

Physiklabor für Anfänger\*innen 2  
Ferienpraktikum im Wintersemester 2018/19

## **Versuch 56: Messungen mit einem Elektronenstrahloszilloskop, Kondensatorentladung**

(durchgeführt am 13. März 2019 bei )

14. März 2019



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ziel des Versuchs</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Aufbau und Durchführung</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Messung</b>	<b>6</b>
4.1	Spannungsamplitude, Tastverhältnisse und Frequenz der Rechteckspannung . . . . .	6
4.2	Ausmessung des Kurvenverlaufs . . . . .	6
4.3	Direkte Messung der Halbwertszeiten . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>8</b>
5.1	Berechnung des Tastverhältnisses und des Ein-Aus-Verhältnisses . . . . .	8
5.2	Ausmessung des Kurvenverlaufs . . . . .	8
5.2.1	Entladevorgang . . . . .	8
5.2.2	Aufladevorgang . . . . .	10
5.3	Berechnung der Zeitkonstanten und der Widerstände . . . . .	11
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>12</b>
6.1	Spannungsamplitude, Tastverhältnisse und Frequenz der Rechteckspannung . . . . .	12
6.2	Auf- und Entladekurven des Kondensators . . . . .	13
6.3	Zeitunkonstanten und Halbwertzeiten . . . . .	13
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>15</b>
A.1	Laborheft . . . . .	17

In Tabelle 1 ist eine Übersicht über alle in diesem Versuchsprotokoll verwendeten Symbole gegeben.

Größensymbol	Bedeutung
$U$	Spannung
$I$	Stromstärke
$R$	Widerstand
$C$	Kapazität
$t$	Zeit
$\tau$	Zeitkonstante
$s_x$	Unsicherheit auf die (Mess-) Größe $x$

Tabelle 1: Symbole, die in diesem Versuchsprotokoll verwendet wurden.

## 1 Ziel des Versuchs

Es sollen mit Hilfe eines Elektronenstrahloszilloskops die Charakteristika einer Rechteckspannung bestimmt und die Auf- und Entladevorgänge an einem Kondensator untersucht werden. Aus den Messungen soll auf unterschiedliche Weise der Widerstand  $R$  eines RC-Kreises bestimmt werden.

## 2 Physikalische Grundlagen

Aus der Maschenregel erhält man für den RC-Schwingkreis die Formel

$$U_0 = U_R(t) + U_C(t). \quad (1)$$

Aus der Integration dieser Gleichung erhält man

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (2)$$

Infolge dessen ergeben sich die Spannungsverläufe bei der Aufladung eines Kondensators zu

$$\begin{aligned} U_R(t) &= U_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \\ U_C(t) &= U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Während des Entladevorgangs ist die linke Seite von Gleichung (1) null. Deswegen können wir die Spannungsverläufe beim Entladen durch

$$\begin{aligned} U_R(t) &= -U_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \\ U_C(t) &= U_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \end{aligned} \quad (4)$$

beschreiben.

Für den Zusammenhang zwischen der Halbwertszeit und der Zeitkonstante

$$\tau = RC \quad (5)$$

gilt:

$$T_{1/2} = \tau \ln(2). \quad (6)$$

Über

$$\ln(U_R(t)/U_0) = -\frac{t}{RC} \quad (7)$$

hängt die Zeitkonstante auch mit den zu untersuchenden Spannungen zusammen.

Bei einem Rechteckspannungsgenerator beschreibt

$$\frac{t_b}{t_a} \quad (8)$$

das Ein-Aus-Verhältnis (Symmetrie) und

$$\frac{t_b}{T} \quad (9)$$

das Tastverhältnis, wobei die Periodendauer durch  $T = t_a + t_b$  gegeben ist.

### 3 Aufbau und Durchführung

Zuerst haben wir den Spannungsgenerator direkt an das Oszilloskop angeschlossen, um dann die Frequenz, die Spannungsamplitude und die Tastverhältnisse zu untersuchen.

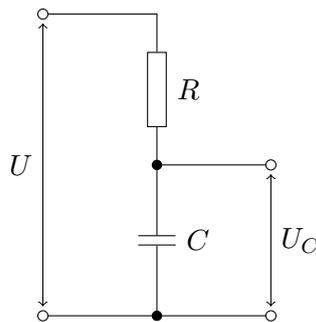


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Versuchs. Für die äußere Spannung  $U$  wird ein Rechteckspannungsgenerator verwendet.

Anschließend haben wir den Schaltkreis in Abbildung 1 aufgebaut. Dann untersuchten wir für einen Widerstand den Auflade- und Entladevorgang eines Kondensators, wobei wir hier in möglichst kleinen Zeitintervallen den entscheidenden Abschnitt des Spannungsverlaufes am Kondensator dokumentierten.

Im dritten Teil des Versuchs wandten wir für drei verschiedene Widerstände ein experimentelles Schnellverfahren an, mit dem wir die Halbwertszeit bestimmten, bei der die am Kondensator abgefallene Spannung gerade auf die Hälfte abgesunken ist.

## 4 Messung

### 4.1 Spannungsamplitude, Tastverhältnisse und Frequenz der Rechteckspannung

Die Messung der Spannungsamplitude ergab  $3,8 \cdot 1 \text{ V}$ . Den Fehler darauf berechnen wir aus der Wurzel der quadratischen Addition von Divisionsfehler und der Ableseungenauigkeit. Für alle unsere verwendeten Messbereiche ist nach der Oszilloskopsanleitung der Fehler auf die Division 3% des Messwertes. Den Fehler der Ableseungenauigkeit haben wir in dieser Messung mit einem Zehntel einer Division abgeschätzt. Daraus erhalten wir für die Spannungsamplitude

$$U_0 = (3,80 \pm 0,15) \text{ V.} \quad (10)$$

Unter Beachtung der selben Fehler maßen wir für die Zeiten, in denen die Rechteckspannung ihr Maximum bzw. ihr Minimum annimmt

$$\begin{aligned} t_A &= (0,19 \pm 0,01) \text{ ms} \\ t_B &= (0,48 \pm 0,02) \text{ ms.} \end{aligned} \quad (11)$$

Die Frequenz ergibt sich aus dem Reziproken der Periodendauer

$$T = t_A + t_B = (0,67 \pm 0,03) \text{ ms.} \quad (12)$$

Man erhält also über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung die Frequenz  $f = (1,49 \pm 0,15) \text{ mHz}$ .

### 4.2 Ausmessung des Kurvenverlaufs

Für die Untersuchung des Auflade- und Entladevorgangs verwendeten wir einen Kondensator der Kapazität  $C = 680 \text{ pF}$  und einen Widerstand  $R = (3300 \pm 33) \Omega$ . Um die Spannungskurve möglichst gut auswerten zu können, haben wir uns dazu entschieden, in dem Bereich, in denen der wesentliche Anstieg bzw. Abfall des Spannungsverlaufs zu sehen ist, in Schritten von  $0,5 \mu\text{s}$  den Wert der am Kondensator abfallenden Spannung zu dokumentieren. Außerdem haben wir uns bewusst dazu entschieden, die Spannung am Kondensator und nicht am Widerstand abzugreifen, um einen systematischen Fehler möglichst zu vermeiden. Zur Messung der Spannungskurvenkurven haben wir die Nulllinie vor der Messung auf die zweit unterste Linie gesetzt. Die Breite der Linie war allerdings so groß, dass wir für das

Setzen der Nulllinie einen Fehler von 0,25 V annehmen können. Die Ergebnisse dieser Messung sind im Anhang in zu finden. Die Fehler berechnen sich wieder aus der Wurzel der quadratischen Addition von Divisionsfehler (3% des Messwertes) und der Ableseungenauigkeit. Die Ableseungenauigkeit bei der Entladung beträgt nach unserer Schätzung ein Zehntel Divisions. Beim Aufladevorgang haben wir uns aber für eine Ableseungenauigkeit von einem Fünftel Divisions entschieden, weil hier die Breite der Spannungskurve am Oszilloskop noch breiter war, als bei den vorherigen Messungen sowieso schon. Aus diesem Grund konnten wir nur unscharf erkennen, an welchem Punkt genau der Wert der Spannung zu einer bestimmten Zeit liegt.

### 4.3 Direkte Messung der Halbwertszeiten

Das experimentelles Schnellverfahren, mit dem wir die Halbwertszeit bestimmten, haben wir realisiert, indem wir beim Aufladevorgang die Nulllinie am Oszilloskop auf die zweit unterste Rasterlinie legten und darauf achteten, dass die Spannungskurve die zweit oberste Linie schneidet. Dann konnten wir die Halbwertszeit einfach beim Durchgang der Kurve durch die mittlere horizontale Rasterlinie ablesen. Für den Entladevorgang nutzten wir ein analoges Verfahren, nur dass wir jetzt die Nulllinie auf die zweit oberste Rasterlinie legten. Das Ablesen der Halbwertszeiten führten wir je einmal für Schaltkreise mit den Widerständen

$$\begin{aligned} R_1 &= (3300 \pm 33) \Omega \\ R_2 &= (5600 \pm 56) \Omega \\ R_3 &= (10\,000 \pm 100) \Omega \end{aligned} \tag{13}$$

durch. Die Werte der Widerstände inklusive deren Fehler konnten wir an den Farbringen der Widerstände ablesen.

Beim Entladevorgang erhielten wir die folgenden Halbwertszeiten:

$$\begin{aligned} T_{1E, \frac{1}{2}} &= (1,75 \pm 0,11) \mu\text{s} \\ T_{2E, \frac{1}{2}} &= (2,80 \pm 0,13) \mu\text{s} \\ T_{3E, \frac{1}{2}} &= (5,10 \pm 0,25) \mu\text{s}. \end{aligned} \tag{14}$$

Die Fehler berechneten wir wieder aus Kombination der Ableseungenauigkeit, welche wir auf Grund der großen Breite der Spannungskurve auf ein Fünftel der verwendeten Division abschätzten, mit dem Divisionsfehler von 3% des Messwertes.

Auf die selbe Weise erhielten wir beim Aufladevorgang die Halbwertszeiten:

$$\begin{aligned} T_{1A, \frac{1}{2}} &= (1,56 \pm 0,06) \mu\text{s} \\ T_{2A, \frac{1}{2}} &= (2,80 \pm 0,13) \mu\text{s} \\ T_{3A, \frac{1}{2}} &= (4,90 \pm 0,25) \mu\text{s}. \end{aligned} \tag{15}$$

## 5 Auswertung

### 5.1 Berechnung des Tastverhältnisses und des Ein-Aus-Verhältnisses

Das Tastverhältnis können wir aus ?? berechnen. Für den Bestwert erhalten wir somit:

$$\frac{t_b}{T} = 0,72 \quad (16)$$

Mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung lässt sich die Unsicherheit auf diesen Wert ausrechnen:

$$s_{\frac{t_b}{T}} = \sqrt{\left(\frac{s_{t_b}}{T}\right)^2 + \left(\frac{s_T t_b}{T^2}\right)^2} = 0,04 \quad (17)$$

Damit erhalten wir  $\frac{t_b}{T} = 0,72 \pm 0,04$ .

Auf dem gleichen Wege können wir mit Gleichung (8) das Ein-Aus-Verhältnis berechnen:

$$\frac{t_b}{t_A} = 2,53 \quad (18)$$

Auch hier kann Gaußsche Fehlerfortpflanzung benutzt werden, um den Fehler auf diesen Wert zu berechnen:

$$s_{\frac{t_b}{t_A}} = \sqrt{\left(\frac{s_{t_b}}{t_A}\right)^2 + \left(\frac{s_{t_A} t_b}{t_A^2}\right)^2} = 0,17 \quad (19)$$

Als Endergebnis erhalten wir also  $\frac{t_b}{t_A} = 2,53 \pm 0,17$ .

### 5.2 Ausmessung des Kurvenverlaufs

In diesem Abschnitt werten wir die Messwerte aus Tabellen 2 und 3 ausgewertet.

#### 5.2.1 Entladevorgang

Zunächst tragen wir die Messwerte aus Tabelle 2 in einem logarithmischen Maßstab auf. Der Verlauf der Kondensatorspannung ist in Abbildung 2 dargestellt.

Im Diagramm ist eine Ausgleichsgerade dargestellt, die wir an den Stützpunkten

$$\begin{aligned} (t_1, U_1) &= ((-0,25 \pm 0,05) \mu\text{s}, (4,00 \pm 0,05) \text{ V}) \\ (t_2, U_2) &= ((10,25 \pm 0,05) \mu\text{s}, (0,08 \pm 0,02) \text{ V}) \end{aligned} \quad (20)$$

festgemacht haben. Aus Gleichung (7) lässt sich unter Verwendung der Geradensteigung der Kehrwert  $\tau^{-1}$  berechnen:

$$\tau^{-1} = -\frac{\ln U_2/U_1}{t_2 - t_1} \quad (21)$$

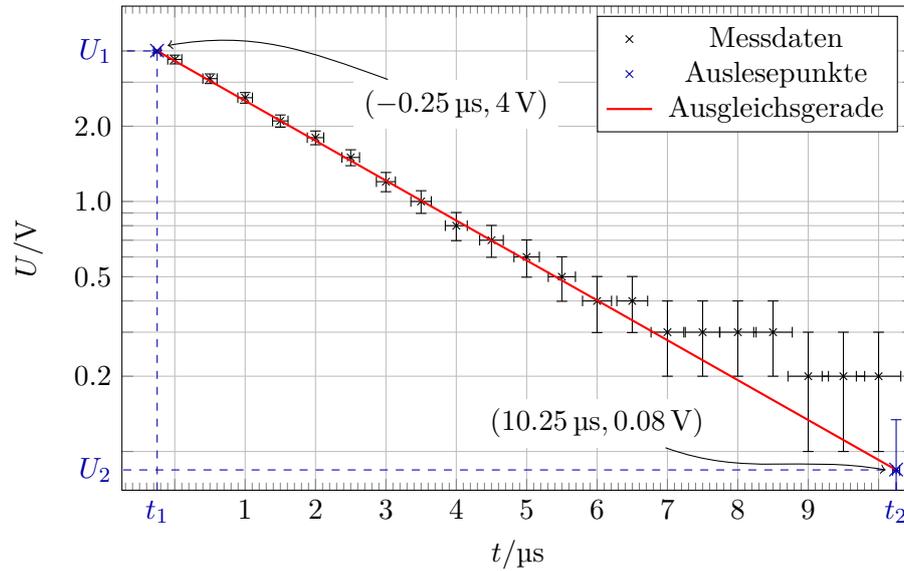


Abbildung 2: Kondensatorsspannung beim Entladevorgang in logarithmischem Maßstab über der Zeit  $t$

Für  $\tau$  gilt daher:

$$\tau = -\frac{t_2 - t_1}{\ln U_2/U_1} = 2,68 \mu s \quad (22)$$

Der Fehler auf diesen Wert ist mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechenbar:

$$s_\tau = \left[ \left( \frac{t_2 - t_1}{U_1 \ln U_2/U_1^2} s_{U_1} \right)^2 + \left( \frac{t_2 - t_1}{U_2 \ln U_2/U_1^2} s_{U_2} \right)^2 + \left( \frac{s_{t_1}}{\ln U_2/U_1} \right)^2 + \left( \frac{s_{t_2}}{\ln U_2/U_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

$$= 0,13 \mu s$$

Mit der Kapazität des Kondensators von  $680 \text{ pF}$  und der Zeitkonstanten  $\tau = RC$  erhalten wir für den Widerstand:

$$R = \frac{\tau}{C} = 3947,11 \Omega \quad (24)$$

Der Fehler lässt sich ebenfalls mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnen:

$$s_R = \frac{s_\tau}{C} = 253,95 \Omega \quad (25)$$

Damit erhalten wir als Endergebnis  $R = (3947,11 \pm 253,95) \Omega$ .

### 5.2.2 Aufladevorgang

Analog zu vorhin tragen wir die Ergebnisse aus Tabelle 3 in einem Diagramm auf. Damit wir die logarithmische Skala sinnvoll ausnutzen können und da wir die Kondensatorspannung gemessen haben, müssen wir die Widerstandsspannung über der Zeit auftragen. Um diese aus der Kondensatorspannung zu berechnen, subtrahieren wir jene von der Spannungsamplitude  $U_0$ , die wir im vorigen Abschnitt berechneten:

$$U_R = U_0 - U_C \quad (26)$$

Der Fehler auf diesen Wert berechnet sich dann über

$$s_{U_R} = \sqrt{s_{U_C}^2 + s_{U_0}^2}. \quad (27)$$

Nun lassen sich die Widerstandsspannungswerte im Diagramm auftragen, welches in Abbildung 3 zu sehen ist.

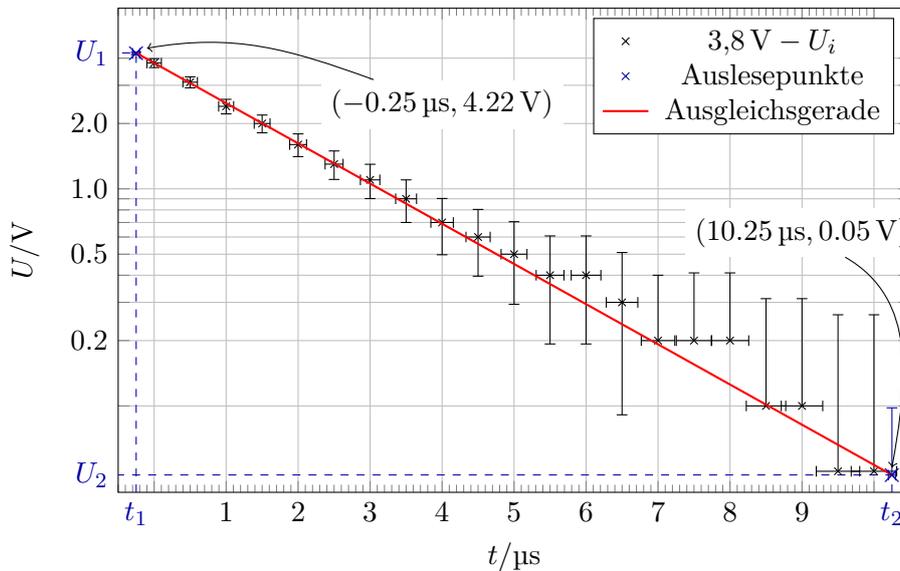


Abbildung 3: Widerstandsspannung beim Aufladevorgang in logarithmischem Maßstab über der Zeit  $t$

Die in der Abbildung dargestellte Gerade stützt sich auf die Punkte

$$\begin{aligned} (t_1, U_1) &= ((-0,25 \pm 0,05) \mu\text{s}, (4,22 \pm 0,05) \text{V}), \\ (t_2, U_2) &= ((10,25 \pm 0,05) \mu\text{s}, (0,05 \pm 0,02) \text{V}). \end{aligned} \quad (28)$$

Die Unsicherheiten auf diese stammen – wie schon die Unsicherheiten oben – auf persönlichem Ermessen unsererseits bei der Konstruktion der Geraden.

Die Zeitkonstante  $\tau$  lässt sich nun analog zu oben berechnen. Nach Gleichung (21) folgt:

$$\tau = 2,37 \text{ s} \quad (29)$$

Auch der Fehler auf diese lässt sich gemäß Gleichung (23) ausrechnen:

$$s_\tau = 0,21 \mu\text{s} \quad (30)$$

Aus der Zeitkonstante  $\tau$  können wir erneut den Widerstand  $R$ , der in dem  $RC$ -Kreis verbaut ist, nach Gleichungen (24) und (25) berechnen:

$$R = (3481,22 \pm 314,95) \Omega. \quad (31)$$

Um die Ergebnisse aus den Abschnitten 5.2.2 und 5.2.1 zu kombinieren, lässt sich noch der gewichtete Mittelwert berechnen. Ist  $R_E$  der Widerstand aus dem Entladevorgang und  $R_A$  der Widerstand aus dem Aufladevorgang, erhalten wir den Mittelwert als

$$\bar{R} = \frac{\frac{R_E}{s_{R_E}^2} + \frac{R_A}{s_{R_A}^2}}{\frac{1}{s_{R_E}^2} + \frac{1}{s_{R_A}^2}} = 3763,55 \Omega. \quad (32)$$

Die Unsicherheit auf diesen Wert errechnet sich mit

$$s_{\bar{R}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{s_{R_E}^2} + \frac{1}{s_{R_A}^2}}} = 197,69 \Omega. \quad (33)$$

Insgesamt erhalten wir also aus dieser Messmethode einen Widerstand von  $(3763,55 \pm 197,69) \Omega$ .

### 5.3 Berechnung der Zeitkonstanten und der Widerstände

Aus den Messungen der Halbwertszeiten für den Auf- und Entladevorgang bilden wir für jeden verwendeten Widerstand den gewichteten Mittelwert, da die Unsicherheiten auf die einzelnen Halbwertszeiten unterschiedlich sind.

$$\overline{T_{1/2}} = \frac{\sum_{i=1}^2 \frac{(T_{1/2})_i}{s_{(T_{1/2})_i}^2}}{\sum_{i=1}^2 \frac{1}{s_{(T_{1/2})_i}^2}}. \quad (34)$$

Den Fehler auf diesen Wert erhalten wir wie folgt:

$$s_{\overline{T_{1/2}}} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^2 \frac{1}{s_{(T_{1/2})_i}^2}}} \quad (35)$$

Das ergibt für die Halbwertszeiten die Werte:

$$\begin{aligned} T_1 &= (1,60 \pm 0,05) \mu\text{s} \\ T_2 &= (2,80 \pm 0,09) \mu\text{s} \\ T_3 &= (5,00 \pm 0,18) \mu\text{s}. \end{aligned} \quad (36)$$

Damit erhalten wir aus Gleichung (6) die Zeitkonstanten:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= (2,31 \pm 0,08) \mu\text{s} \\ \tau_2 &= (4,04 \pm 0,13) \mu\text{s} \\ \tau_3 &= (7,21 \pm 0,26) \mu\text{s}.\end{aligned}\tag{37}$$

Wenden wir nun Gleichung (5), erhalten wir die berechneten Widerstände:

$$\begin{aligned}R_1 &= (3402,14 \pm 101,75) \mu\text{s} \\ R_2 &= (5940,51 \pm 195,03) \mu\text{s} \\ R_3 &= (10\,608,10 \pm 375,05) \mu\text{s}.\end{aligned}\tag{38}$$

## 6 Diskussion

### 6.1 Spannungsamplitude, Tastverhältnisse und Frequenz der Rechteckspannung

Die Messung der Spannungsamplitude von der Rechteckspannung ergab:

$$U_0 = (3,80 \pm 0,15) \text{V}.\tag{39}$$

Aus dem Reziproken der Periodendauer

$$T = t_A + t_B = (0,67 \pm 0,03) \text{ms}\tag{40}$$

erhielten wir die Frequenz

$$f = (1,49 \pm 0,15) \text{mHz}.\tag{41}$$

Außerdem konnten wir aus unseren Messwerten das Tastverhältnis

$$\frac{t_b}{T} = 0,72 \pm 0,04\tag{42}$$

und das Ein-Aus-Verhältnis

$$\frac{t_b}{t_A} = 2,53 \pm 0,17.\tag{43}$$

berechnen.

Diese Werte sind natürlich alle mit Fehlern behaftet, da in der Oszilloskopsanleitung der Divisionsfehler von 3% angegeben war. Zusätzlich dazu war es sehr schwer, die genauen Werte der Messpunkte vom Oszilloskop abzulesen, weil die Spannungskurve sehr breit war und der abzulesende Punkt somit in einem gewissen Bereich um den exakten Messwert gelegen haben kann.

## 6.2 Auf- und Entladekurven des Kondensators

Aus den Auf- und Entladekurven des Kondensators konnten wir den Widerstand  $(3763,55 \pm 197,69) \Omega$  berechnen. Die Abweichung des Wertes von  $R_{\text{Farbcode}} = (3300 \pm 33) \Omega$  ist mit 2,34, bzw. 14,03, Standardabweichungen recht groß. Deswegen haben wir sicherlich die Ableseungenauigkeit bei Werten vom Oszilloskop, sowie die Ungenauigkeiten auf die Werte in unserer graphischen Auswertung als zu klein abgeschätzt. Die graphische Auswertung ist hier wirklich nicht sehr vertrauenswürdig, da wir nur eine Messreihe aufgenommen haben und an die Messpunkte dann eine Ausgleichsgerade anlegen sollte. Diese Gerade würde sich genauer bestimmen lassen, wenn man mehrere Messreihen des Spannungsverlaufes aufnimmt.

Schließlich sollte auch eine systematische Unsicherheit nicht unerwähnt bleiben: Die über den Farbcode des Widerstands bestimmten Werte beziehen sich auf den Widerstand selbst, während wir mit dem Oszilloskop den Gesamtwiderstand der Schaltung bestimmt haben. Wegen des positiven Innenwiderstands der Schaltung erwarten wir daher aus der graphischen Auswertung stets einen höheren Widerstandswert (wenn von Kalibrierungsfehlern, o. Ä. abgesehen wird).

## 6.3 Zeitkonstanten und Halbwertzeiten

Aus unseren Messwerten erhielten wir die Halbwertzeiten:

$$\begin{aligned} T_1 &= (1,60 \pm 0,05) \mu\text{s} \\ T_2 &= (2,80 \pm 0,09) \mu\text{s} \\ T_3 &= (5,00 \pm 0,18) \mu\text{s}. \end{aligned} \tag{44}$$

Und daraus die Zeitkonstanten:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= (2,31 \pm 0,08) \mu\text{s} \\ \tau_2 &= (4,04 \pm 0,13) \mu\text{s} \\ \tau_3 &= (7,21 \pm 0,26) \mu\text{s}, \end{aligned} \tag{45}$$

sowie die berechneten Widerstände:

$$\begin{aligned} R_1 &= (3402,14 \pm 101,75) \Omega \\ R_2 &= (5940,51 \pm 195,03) \Omega \\ R_3 &= (10\,608,10 \pm 375,05) \Omega. \end{aligned} \tag{46}$$

Zu berücksichtigen sind hier wieder statistische Unsicherheiten, welche durch den Divisionsfehler und der Ableseungenauigkeit verursacht werden. Durch die unscharf angezeigte Kurve auf dem Oszilloskop ist vor allem die Ableseungenauigkeit wieder sehr hoch. Trotzdem können wir aber feststellen,

dass unser berechnete Wert für  $R_1$  erstaunlich gut mit dem durch die Farbcodes angezeigten Wert  $R_{\text{Farbcode}} = (3300 \pm 33) \Omega$  übereinstimmt: Der graphisch bestimmte Wert befindet sich knapp in einer  $1\sigma$ -Umgebung vom Farbcode-Wert.

Die berechneten Werte für  $R_2$  und  $R_3$  stimmten zwar nicht so gut wie  $R_1$  mit den durch den Farbcode angezeigten Wert

$$\begin{aligned} R_{2,\text{Farbcode}} &= (5600 \pm 56) \Omega \\ R_{3,\text{Farbcode}} &= (10\,000 \pm 100) \Omega \end{aligned} \tag{47}$$

überein, aber dennoch betragen auch hier die Abweichungen des berechneten vom durch die Farbcodes angezeigten Wert weniger als  $2\sigma$ . Dies ist im Rahmen der oben genannten Divisionsfehler und der Ableseungenauigkeit ein gutes Ergebnis.

Vergleichen wir  $R_1 = (3402,14 \pm 101,75) \mu\text{s}$  mit dem aus der Spannungskurve berechneten Wert  $(3763,55 \pm 197,69) \Omega$ . Die Abweichungen der Werte voneinander liegt innerhalb einer  $2\sigma$ - oder  $3\sigma$ -Umgebung. Das bedeutet, dass wir die Unsicherheiten zu klein abgeschätzt haben. Vermutlich haben wir die Ableseungenauigkeit bei Werten vom Oszilloskop zu klein geschätzt. Natürlich ist eine graphische Auswertung auch nicht sehr zuverlässig, weswegen sich wie oben genannt die große Abweichung des aus der graphischen Auswertung berechneten Wertes vom durch die Farbcodes angezeigten Wert erklären lässt. Es fällt auch noch auf, dass die beiden berechneten Werte  $(3402,14 \pm 101,75) \mu\text{s}$  und  $(3763,55 \pm 197,69) \Omega$  beide über dem Wert  $R_{\text{Farbcode}} = (3300 \pm 33) \Omega$  liegen. Von daher können wir auf einen systematischen Fehler schließen, welcher vermutlich durch Innenwiderstände in der Schaltung hervorgerufen wurde, die wir in unserer Berechnung nicht berücksichtigt haben.

## A Anhang

$t$ in $\mu\text{s}$	$U_C$ in V
$0,0 \pm 0,1$	$3,7 \pm 0,1$
$0,5 \pm 0,1$	$3,1 \pm 0,1$
$1,0 \pm 0,1$	$2,6 \pm 0,1$
$1,5 \pm 0,1$	$2,1 \pm 0,1$
$2,0 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,1$
$2,5 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$
$3,0 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$
$3,5 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,1$
$4,0 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,1$
$4,5 \pm 0,2$	$0,7 \pm 0,1$
$5,0 \pm 0,2$	$0,6 \pm 0,1$
$5,5 \pm 0,2$	$0,5 \pm 0,1$
$6,0 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,1$
$6,5 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,1$
$7,0 \pm 0,2$	$0,3 \pm 0,1$
$7,5 \pm 0,2$	$0,3 \pm 0,1$
$8,0 \pm 0,3$	$0,3 \pm 0,1$
$8,5 \pm 0,3$	$0,3 \pm 0,1$
$9,0 \pm 0,3$	$0,2 \pm 0,1$
$9,5 \pm 0,3$	$0,2 \pm 0,1$
$10,0 \pm 0,3$	$0,2 \pm 0,1$

Tabelle 2: Spannung  $U_C$  am Kondensator in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  beim Entladevorgang

$t$ in $\mu\text{s}$	$U_C$ in V	$U_R$ in V
$0,0 \pm 0,1$	$0,0 \pm 0,1$	$3,8 \pm 0,2$
$0,5 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,1$	$3,1 \pm 0,2$
$1,0 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,1$	$2,4 \pm 0,2$
$1,5 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,1$	$2,0 \pm 0,2$
$2,0 \pm 0,1$	$2,2 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,2$
$2,5 \pm 0,1$	$2,5 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,2$
$3,0 \pm 0,1$	$2,7 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,2$
$3,5 \pm 0,1$	$2,9 \pm 0,1$	$0,9 \pm 0,2$
$4,0 \pm 0,2$	$3,1 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,2$
$4,5 \pm 0,2$	$3,2 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,2$
$5,0 \pm 0,2$	$3,3 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,2$
$5,5 \pm 0,2$	$3,4 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,2$
$6,0 \pm 0,2$	$3,4 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,2$
$6,5 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,1$	$0,3 \pm 0,2$
$7,0 \pm 0,2$	$3,6 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,2$
$7,5 \pm 0,2$	$3,6 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,2$
$8,0 \pm 0,3$	$3,6 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,2$
$8,5 \pm 0,3$	$3,7 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,2$
$9,0 \pm 0,3$	$3,7 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,2$
$9,5 \pm 0,3$	$3,8 \pm 0,2$	$0,0 \pm 0,2$
$10,0 \pm 0,3$	$3,8 \pm 0,2$	$0,0 \pm 0,2$

Tabelle 3: Spannung  $U_C$  am Kondensator und am Widerstand  $U_R$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  beim Aufladevorgang. Die dritte Spalte wurde über Gleichung (26) berechnet.

