# Hardwarepraktikum WS 1997/98

# Versuch 1

# TTL-Schaltkreise

Jan Horbach, 17518
Chris Hübsch, 17543
Lars Jordan, 17560

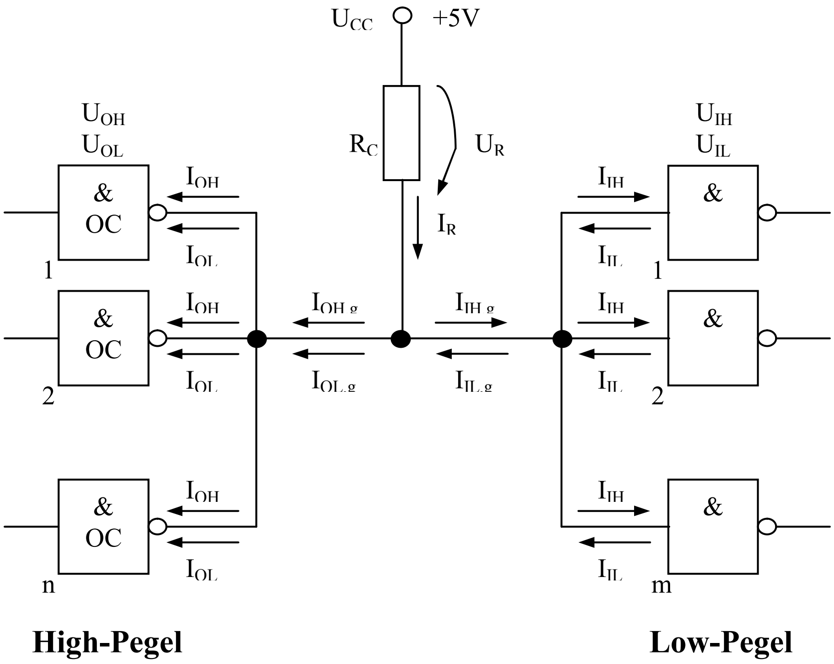
## *1. Aufgabe:*

Leiten Sie die Formeln (9) und (10) aus dem Arbeitsmaterial her.

### Vorüberlegung:

Der Kollektorwiderstand $R_C$ erfüllt zwei Aufgaben: Er darf bei Pegel H nur so groß sein, daß $U_{OH}$ nicht unterschritten wird. Bei Pegel L darf er nur so klein sein, daß $I_{OL}$ nicht überschritten wird. Daraus folgen zwei Ungleichungen, denen $R_C$ genügen muß. Diese Ungleichungen sollen jetzt hergeleitet werden.

Die zugrundeliegende Schaltung entspricht folgendem Schaltplan:




Für die Ausgangsspannungen $U_{OH}$ (H-Pegel) und $U_{OL}$ (L-Pegel) sowie für die entsprechenden Eingangsspannungen $U_{IH}$ und $U_{IL}$ gelten folgende Restriktionen:

$U_O \geq 2{,}4\ V = U_{OH} \ > \ U_I \geq 2{,}0\ V = U_{IH}$ $\qquad$ $U_O \leq 0{,}4\ V = U_{OL} \ < \ U_I \leq 0{,}8\ V = U_{IL}$

Da die Gatter in einer Parallelschaltung angeordnet sind, teilen sich die Ströme auf die einzelnen Gatter auf, die Spannungen über ihnen sind jedoch gleich der Spannung, die über dem gesamten Zweig abfällt:

| | | | |
|---|---|---|---|
| $I_{OH,g} = n \cdot I_{OH}$ | $I_{IH,g} = m \cdot I_{IH}$ | $I_{OL,g} = I_{OL}$ | $I_{IL,g} = m \cdot I_{IL}$ |
| $U_{OH,g} = U_{OH}$ | $U_{IH,g} = U_{IH}$ | $U_{OL,g} = U_{OL}$ | $U_{IL,g} = U_{IL}$ |

Bei $I_{OH}$ handelt es sich um einen sehr kleinen Sperrstrom. $I_{OL,g}$ ergibt sich deshalb nur aus $1 \cdot I_{OL}$, weil das den ungünstigsten Fall darstellt, der genau dann eintritt, wenn nur einer der Ausgangstransistoren leitend ist.

Da es sich bei dem Widerstand $R_C$ und den Gattern um eine Reihenschaltung handelt, addieren sich die Spannungsabfälle $U_R$ und $U_O$ und ergeben zusammen $U_{CC}$, d.h. $U_{CC} = U_R + U_O$ oder $U_R = U_{CC} - U_O$. Ein Einsetzen der Ungleichungen für $U_O$ ergibt:

$U_R \le U_{CC} - U_{OH}$ $\qquad$ $U_R \ge U_{CC} - U_{OL}$

Für die Ströme gilt nach dem 1. KIRCHHOFFschen Gesetz: $\Sigma I_{ankommend} = \Sigma I_{abgehend}$, d.h.:

$I_R = I_{OH,g} + I_{IH,g}$ $\qquad$ $I_R + I_{IL,g} = I_{OL,g}$ oder $I_R = I_{OL,g} - I_{IL,g}$

Da $R_C$ nach dem OHMschen Gesetz $R_C = U_R / I_R$ ist, erhält man:

$$R_C \le \frac{U_{CC} - U_{OH}}{I_{OH,g} + I_{IH,g}} \qquad R_C \ge \frac{U_{CC} - U_{OL}}{I_{OL,g} - I_{IL,g}}$$

$$R_C \le \frac{U_{CC} - U_{OH}}{n \cdot I_{OH} + m \cdot I_{IH}} \qquad R_C \ge \frac{U_{CC} - U_{OL}}{I_{OL} - m \cdot I_{IL}}$$

## *2. Aufgabe:*

Entwerfen und realisieren Sie unter ausschließlicher Verwendung von Negatoren mit Open-collector-Ausgang die BOOLEsche Funktion:

$$y = f(a,b,c,d) = (a \vee b) \wedge (c \vee d)$$

### Vorüberlegung:

Für die Realisierung der Funktion steht außer den Negatoren nur noch die Konjunktion zur Verfügung. Die Konjunktion wird durch das Parallelschalten von Gattern mit OC-Ausgängen in *positiver Logik* realisiert. Demzufolge ist die angegebene Funktion in eine solche Darstellung zu bringen, die nur Negation und Konjunktion verwendet. Für die Umformung wird das De-Morgansche Gesetz auf die beiden Klammerterme angewandt.

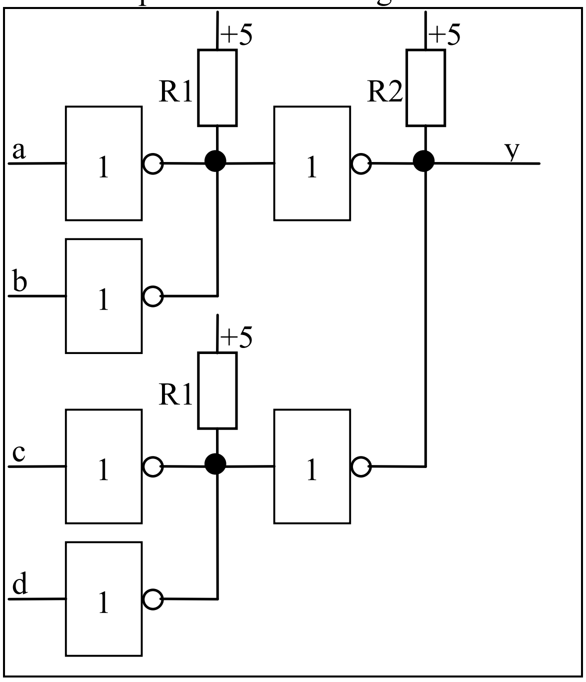
$$y = (a \vee b) \wedge (c \vee d)$$
$$y = \overline{\overline{(a \vee b)}} \wedge \overline{\overline{(c \vee d)}}$$
$$y' = \overline{(\overline{a} \wedge \overline{b})} \wedge \overline{(\overline{c} \wedge \overline{d})}$$

Um die Korrektheit der Umformung zu beweisen und die Funktionsfähigkeit der realisierten Schaltung zu prüfen, wird die Wahrheitstabelle aufgestellt:

| a | b | c | d | (a∨b) | (c∨d) | ¬(¬a ∧ ¬b) | ¬(¬c ∧ ¬d) | y | y’ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

**Tabelle 1**

Der Schaltplan sieht dann folgendermaßen aus:




Da die Umformung korrekt war, können nun die Widerstände berechnet werden. Dazu werden einfach die unter (1.) ermittelten Formeln verwendet.

$$R1 \leq \frac{5V - 2.4V}{2 * 0.25mA + 0.04mA} = \frac{2.6V}{0.54mA} \approx 4.81k\Omega$$
$$R1 \geq \frac{5V - 0.4V}{16mA - 1.6mA} = \frac{4.6V}{14.4mA} \approx 0.319k\Omega$$
$$R2 \leq \frac{5V - 2.4V}{2 * 0.25mA + 4 * 0.04mA} = \frac{2.6V}{0.66mA} \approx 3.94k\Omega$$
$$R2 \geq \frac{5V - 0.4V}{16mA - 4 * 1.6mA} = \frac{4.6V}{9.6mA} \approx 0.479k\Omega$$

Damit ist es ausreichend, jeweils einen 1.8 kΩ Widerstand zu verwenden.

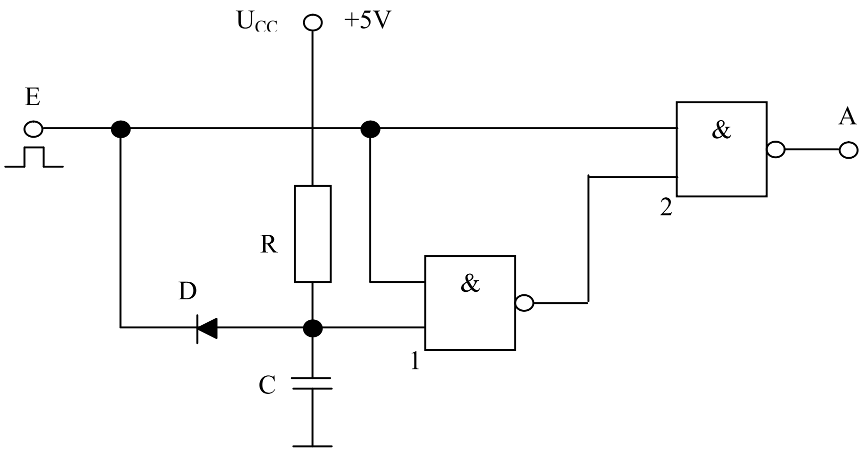
## Durchführung:

Der Test mit dem Modellsystem verlief erfolgreich. Es wurden genau die vorhergesagten Ergebnisse erzielt.

## *3. Aufgabe:*

Analysieren Sie die Funktionsweise der Schaltung

Es wird folgender Univibrator (auch: monostabiler Multivibrator, Monoflop) untersucht:

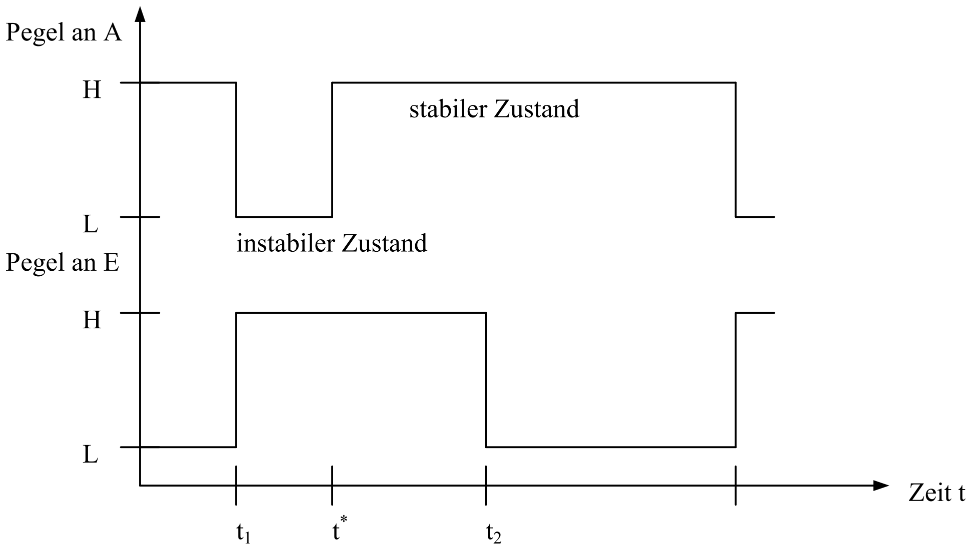



Zu Beginn sei der Eingang E auf Low-Pegel und der Kondensator C entladen. Am oberen Eingang des Gatters 2 liegt dann ebenfalls ein Low-Pegel, so daß sich am Ausgang A High-Pegel einstellt.

Zum Zeitpunkt $t_1$ schaltet E auf H-Pegel. Der Kondensator lädt sich über den Widerstand R auf. Am oberen Eingang des Gatters 1 liegt H-, am unteren Eingang zunächst L-Pegel, da sich wegen seines geringen Innenwiderstands zuerst der Kondensator auflädt. Daher liegt H am Ausgang von Gatter 1 und damit auch am unteren Eingang von Gatter 2. Am oberen Eingang dieses Gatters liegt ebenfalls H-Pegel, so daß am Ausgang A ein Low-Pegel anliegt.

Wenn der Kondensator zum Zeitpunkt $t^*$ weit genug aufgeladen und damit sein Innenwiderstand größer geworden ist, liegt am unteren Eingang von Gatter 1 ein Pegel an, der groß genug ist, um als H interpretiert zu werden. Die beiden Gatter realisieren also gewissermaßen einen Schwellwertschalter, der erst umschaltet, wenn ein gewisser Pegel anliegt. Somit liegt jetzt zweimal H an Gatter 1 und damit L an dessen Ausgang. An Gatter 2 liegen also H am oberen und L am unteren Eingang, was zu einem High-Pegel am Ausgang A führt.

Zum Zeitpunkt $t_2$ schaltet E wieder auf L-Pegel zurück. Der Kondensator entlädt sich über die Diode D und den Eingang E, so daß er sich beim nächsten H erst wieder aufladen muß. Am Ausgang A liegt wie zu Beginn weiterhin H-Pegel:



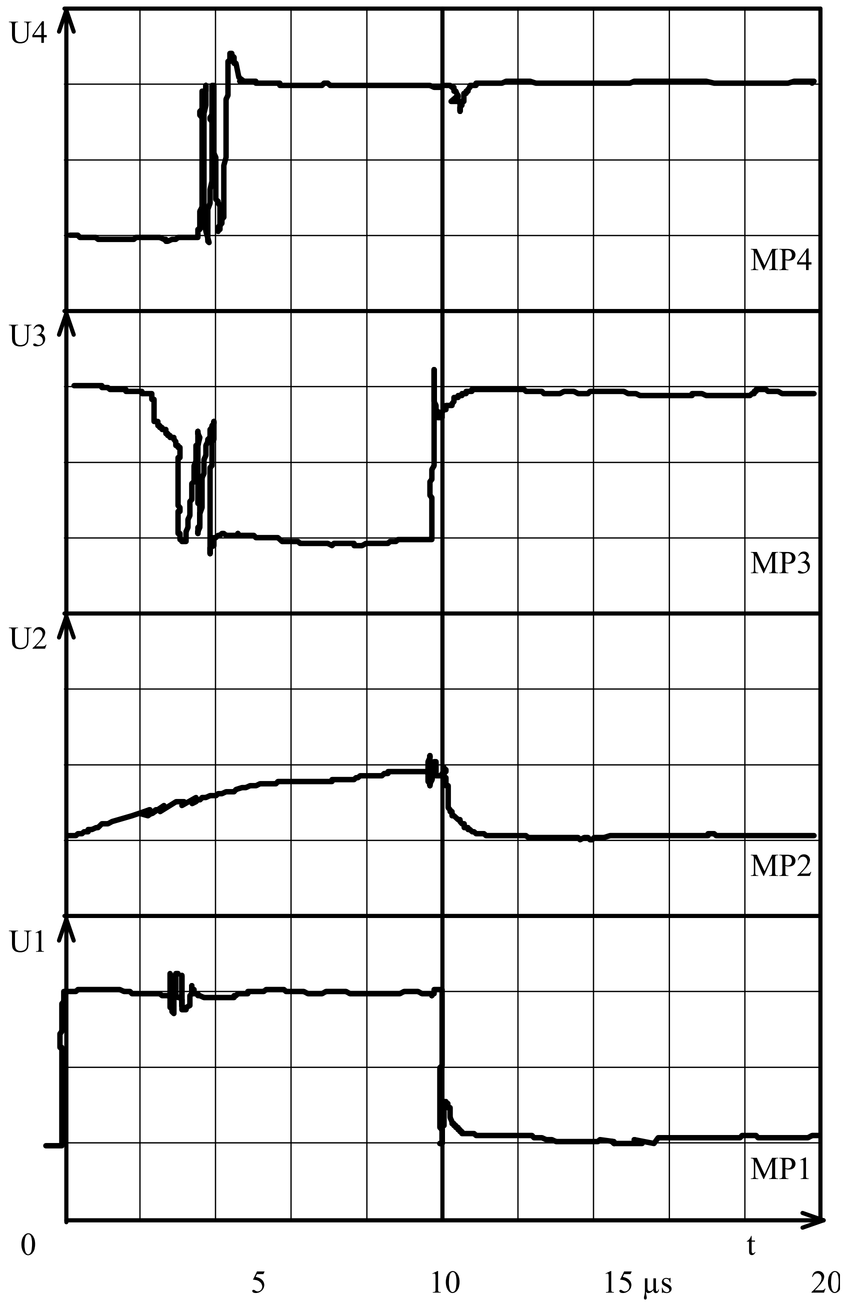

Bei Pegel H handelt es sich also um den stabilen Zustand, und der Zustand bei Pegel L ist instabil. Er wird durch eine L-H-Flanke an E eingestellt und für die Haltezeit $t_H = t^* - t_1$ beibehalten, bevor wieder H-Pegel auftritt.

## *4. Aufgabe:*

Nehmen Sie die Signalverläufe an den Meßpunkten MP1 bis MP4 oszillographisch auf.

### Durchführung:

Um die Signalverläufe aufzunehmen, werden die Pegel an den Meßpunkten an den Eingang des Oszillographen angelegt. Man erhält folgende Darstellungen:




### *5. Aufgabe:*

Nehmen Sie die Abhängigkeit t = f(R) mit C als Parameter auf und stellen Sie sie graphisch dar.

Die gemessenen Werte sind Tabelle 2 zu entnehmen, die sich ebenso wie die graphische Darstellung bei Aufgabe 6 befindet.

### *6. Aufgabe*

Leiten Sie aus den Meßwerten eine Näherungsformel für t = f (R, C) ab.

Wie aus der aufgenommenen Wertetabelle (Tabelle 2) zu ersehen ist, läßt sich eine gewisse Proportionalität zwischen der Zeit t und dem Produkt aus R und C feststellen (t ~ RC). Falls aber R gegen ∞ geht, bleibt die Zeit endlich, d.h. es muß noch ein weiterer Faktor berücksichtigt werden. Die Parallelschaltung zwischen R und den Gattern kann man auch als eine Parallelschaltung von zwei Widerständen betrachten, indem man nur den Innenwiderstand der Gatter, im folgenden $R_\infty$ genannt, betrachtet. Für die Parallelschaltung von zwei Widerständen gilt:

$$R_{gesamt} = \frac{R \cdot R_\infty}{R + R_\infty}$$

Man erhält dann also für t eine Gleichung der Form:

$$t = k \cdot C \cdot \frac{R \cdot R_\infty}{R + R_\infty}$$

mit k als Proportionalitätsfaktor.

Für die Bestimmung einer Näherungsformel empfiehlt es sich, statt k einen Faktor $k' = k \cdot R_\infty$ zu verwenden, so daß die Gleichung jetzt wie folgt lautet:

$$t = k' \cdot C \cdot \frac{R}{R + R_\infty}$$

Nun kann man mit den Angaben aus der Wertetabelle ein oder mehrere Gleichungssysteme aufstellen, indem man die Werte einfach in die obige Formel einsetzt. Wir haben k‘ und $R_\infty$ für jedes C getrennt berechnet und dann den Mittelwert bestimmt. Für das Gleichungssystem haben wir die grau hinterlegten Werte (s.u.) aus der ermittelten Tabelle verwendet, weil dort die Messung genauer erfolgte, und folgende Gleichungen aufgestellt:

1) $0{,}25\ \mu s = k' \cdot 3{,}3\ k\Omega / (3{,}3\ k\Omega + R_\infty) \cdot 1\ nF$
   $0{,}7\ \mu s = k' \cdot 33\ k\Omega / (33\ k\Omega + R_\infty) \cdot 1\ nF$

2) $2{,}8\ \mu s = k' \cdot 3{,}3\ k\Omega / (3{,}3\ k\Omega + R_\infty) \cdot 10\ nF$
   $7{,}2\ \mu s = k' \cdot 33\ k\Omega / (33\ k\Omega + R_\infty) \cdot 10\ nF$

3) $30\ \mu s = k' \cdot 5{,}1\ k\Omega / (5{,}1\ k\Omega + R_\infty) \cdot 100\ nF$
   $75\ \mu s = k' \cdot 33\ k\Omega / (33\ k\Omega + R_\infty) \cdot 100\ nF$

Als Lösungen haben wir erhalten:

1) $R_\infty = 8{,}25\ k\Omega$, $k' = 875\ \Omega$
2) $R_\infty = 6{,}98\ k\Omega$, $k' = 872{,}3\ \Omega$
3) $R_\infty = 12{,}47\ k\Omega$, $k' = 1{,}03\ k\Omega$

und als Mittelwerte: $R_\infty = 9{,}23\ k\Omega$, $k' = 926{,}88\ \Omega$

Damit läßt sich folgende Formel ableiten: $\boxed{t = 926{,}88\ \Omega \cdot RC / (R + 9{,}23\ k\Omega)}$ (1. Formel)

Eine genauere Formel liefert folgendes Verfahren: Wenn R = ∞ ist, läßt sich durch eine Grenzwertbetrachtung k‘ ausrechnen. Damit kann über eine weitere Gleichung $R_\infty$ berechnet werden. Wir haben dazu dieselbe Gleichung wie oben verwendet:

$$t = k' \cdot C \cdot \lim_{R\to\infty} \frac{R}{R + R_\infty} = k' \cdot C \Rightarrow k' = \frac{t}{C}$$

1) $0{,}25\ \mu s = k' \cdot 3{,}3\ k\Omega / (3{,}3\ k\Omega + R_\infty) \cdot 1\ nF$
   $k' = 1{,}1\ \mu s / 1\ nF$

2) $2{,}8\ \mu s = k' \cdot 3{,}3\ k\Omega / (3{,}3\ k\Omega + R_\infty) \cdot 10\ nF$
   $k' = 9{,}2\ \mu s / 10\ nF$

3) $30\ \mu s = k' \cdot 5{,}1\ k\Omega / (5{,}1\ k\Omega + R_\infty) \cdot 100\ nF$
   $k' = 120\ \mu s / 100\ nF$

Hier lauten die Lösungen:

1) $R_\infty = 11{,}22\ k\Omega$, $k' = 1{,}1\ k\Omega$
2) $R_\infty = 7{,}54\ k\Omega$, $k' = 920\ \Omega$
3) $R_\infty = 15{,}3\ k\Omega$, $k' = 1{,}2\ k\Omega$

und als Mittelwerte: $R_\infty = 11{,}35\ k\Omega$, $k' = 1{,}07\ k\Omega$

Daraus läßt sich diese Formel ableiten: $\boxed{t = 1{,}07\ k\Omega \cdot RC / (R + 11{,}35\ k\Omega)}$ (2. Formel)

Da diese Formel die tatsächlichen Werte besser annähert, wird im folgenden nur noch sie betrachtet. In Tabelle 2 sind die gemessenen Werte sowie die Werte der beiden Formeln noch einmal gegenübergestellt, im Diagramm sind jedoch nur die experimentell ermittelte und die nach der 2. Formel berechnete Kurve eingezeichnet.

| | | C in nF | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 nF | | | 10 nF | | | 100 nF | | |
| | T in µs | gemessen | 1. Formel | 2. Formel | Gemessen | 1. Formel | 2. Formel | Gemessen | 1. Formel | 2. Formel |
| R in Ω | 330 | 0,01 | 0,027 | 0,030 | 0,7 | 0,27 | 0,30 | - | 2,7 | 3,0 |
| | 1,1k | 0,02 | 0,084 | 0,095 | 2,4 | 0,84 | 0,95 | 3 | 8,4 | 9,5 |
| | 3,3k | 0,25 | 0,216 | 0,241 | 2,8 | 2,16 | 2,41 | 12 | 21,6 | 24,1 |
| | 5,1k | 0,4 | 0,298 | 0,332 | 3,6 | 2,98 | 3,32 | 30 | 29,8 | 33,2 |
| | 10k | 0,5 | 0,453 | 0,501 | 5,0 | 4,53 | 5,01 | 40 | 45,3 | 50,1 |
| | 33k | 0,7 | 0,725 | 0,796 | 7,2 | 7,25 | 7,96 | 75 | 72,5 | 79,6 |
| | ∞ | 1,1 | 0,982 | 1,07 | 9,2 | 9,82 | 10,7 | 120 | 98,2 | 107 |

**Tabelle 2**

Wie man sieht, stimmen die berechneten Werte recht gut mit den experimentell ermittelten überein. Die Abweichungen kommen vor allem durch die in der Fehlerbetrachtung aufgeführten Fehler zustande.

## Fehlerbetrachtung:

Beim Messen der Haltezeiten sind folgende Fehler aufgetreten:

- Ablesefehler am Oszillographen
- Widerstände der Leitungen nicht berücksichtigt
- Ungenauigkeiten in der Taktfrequenz

Unter Berücksichtigung dieser Fehlerquellen kann man den Versuch durchaus als gelungen betrachten.