

**Versuchsprotokoll zum Versuch Nr. 353**

**Das Relaxationsverhalten eines RC-Kreises**

Johannes Kollek                            Jean-Marco Alameddine  
johannes.kollek@udo.edu    jean-marco.alameddine@udo.edu

Durchführung: 08.12.2015

TU Dortmund – Fakultät Physik

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Theorie</b>	<b>3</b>
1.1 Herleitung der Relaxationsgleichung . . . . .	3
1.2 Phänomen der Relaxation am Beispiel eines RC-Kreises . . . . .	3
1.2.1 Aufladevorgang des RC-Kreises . . . . .	4
1.2.2 Periodische Anregung des RC-Kreises . . . . .	5
1.2.3 Integriereigenschaft des RC-Kreises . . . . .	6
<b>2 Durchführung</b>	<b>7</b>
2.1 Bestimmung der Zeitkonstante anhand der Aufladekurve . . . . .	7
2.2 Messung der Spannungsamplitude und Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Frequenz . . . . .	7
2.3 Nutzung des RC-Gliedes zur Integration . . . . .	8
<b>3 Auswertung</b>	<b>9</b>
3.1 Bestimmung der Zeitkonstante anhand der Aufladekurve . . . . .	9
3.2 Methode der Kondensatoramplitude und Phasenverschiebung . . . . .	11
3.3 Nutzung des RC-Gliedes zur Integration . . . . .	15
<b>4 Diskussion</b>	<b>16</b>
<b>5 Anhang</b>	<b>18</b>
<b>Literatur</b>	<b>20</b>

# 1 Theorie

## 1.1 Herleitung der Relaxationsgleichung

Relaxation ist ein Phänomen, welches auftritt, wenn ein System aus einem Ausgangszustand entfernt wird und nicht-oszillatorisch wieder in denselben zurückkehrt. Mit anderen Worten bezeichnet es einen nicht schwingenden Übergang in einen neuen Gleichgewichtszustand. Auf eine physikalische Größe bezogen bedeutet dies, dass deren Änderung zu einem bestimmten Zeitpunkt proportional zur Differenz der Größe zum jetzigen Zeitpunkt und eben dieser im Endzustand ist. Daraus ergibt sich der Ansatz der Relaxationsgleichung in Bezug auf die physikalische Größe  $A$  zu

$$\frac{dA}{dt} = c[A(t) - A(\infty)]. \quad (1)$$

Nach Separation und Integration von 0 bis  $t$  resultiert

$$\ln \frac{A(t) - A(\infty)}{A(0) - A(\infty)} = ct. \quad (2)$$

Daraus tropft die endgültige Relaxationsgleichung,

$$A(t) = A(\infty) + [A(0) - A(\infty)]e^{ct}, \quad (3)$$

mit der Bedingung, dass  $c < 0$  ist, damit  $A$  beschränkt ist, heraus.

## 1.2 Phänomen der Relaxation am Beispiel eines RC-Kreises

Der Relaxationsvorgang kann beispielsweise an einem RC-Kreis, wie in Abbildung 1, untersucht werden.

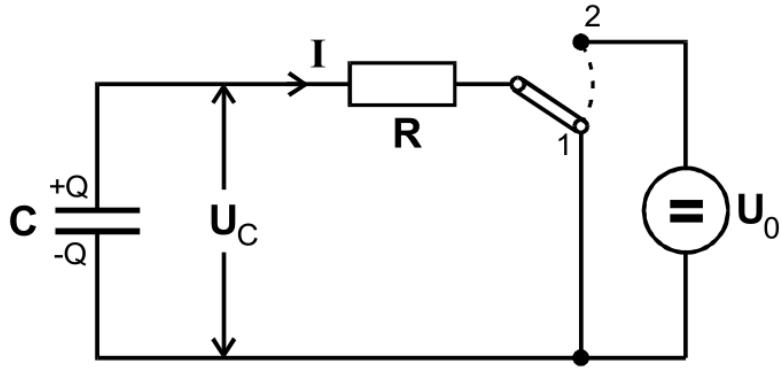


Abbildung 1: Systematischer Aufbau eines RC-Kreises. [1]

Er besteht aus einem RC-Glied und einer dazu in Reihe geschalteter Spannungsquelle, die mittels Schalter überbrückt werden kann. Nun ist es möglich, das Relaxationsverhalten am Entlade- oder Aufladevorgang zu repräsentieren.

### 1.2.1 Aufladevorgang des RC-Kreises

Beim Aufladevorgang befindet sich der Schalter in Abbildung 1 in Stellung 2. Aus der Maschenregel geht der Zusammenhang

$$U_0 = U_C + U_R \quad (4)$$

hervor, wobei für die Spannung  $U_C$  am Kondensator und  $U_R$  am Widerstand die Beziehungen

$$\begin{aligned} U_C &= \frac{Q}{C} \\ U_R &= RI \end{aligned}$$

gelten. Da zusätzlich für den Strom  $I$

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU_C}{dt} \quad (5)$$

gilt, ergibt sich die daraus resultierende Differentialgleichung

$$U_0 = R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C}. \quad (6)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung lautet

$$Q(t) = U_0 C (1 - e^{-\frac{1}{RC}t}), \quad (7)$$

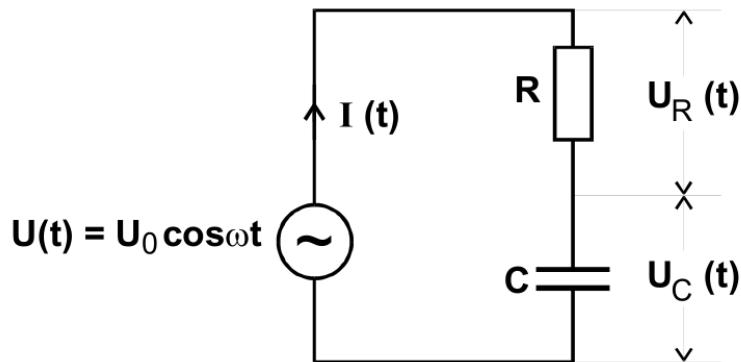
bzw.

$$U_C(t) = U_0(1 - e^{\frac{1}{RC}t}). \quad (8)$$

Daraus folgt, dass  $U_C(\infty) = U_0$  und  $U_C(0) = 0$ , im Vergleich zu der Relaxationsgleichung (3). Die Konstante  $RC$  wird Zeitkonstante des Relaxationsverhalten genannt, da sie die Geschwindigkeit beschreibt, mit der das System seinem Endzustand bzw. Gleichgewichtszustand, wie oben genannt, entgegenstrebt.

### 1.2.2 Periodische Anregung des RC-Kreises

Von Interesse ist auch, wie sich das Relaxationsphänomen bei einer erzwungenen Schwingung verhält. Es wird die Schaltung aus Abbildung 2 betrachtet.



**Abbildung 2:** Systematischer Aufbau eines RC-Kreises mit Wechselspannung. [1]

Hier steht vor allem die Anregungsfrequenz  $\omega$  im Fokus. Bei hinreichend niedrigen Frequenzen im Vergleich zur Eigenfrequenz liegt am Kondensator praktisch immer dieselbe Spannung an, die der Generator vorgibt. Bei steigender Erregerfrequenz fällt zunehmend mehr Spannung am Widerstand ab. Dies wird dadurch begründet, dass die Ladung eine gewisse Zeit braucht, um auf den Kondensator zu fließen. Wenn nun aber die Orientierung zunehmend schneller geändert wird, kommt weniger Ladung auf den Kondensator. Sein Widerstand strebt gegen Unendlich. Das Bauelement verhält sich somit wie ein Tiefpass. Aus diesen Gründen folgt, dass die Amplitude  $A(\omega)$  der Kondensatorspannung  $U_C$  mit zunehmender Erregerfrequenz  $\omega$  erstens sinkt und sich zweitens zeitlich immer weiter asymptotisch von der Erregeramplitude  $U_0$  entfernt.

Nach dem Ansatz

$$U_C(t) = A(\omega) \cos(\omega t + \phi\omega), \quad (9)$$

resultiert eingesetzt in Gleichung (4) modifiziert mit (5)

$$U_0 \cos(\omega t) = -A(\omega)\omega RC \sin(\omega t + \phi) + A(\omega) \cos(\omega t + \phi). \quad (10)$$

Da diese Gleichung zu jedem Zeitpunkt gelten muss, ergibt sich, nach dem Einsetzen einer Beispielzeit, der Zusammenhang

$$\phi(\omega) = \arctan(-\omega RC). \quad (11)$$

Es ist zu sehen, dass für  $\omega$  gegen 0 die Phasenverschiebung  $\phi$  wie erwartet gegen 0 geht. Im Fall  $\omega$  gegen  $\infty$  geht  $\phi$  gegen  $\frac{\pi}{2}$ . Wenn nun

$$\omega t + \phi = \frac{\pi}{2} \quad (12)$$

gewählt wird, entsteht aus (10)

$$U_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = -A(\omega)\omega RC, \quad (13)$$

bzw.

$$A(\omega) = -\frac{\sin(\phi)}{\omega RC} U_0. \quad (14)$$

Nach Einsetzen der Bedingung für die Phasenverschiebung (11) und Umformen ergibt sich der Ausdruck

$$A(\omega) = -\frac{U_0}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \quad (15)$$

für die Amplitude  $A(\omega)$  der Kondensatorspannung  $U_C$ , da für den Sinus die Phasenverschiebung

$$\sin(\phi) = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \quad (16)$$

gilt.

### 1.2.3 Integriereigenschaft des RC-Kreises

Die Formel (8) im Bezug auf die Relaxationsgleichung, lässt die Vermutung aufkommen, dass es sogar möglich ist, mit einem RC-Kreis zu integrieren. Die bereits erwähnte Gleichung,

$$U(t) = RC \frac{dU_C}{dt} + U_C \quad (17)$$

legt nahe, dass, wenn  $\omega \gg \frac{1}{RC}$  ist und dadurch  $|U_C| \ll |U_R|$ , sowie  $|U_C| \ll |U|$  sind,

$$U(t) = RC \frac{dU_C}{dt} \quad (18)$$

ist, bzw. es zeigt sich die Integriereigenschaft

$$U_C = \frac{1}{RC} \int_0^t U(t') dt' \quad (19)$$

des RC-Kreises.

## 2 Durchführung

### 2.1 Bestimmung der Zeitkonstante anhand der Aufladekurve

Zunächst wird die Zeitkonstante eines RC-Gliedes mithilfe des in Abbildung 3 beschriebenen Aufbaus ermittelt.

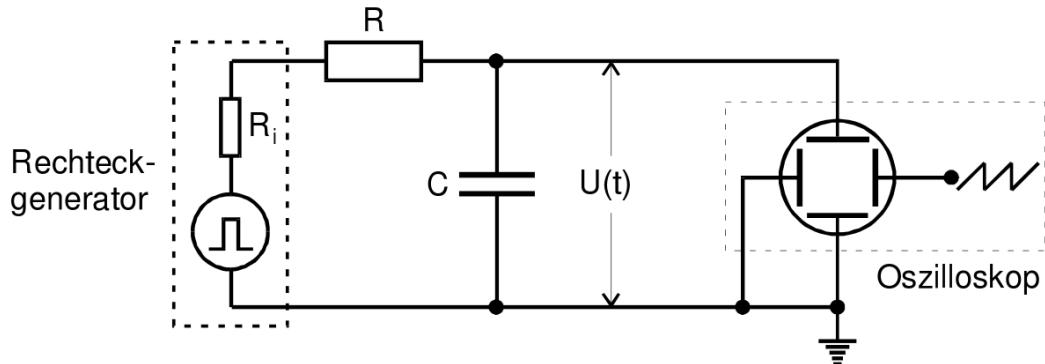


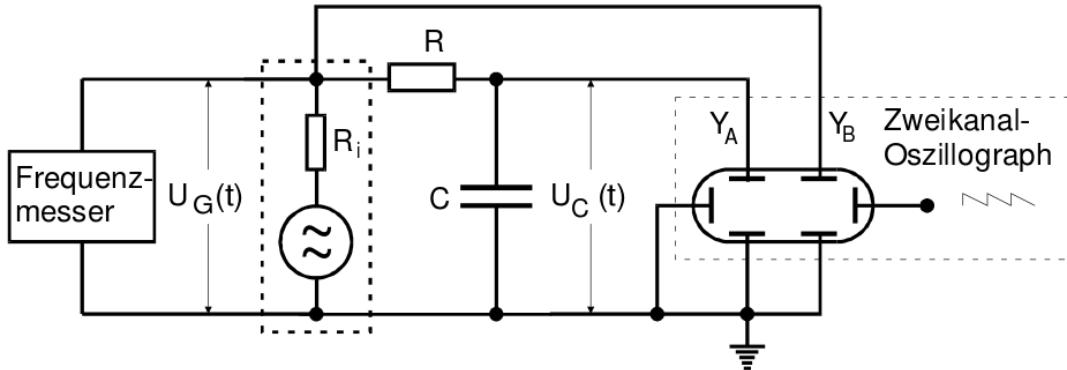
Abbildung 3: Schaltung zur Bestimmung der Zeitkonstante eines RC-Gliedes. [1]

Hierbei wird an einem in Reihe geschalteten Widerstand mit Kondensator eine Rechteckspannung der Frequenz  $\omega$  angelegt. Die am Kondensator entstehende Spannung  $U_c$  wird mit einem digitalen Oszilloskop gemessen. Um das Oszilloskop auf die Nullspannung des Kondensators ausrichten, wird die Rechteckspannung zunächst auf eine zu  $\frac{1}{RC}$  kleine Frequenz eingestellt, so dass sich der Kondensator nahezu vollständig entladen kann. Der Y-Achsenabschnitt wird dementsprechend auf die Nullspannung eingestellt.

Im Folgenden wird die Frequenz der Rechteckspannung so eingestellt, so dass eine aussagekräftige Aufladekurve des Kondensators abgelesen werden kann. Hierbei soll einerseits eine Änderung der Spannung von einem Faktor von mindestens 5 erkennen zu sein, andererseits wird darauf geachtet, dass die Spannung nicht zu lange im niedrigen Bereich ist, da dieser Bereich vom Oszilloskop nicht genau genug angezeigt werden kann. Die Entladekurve wird schlussendlich digital abgespeichert, so dass  $(t, U(t))$  Wertepaare abgelesen werden können.

### 2.2 Messung der Spannungsamplitude und Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Frequenz

Im zweiten Abschnitt des Versuchs wird die Spannungsamplitude der Kondensatorspannung sowie dessen Phasenverschiebung zur angelegten Sinusspannung untersucht. Beide sind, wie in der Theorie geschrieben, von der angelegten Frequenz  $\omega$  abhängig. Hierzu wird eine Schaltung wie in Abbildung 4 aufgebaut.



**Abbildung 4:** Schaltung zur Messung der Spannungsamplitude und Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Frequenz. [1]

Der Widerstand und der Kondensator werden erneut parallel geschaltet, die angelegte Spannung ist dieses mal eine Sinusspannung. Mithilfe eines Zweikanal-Oszilloscopes werden sowohl die am Kondensator anliegende Spannung  $U_c$  sowie die angelegte Sinusspannung  $U_G$  gemessen und angezeigt. Beide Kurven werden wiederum so kalibriert, dass der Y-Achsenabschnitt bei 0 der Nullspannung entspricht. Unter Zuhilfenahme der Cursor-Funktion werden für verschiedene am Frequenzgenerator eingestellte Frequenzen die Phasendifferenzen zwischen  $U_c$  und  $U_G$  bestimmt, indem der Abstand zwischen zwei Nulldurchläufen gleicher Phase abgelesen wird. Gleichzeitig wird mit der Cursor-Funktion der Spannungsabstand der Kondensatorspannung von Peak zu Peak abgelesen und notiert. Die betrachteten Frequenzen werden so gewählt, so dass diese in einem Bereich von vier Zehnerpotenzen liegen. Bei auffälligen Werteänderungen werden genauere Messungen für kleinere Frequenzabstände durchgeführt.

### 2.3 Nutzung des RC-Gliedes zur Integration

Zum Schluss des Versuchs wird die in der Theorie beschriebene Fähigkeit des RC-Gliedes zur Integration untersucht. Dazu wird die in Abbildung 4 beschriebene Schaltung genutzt. Die Frequenz  $\omega$  wird hinreichend groß gewählt, so dass sowohl die Bedingung  $\omega \gg \frac{1}{RC}$  erfüllt, aber auch die Stromamplitude  $U_c$  weiterhin gut messbar ist. Die Integrations-eigenschaft wird nun anhand einer angelegten Rechteckspannung, einer Sinusspannung sowie einer Dreieckspannung überprüft.

### 3 Auswertung

#### 3.1 Bestimmung der Zeitkonstante anhand der Aufladekurve

Um die Aufladekurve des RC-Gliedes zu erhalten, wird der in der Durchführung beschriebene Aufbau betrachtet. Es ergibt sich das in Abbildung 5 dargestellte Bild am Oszilloskop, welches die Aufladekurve des betrachteten RC-Gliedes darstellt.

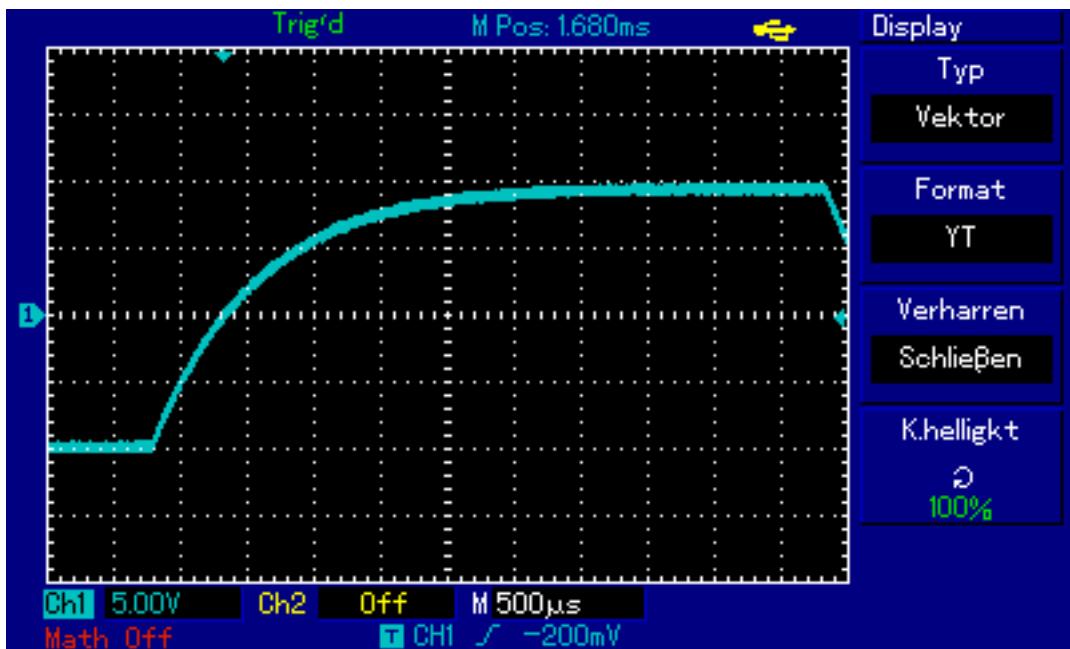


Abbildung 5: Aufladekurve des RC-Gliedes.

Hierbei ist auf der x-Achse die Zeit  $t$  in  $500\text{ }\mu\text{s}$  pro Kästchen, auf der y-Achse die Kondensatorspannung  $U_c$  in  $5\text{ V}$  pro Kästchen aufgetragen. Um nun eine lineare Ausgleichsrechnung zur Bestimmung der Zeitkonstante  $\tau$  durchführen zu können, werden dem Graphen die in Tabelle 1 angegebenen Werte entnommen.

**Tabelle 1:** Messwerte der Aufladekurve des Kondensators.

$U_c$ [ms]	$t$ [V]
0.2	5.0
0.3	6.5
0.5	9.5
1.0	14.0
1.5	17.0
2.0	18.5
2.5	19.0
3.0	19.3
4.0	19.4

Da sich die Werte wie in (8) angegeben verhalten, kann nicht direkt eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt werden. Zuerst müssen die Werte in die Form

$$U'_c = U_0 e^{\frac{-t}{RC}} \quad (20)$$

gebracht werden. Dazu wird von den  $U_c$  Werten der Wert  $U_{\text{end}} = 19.5$  V abgezogen sowie das Vorzeichen umgekehrt. Es ergeben sich hieraus die in Tabelle 2 angegebenen Werte, so dass die Werte  $t$  und  $\log(U'_c)$  an die Funktion

$$y = mx + b \quad (21)$$

gefittet werden können.

**Tabelle 2:** Veränderte Messwerte der Aufladekurve.

$U_c$ [ms]	$t$ [V]
0.2	14.5
0.3	13.0
0.5	10.0
1.0	5.5
1.5	2.5
2.0	1.0
2.5	0.5
3.0	0.2
4.0	0.1

Der Fehler von  $t$  wird zu 0.1 ms angenommen, der Fehler von  $U$  zu 0.1 V. Für die Fehlerrechnung wird bei der vorliegenden Rechnung und bei allen folgenden Rechnungen das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2} \quad (22)$$

für eine Funktion  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , bei der die Größen  $x_1, x_2, \dots, x_n$  voneinander unabhängig sind, verwendet. Hierfür wird uncertainties in Python genutzt.

Die Ausgleichsrechnung wird durch die Methode der kleinsten Quadrate mit numpy in Python durchgeführt. Das Ergebnis ist die in Abbildung 6 halblogarithmisch dargestellte Ausgleichsgerade. Die sich ergebenen Parameter des Fits sind

$$m = -1521 \pm 26,$$

$$b = 3.08 \pm 0.05.$$

Mit

$$RC = \frac{-1}{m} \quad (23)$$

ergibt sich der zu bestimmende RC-Wert zu

$$RC = (0.657 \pm 0.011) \text{ ms.} \quad (24)$$

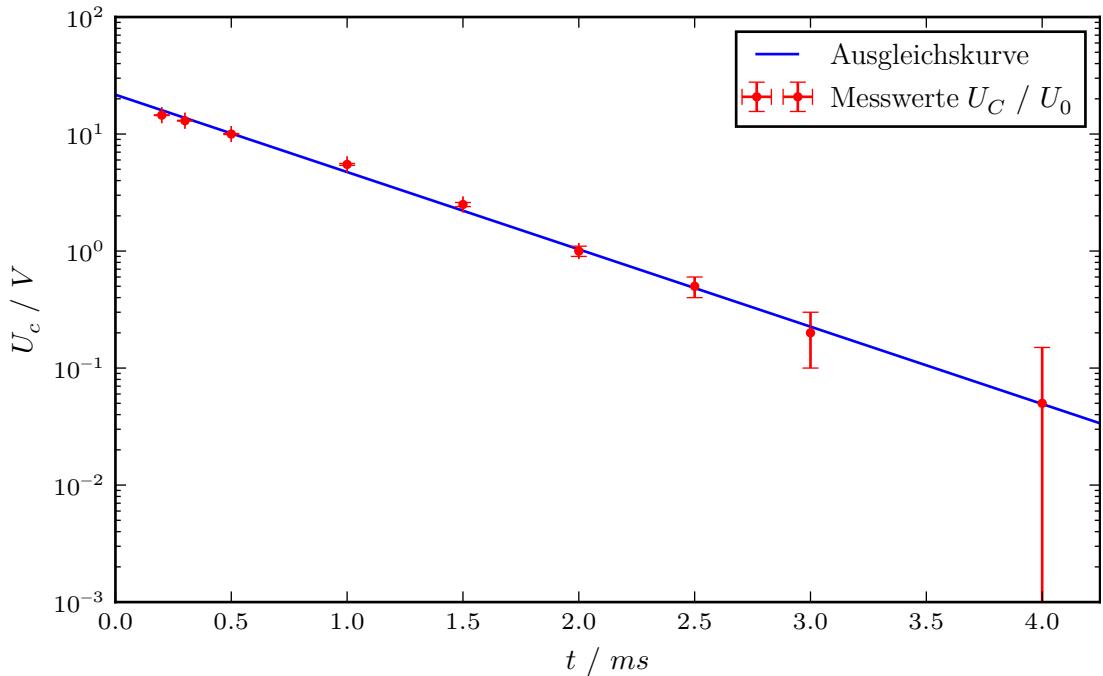


Abbildung 6: Ausgleichsgerade zur Bestimmung von RC.

### 3.2 Methode der Kondensatoramplitude und Phasenverschiebung

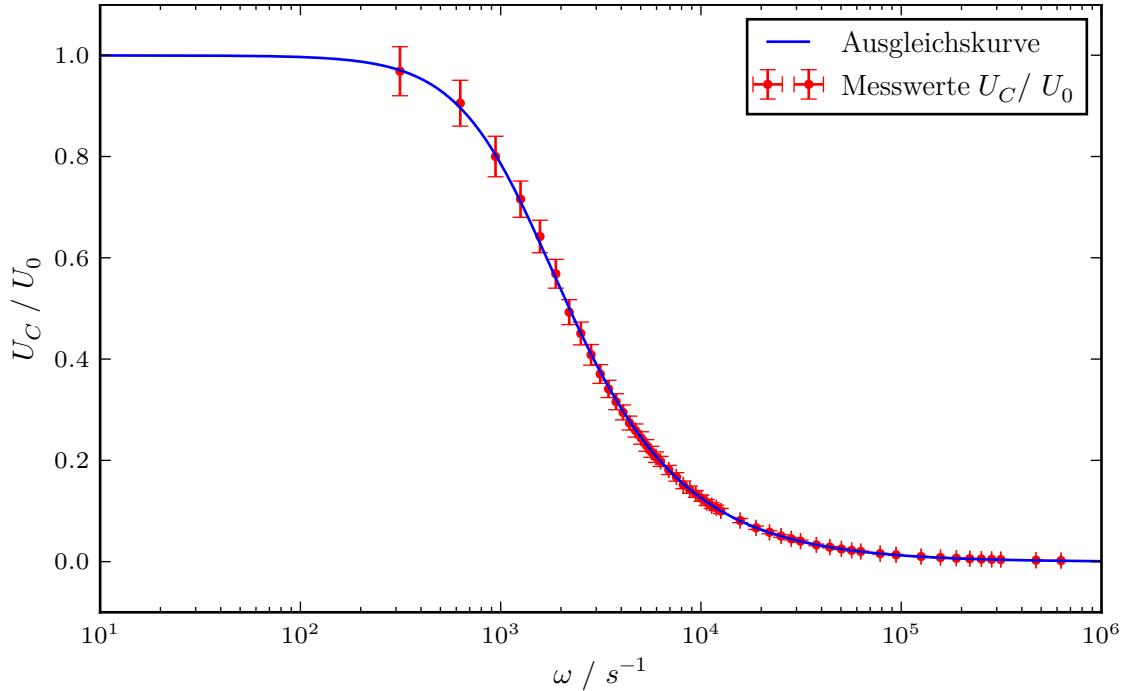
Abgesehen vom Betrachten der Aufladekurve, kann die Zeitkonstante  $RC$  auch durch die Amplitude der Kondensatorspannung  $U_C$  und die Phasenverschiebung  $\phi$  der beiden Spannungen berechnet werden. In Tabelle 3 sind die nötigen Messdaten aufgelistet.

Der Fehler von  $U$  wird zu 5 % des gemessenen Werts angenommen. Der Fehler von  $\omega$  ist zu gering, um ihn als Fehlerbalken darzustellen. Die Genauigkeit des Frequenzgenerators ist hinreichend angemessen.

$f$ [Hz]	$U_C$ [mV]	$a$ [\mu s]	$b$ [\mu s]	$f$ [Hz]	$U_C$ [mV]	$a$ [\mu s]	$b$ [\mu s]
50	900	20000	9200	1700	138	588	1110
100	800	10000	8600	1800	130	556	1050
150	720	6667	7600	1900	124	526	1010
200	660	5000	6800	2000	118	500	950
250	600	4000	6100	2500	97	400	770
300	560	3333	5400	3000	80	333	635
350	504	2857	4680	3500	70	286	550
400	448	2500	4280	4000	62	250	480
450	416	2222	3880	4500	54	222	428
500	380	2000	3520	5000	49	200	384
550	352	1818	3240	6000	41	167	314
600	332	1667	3000	7000	35	143	272
650	312	1538	2800	8000	31	125	238
700	296	1429	2600	9000	27	111	212
750	284	1333	2460	10000	24	100	190
800	268	1250	2320	12500	20	80	150
850	256	1176	2180	15000	16	67	128
900	244	1111	2060	20000	12	50	96
950	234	1053	1960	25000	10	40	77
1000	224	1000	1880	30000	8	33	64
1100	204	909	1720	35000	7	29	55
1200	192	833	1590	40000	6	25	49
1300	178	769	1440	45000	5	22	43
1400	164	714	1350	50000	5	20	39
1500	154	667	1270	75000	3	13	26
1600	144	625	1190	100000	2	10	20

**Tabelle 3:** Messdaten zur Frequenzabhängigen Amplituden und Phasenverschiebungsbestimmung.

Dabei bezeichnet  $f$  die Erregerfrequenz,  $a$  den Abstand zweier Nulldurchläufe und  $b$  die Periodendauer der Erregerfrequenz. In Abbildung 7 werden die gemessenen mit der Erregerspannung normierten Amplituden gegen die Kreisfrequenz der Erregerspannung halblogarithmisch eingetragen.



**Abbildung 7:** Normierte Kondensatoramplituden.

Mittels eines Fits der Form

$$f = \frac{1}{\sqrt{1 + x^2 m^2}} + b, \quad (25)$$

werden die Messwerte gefittet. Die Parameter werden dabei zu

$$\begin{aligned} m &= (-0.786 \pm 0.003) 10^{-3}, \\ b &= (-0.4 \pm 0.7) 10^{-3}, \end{aligned}$$

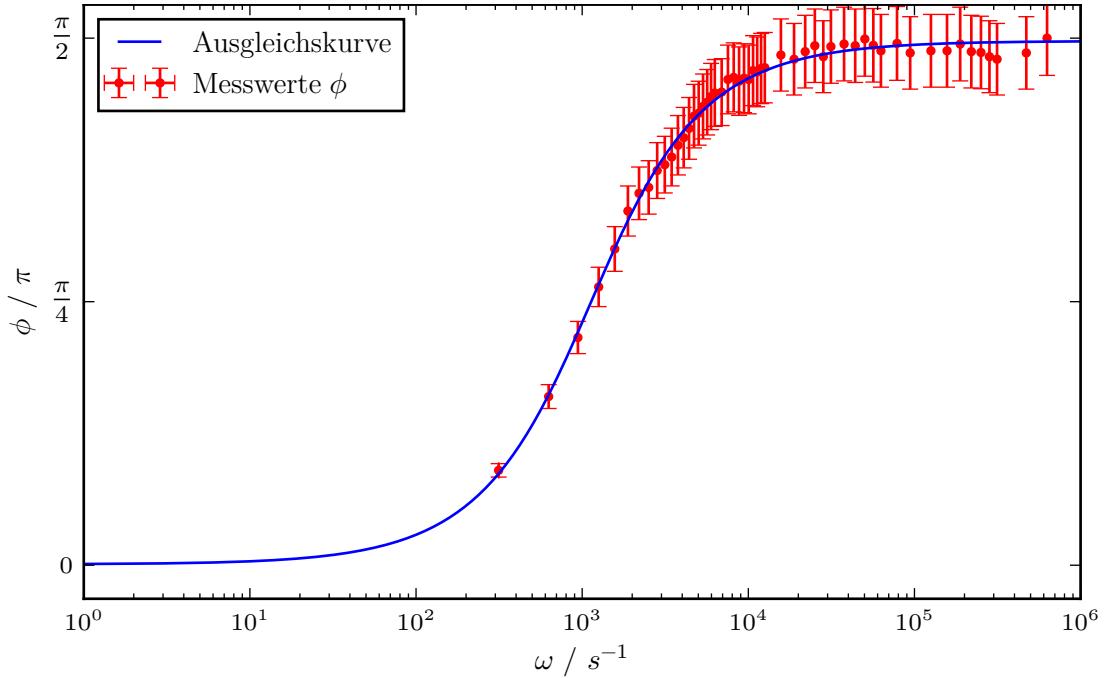
bestimmt. Somit ergibt sich nach der Formel (15) die Zeitkonstante  $RC$  zu

$$RC = (0.786 \pm 0.003) \text{ ms}. \quad (26)$$

Die Phasenverschiebung  $\phi$  kann über die Formel

$$\phi = \frac{a}{b} \cdot 2\pi \quad (27)$$

bestimmt werden. Diese wird ebenfalls halblogarithmisch gegen die Erregerkreisfrequenz aufgetragen. Dies realisiert Abbildung 8. Die Frequenz lässt sich wiederum nicht als Fehlerbalken darstellen da der Frequenzgenerator hinreichend genau Frequenzgenerator hinreichend genau ist. Der Fehler von  $a$  und  $b$  wird zu 5% des gemessenen Wertes angenommen.



**Abbildung 8:** Phasenverschiebungen.

An dieser Stelle wird eine Funktion der Art

$$f = A \arctan(mx) + b, \quad (28)$$

identisch (11), gefittet. Die Parameter ergeben sich hier zu

$$\begin{aligned} a &= 0.99 \pm 0.02, \\ m &= 0.00089 \pm 0.00003, \\ b &= 0.003 \pm 0.030. \end{aligned}$$

Die nicht-lineare Ausgleichsrechnung lässt somit auf den Wert

$$RC = (0.89 \pm 0.03) \text{ ms} \quad (29)$$

schließen.

Mit letzterem Wert kann ein Polarplot erstellt werden. Der Winkel  $\phi$  beschreibt die Phasenverschiebung, der Radius hingegen die normierte Amplitude der Kondensatorspannung. Die Phasenverschiebung wird nach Formel (16) berechnet und die normierte Amplitude ergibt sich aus Gleichung (15). Es resultiert der Polarplot in Abbildung 9 mit  $RC = (0.89 \pm 0.03) \text{ ms}$ .

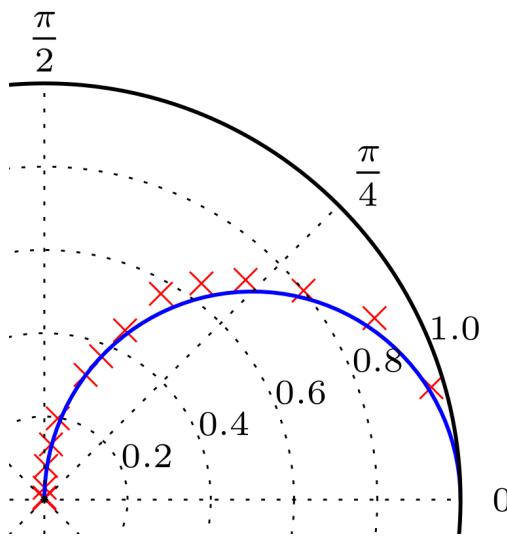


Abbildung 9: Polarplot.

Es werden mehrere Probewerte eingezeichnet.

### 3.3 Nutzung des RC-Gliedes zur Integration

Das RC-Glied wird, wie in der Durchführung beschrieben, zur Integration der angelegten Spannung genutzt. Dabei wird eine Frequenz von  $\nu = 3000 \text{ Hz}$  verwendet. Zunächst wird eine Sinusspannung angelegt, so dass

$$U_G = U_0 \sin \omega t \quad U_c = -\frac{U_0}{\omega} \cos \omega t \quad (30)$$

als Spannungen erwartet werden, wobei  $U_G$  die angelegte Spannung,  $U_c$  die erwartete Kondensatorspannung und  $U_0$  die Amplitude der Sinusspannung bezeichnet. In Abbildung 10 wird das abgelesene Ergebnis dargestellt.

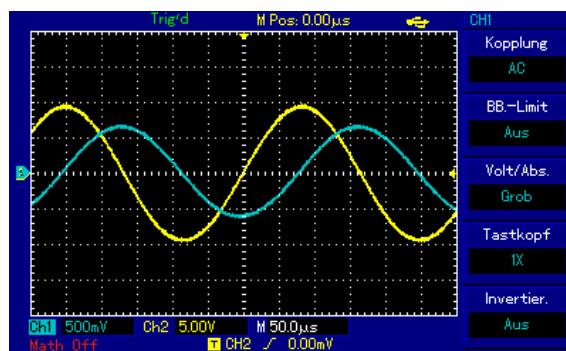


Abbildung 10: Erhaltene Kurven für Sinusspannung.

Als nächstes wird die Rechteckspannung überprüft, so dass die Werte

$$U_G = \begin{cases} U_0, & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ -U_0, & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad U_c = \begin{cases} at, & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ -at, & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad (31)$$

mit  $U_0$  als Amplitude der Rechteckspannung sowie  $a$  als positiven Skalierungsfaktor erwartet werden. Abbildung 11 zeigt das am Oszilloskop abgelesene Bild.

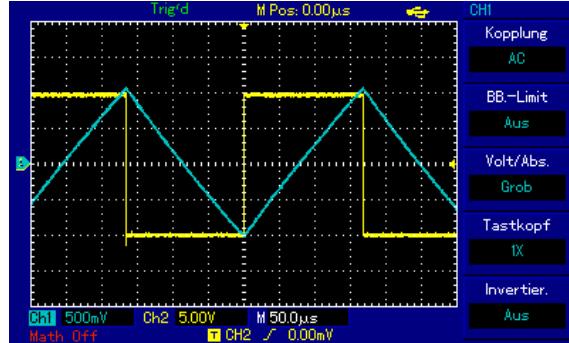


Abbildung 11: Erhaltene Kurven für Rechteckspannung.

Zum Schluss wird die Dreieckspannung überprüft, woraus sich die erwarteten Werte

$$U_G = \begin{cases} at, & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ -at, & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad U_c = \begin{cases} bt^2, & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ -bt^2, & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad (32)$$

mit Skalierungsfaktoren  $a$  und  $b$  ergeben. Abbildung 12 zeigt das abgelesene Bild.

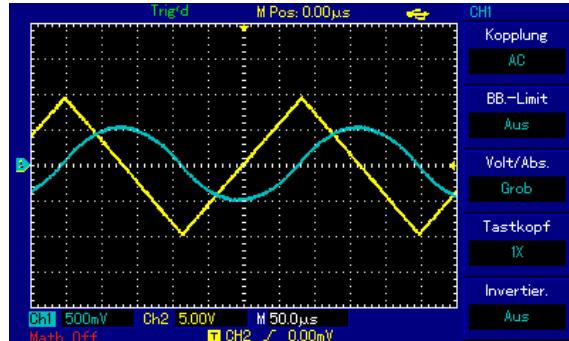


Abbildung 12: Erhaltene Kurven für Dreieckspannung.

## 4 Diskussion

Die Werte der Zeitkonstante unterscheiden sich jeweils um etwa 0.1 ms, was jeweils weit oberhalb der jeweiligen Fehler liegt. Zunächst zur Bestimmung mithilfe der Aufladekurve: Diese Methode erweist sich als nicht sehr zuverlässig, da es schwierig ist, gewisse

Wertepaare sicher abzulesen. Zuverlässiger mag die Bestimmung nach mithilfe der Frequenzabhängigkeit der Spannungsamplitude zu sein, wobei es auch nicht einfach ist, mit einem digitalen Oszilloskop die Amplitudenwerte exakt abzumessen. Die deutliche Verbesserung zu der Messung anhand der Aufladekurve ist jedoch, dass der Innenwiderstand der Spannungsquelle berücksichtigt wird, was einen systematischen Fehler eliminiert. Bei der Messung anhand der frequenzabhängigen Phasenverschiebung, zeigt sich eine signifikante Abweichung der Messwerte gegenüber der Ausgleichskurve bei hohen Frequenzen. Dies resultiert in einem fünf mal größeren Fehler als bei der Spannungsamplitudenmessung, trotz gleicher Anzahl an Messwerten. Generell trifft der systematische Fehler auf, dass ein zu hoher Frequenzbereich untersucht wurde. Weitere Messungen in niedrigeren Frequenzbereichen hätten die Messergebnisse bereichert. Insgesamt liegen die Messwerte recht gut auf den jeweilig erwarteten Funktionen. Die Methode nach mithilfe der Spannungsamplitude scheint am zuverlässigsten zu sein, da sie gewisse systematische Fehler eliminiert und den geringsten Fehler innehält.

## 5 Anhang

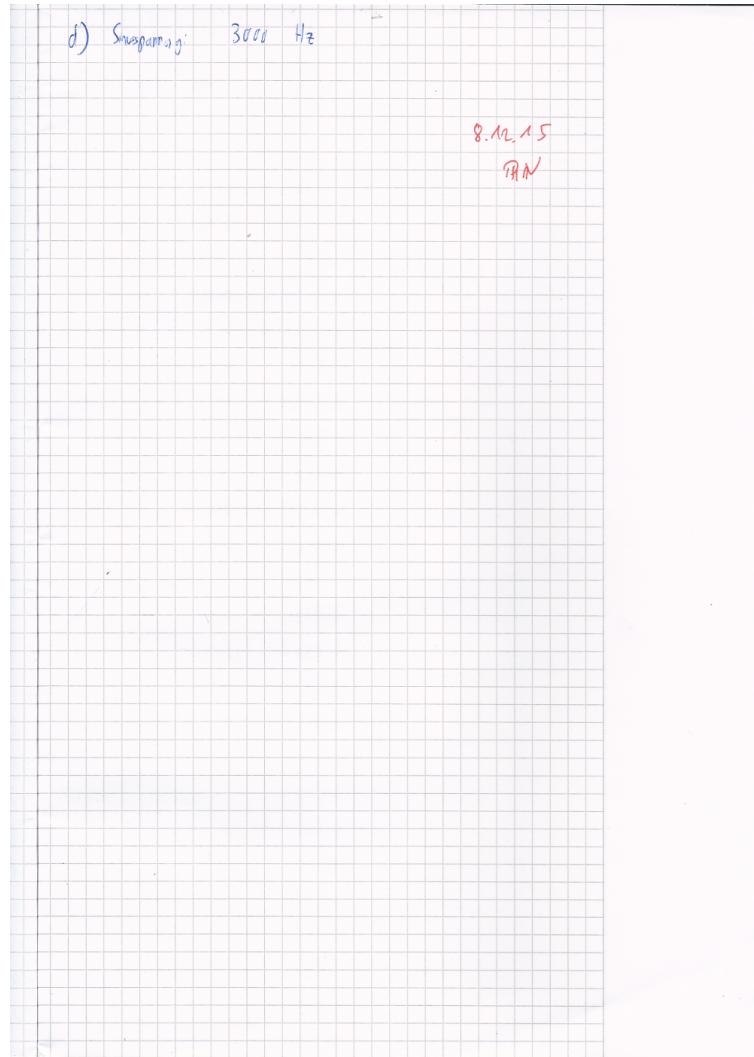
Versuch Nr. 353			probe to probe
b10	f [Hz]	a [s]	2MΩ
	50 Hz	900 μs	18,4 V
	100 Hz	800 μs	19,2 V
	150 Hz	720 μs	15,2 V
	200 Hz	660 μs	13,6 V
	250 Hz	600 μs	12,2 V
	300 Hz	560 μs	10,8 V
	350 Hz	504 μs	9,36 V
	400 Hz	448 μs	8,56 V
	450 Hz	416 μs	7,76 V
	500 Hz	380 μs	7,04 V
	550 Hz	352 μs	6,48 V
	600 Hz	332 μs	6,00 V
	650 Hz	312 μs	5,60 V
	700 Hz	296 μs	5,20 V
	750 Hz	284 μs	4,92 V
	800 Hz	268 μs	4,64 V
	850 Hz	256 μs	4,36 V
	900 Hz	244 μs	4,12 V
	950 Hz	234 μs	3,92 V
	1000 Hz	224 μs	3,76 V
	1100 Hz	204 μs	3,44 V
	1200 Hz	192 μs	3,16 V
	1300 Hz	176 μs	2,88 V
	1400 Hz	164 μs	2,70 V
	1500 Hz	154 μs	2,54 V
	1600 Hz	144 μs	2,38 V

8.12.15  
TRN

Abbildung 13: Originaldaten Teil 1.

<u>f</u>	<u>a</u>	<u>z [Uc]</u>
1700 Hz	138 μs	2.27 V
1800 Hz	130 μs	2.10 V
1900 Hz	124 μs	2.02 V
2000 Hz	118 μs	1.90 V
2500 Hz	96.8 μs	1.54 V
3000 Hz	80.0 μs	1.27 V
3500 Hz	69.6 μs	<del>4.110 V</del> 1.10 V
4000 Hz	61.6 μs	960 mV
4500 Hz	53.6 μs	856 mV
5000 Hz	49.2 μs	768 mV
6000 Hz	41.7 μs	628 mV
7000 Hz	35.7 μs	544 mV
8000 Hz	31.2 μs	476 mV
9000 Hz	27.4 μs	424 mV
10000 Hz	24.4 μs	380 mV
15000 Hz	16.2 μs	256 mV
20000 Hz	12.2 μs	300 192 mV
25000 Hz	9.76 μs	1.54 mV
30000 Hz	8.24 μs	1.28 mV
35000 Hz	6.96 μs	<del>1.10 mV</del>
40000 Hz	6.08 μs	97.6 mV
45000 Hz	5.36 μs	86.4 mV
50000 Hz	4.80 μs	77.6 mV
75 kHz	3.24 μs	52.0 mV
100 kHz	2.5 μs	39.2 mV
		8.12-15 PAW

Abbildung 14: Originaldaten Teil 2.



**Abbildung 15:** Origamidaten Teil 3.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung, Versuch Nr. 353*. 2015. URL: <http://129.217.224.2/HOME PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V353.pdf>.