdot U_{R,ss} \\
 &= \frac{R}{U_{R,ss}} \cdot u(U_{ss}) + \frac{R \cdot U_{ss}}{U_{R,ss}^2} \cdot u(U_{R,ss}) \\
 &= R \cdot \left(\frac{u(U_{ss})}{U_{R,ss}} + \frac{U_{ss} \cdot u(U_{R,ss})}{U_{R,ss}^2} \right)
 \end{aligned}$$

Dies liefert folgende Unsicherheiten:

f	$u(Z)$
100 Hz	$\pm 0,14 \text{ k}\Omega$
300 Hz	$\pm 0,06 \text{ k}\Omega$

Zusammenfassung

1.	$(a_x; a_y)$	$s_{x, \text{exp}}$	$s_{y, \text{exp}}$
	$(1 \frac{\text{V}}{\text{cm}}; 2 \frac{\text{V}}{\text{cm}})$	$(1,000 \pm 0,060) \frac{\text{cm}}{\text{V}}$	$(0,500 \pm 0,035) \frac{\text{cm}}{\text{V}}$
	$(2 \frac{\text{V}}{\text{cm}}; 0,5 \frac{\text{V}}{\text{cm}})$	$(0,500 \pm 0,070) \frac{\text{cm}}{\text{V}}$	$(2,00 \pm 0,22) \frac{\text{cm}}{\text{V}}$

Die aus den Ablenkkoeffizienten a des Oszilloskops berechneten Ablenkempfindlichkeiten s stimmen mit dem Verhältnis von gemessener Ablenkung und angelegter Spannung überein.

2. Charakterisierung „Neue Generatorbox 2“:

Ausgang	Form	f	U_{ss}
A	Sinus	$(641,0 \pm 4,1) \text{ Hz}$	$(6,60 \pm 0,05) \text{ V}$
B	Rechteck	$(320,5 \pm 2,1) \text{ Hz}$	$(10,00 \pm 0,05) \text{ V}$
C	Dreieck	$(161,3 \pm 1,3) \text{ Hz}$	$(8,80 \pm 0,05) \text{ V}$

Interessant war hier die Feststellung, dass die Frequenzen aufgrund des umgekehrt proportionalen Zusammenhanges zwischen Frequenz und Periodendauer trotz abnehmender Genauigkeit bei der Messung der Periodendauer immer genauer angegeben werden können.

Form	$U_{\text{eff,exp}}$	$U_{\text{eff,th}}$
Sinus	2,31 V	$(2,333 \pm 0,018) \text{ V}$
Rechteck	5,54 V	$(5,000 \pm 0,025) \text{ V}$
Dreieck	2,38 V	$(2,540 \pm 0,014) \text{ V}$

Im Fall der sinusförmigen Wechselspannung stimmt der mit dem Multimeter gemessene Effektivwert mit dem berechneten überein. Die Annahme, dass der mit dem Multimeter gemessene Wert richtig ist, ist mit dem Ablesefehler des U_{ss} -Wertes am Oszilloskop vereinbar.

In den beiden anderen Fällen ist die Abweichung nicht mit dem Ablesefehler zu erklären. Hier liegt die Abweichung höchstwahrscheinlich daran, dass das Digitalmultimeter nicht den Effektivwert, sondern den Mittelwert (Gleichrichtwert) gemessen hat und dann intern mit dem Korrekturfaktor von $\frac{\pi}{\sqrt{8}}$ für Sinuskurven multipliziert hat. Berücksichtigt man dies, so würde man für die Rechteckspannung einen Messwert von $(5,554 \pm 0,028) \text{ V}$ und für die Dreieckspannung einen Messwert von $(2,444 \pm 0,056) \text{ V}$ erwarten, was mit den Messwerten in Einklang steht.

3. Die Frequenz der sinusförmigen Wechselspannung (Spannung A der neuen Generatorbox 2) beträgt $(644,49 \pm 0,10) \text{ Hz}$ in einem Vertrauensintervall von 90 %

Dies deckt sich mit der Angabe $(641,0 \pm 4,1) \text{ Hz}$ aus der Messung der Periodendauer in Aufgabenteil 2, die hierdurch erheblich präzisiert wird.

4.	R	τ_{exp}	τ_{th}
	1000 Ω	$(0,303 \pm 0,014) \text{ ms}$	0,315 ms
	2000 Ω	$(0,620 \pm 0,014) \text{ ms}$	0,630 ms
	4000 Ω	$(1,270 \pm 0,014) \text{ ms}$	1,26 ms
	7000 Ω	$(2,207 \pm 0,029) \text{ ms}$	2,20 ms
	10 000 Ω	$(3,173 \pm 0,072) \text{ ms}$	3,15 ms

Innerhalb der experimentellen Genauigkeit decken sich die gemessenen Werte mit den theoretischen.

5.	f	Z_{exp}	Z_{th}
	100 Hz	$(5,81 \pm 0,14) \text{ k}\Omega$	5,88 k Ω
	300 Hz	$(3,46 \pm 0,06) \text{ k}\Omega$	3,44 k Ω

Auch hier decken sich die experimentellen Werte mit den theoretisch berechneten.