

Der bipolare Transistor
Schaltverhalten

Studiengang: KMT
Set: 3.08 Platz: 4
Teilnehmer: Michael Goldbach, Jürgen Döfner

Datum: 09.12.2010

2 VAW

Zielstellung

Vorbereitung: $R_B \downarrow$, Diskussion der Schaltzeiten?

- Untersuchung des Verhaltens eines Bipolartransistors im Schalterbetrieb
- Beurteilung einer Schaltstufe auf Einhaltung der Logikpegel
- Untersuchung der Abhängigkeit der Schaltzeiten für verschiedene Parameter

1. Begriffe und Formelzeichen

Übersteuerung, Schaltzeiten, analoges Signal, binäres Signal, H-Pegel, L-Pegel

2. Versuchsvorbereitung

- 2.1. Wiederholen Sie die Vorlesung 'Bipolare Transistoren', besonders den Abschnitt 'Schaltverhalten'. Machen Sie sich mit den in Punkt 1. genannten Begriffen vertraut.
- 2.2. Erläutern Sie anhand eines geeigneten Kennlinienfeldes für den Bipolartransistor die Unterschiede zwischen dem Betrieb als Kleinsignalverstärker und als Schalter.
- 2.3. Was verstehen Sie in der Digitaltechnik unter H- bzw. L-Pegel? Notieren Sie die Spannungsbereiche, die in der TTL-Technik für diese Pegel definiert sind.
- 2.4. Erläutern Sie das dynamische Verhalten eines Bipolartransistors im Schalterbetrieb. Wodurch wird das Zeitverhalten verursacht?
- 2.5. Die Schaltstufe nach Bild 1 soll für $U_{eH} > 2,4 \text{ V}$ sicher durchgesteuert sein. Um das zu garantieren, soll der Widerstand R_B so dimensioniert werden, daß bereits bei $U_{eH} = 2,0 \text{ V}$ ein Übersteuerungsfaktor von $\bar{U} = 1,5$ erreicht wird. Dimensionieren Sie den Widerstand R_B für eine Stromverstärkung des Transistors von $B = 50$.

3. Versuchsdurchführung und -auswertung

3.1. Ermittlung der Transistorkennwerte

Bauen Sie die Schaltung nach Bild 1 auf. Für R_B wählen Sie den am nächsten liegenden vorhandenen Wert entsprechend Ihrer Berechnung nach Punkt 2.5. Für R_1 wählen Sie das Wendelpotentiometer.

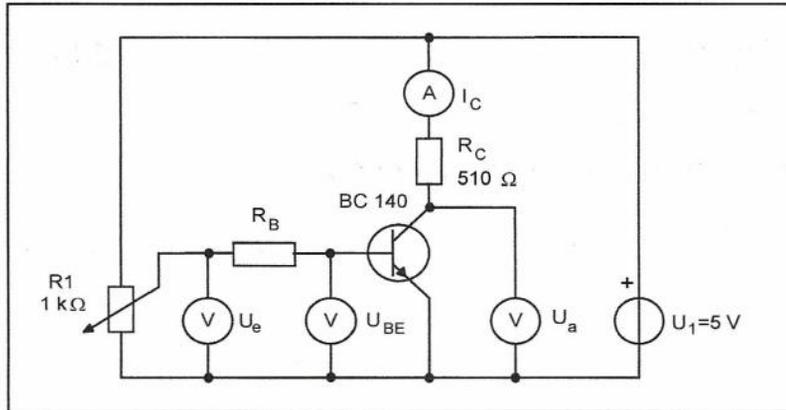


Bild 1: Meßschaltung zum Schaltverhalten des Bipolartransistors

Ermitteln Sie die Stromverstärkung des Transistors bei Erreichen der Sättigung ($U_{CE}=U_{BE}$).

Berechnen Sie den Basiswiderstand mit den ermittelten Transistorkennwerten für einen Übersteuerungsfaktor von $\bar{U}=1,5$ bei einer Eingangsspannung von $U_e=2$ V.

3.2. Ermittlung der Schaltspannungen

Verwenden Sie in der Schaltung nach Bild 1 für den Basiswiderstand die Widerstandsdekade, die Sie auf den Wert entsprechend der Berechnung im Punkt 3.1 einstellen.

Nehmen Sie Meßwerte für die Kennlinien $U_a=f(U_e)$ und $I_C=f(U_e)$ im Bereich $0 \text{ V} \leq U_e \leq 5 \text{ V}$ auf. Im Bereich von $0 \text{ V} \leq U_e \leq 2 \text{ V}$ wählen Sie Schritte von 0,1 V. Stellen Sie die Meßwerte gemeinsam in einem geeigneten Diagramm dar.

Zeichnen Sie in dieses Diagramm die im Punkt 2.3. ermittelten Spannungswerte der TTL-Pegel ein. Weisen Sie nach, daß diese Normwerte von der untersuchten Schaltstufe eingehalten werden. Ermitteln Sie aus dem Diagramm die Eingangsspannungsbereiche, für die die Spannungswerte des logischen H-Pegels und des L-Pegels am Ausgang eingehalten werden. Welche logische Funktion wird von der Schaltstufe realisiert?

Berechnen Sie aus den Meßwerten die Verlustleistung des Transistors als Funktion der Eingangsspannung und tragen Sie den Verlauf in das Diagramm ein. Begründen Sie die Abhängigkeit der mittleren Verlustleistung von der Frequenz der Eingangsspannung.

3.3. Ermittlung der Schaltzeiten

Bauen Sie die Meßschaltung nach Bild 2 auf. Für R_B wählen Sie den in Punkt 3.1. ermittelten Wert. Am Funktionsgenerator stellen Sie eine positive Impulsspannung mit $U_e = 5 V_{SS}$, $f = 1 \text{ kHz}$ und mit einem Tastverhältnis ($TV = t_{\text{ein}} : t_{\text{aus}}$) von 1:1 ein. Berechnen Sie die Übersteuerung für diese Eingangsspannung und tragen Sie den Wert in die untenstehende Tabelle ein.

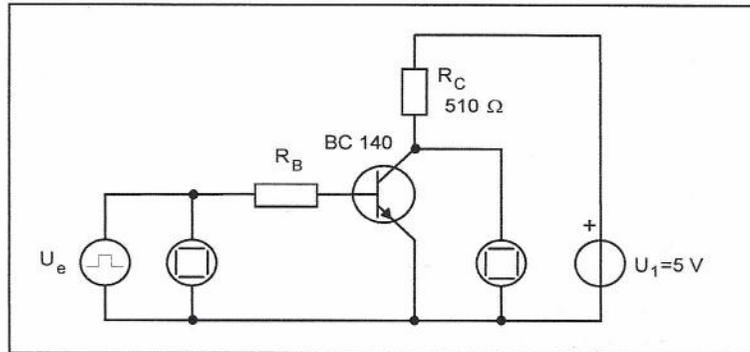


Bild 2: Meßschaltung zur Bestimmung der Schaltzeiten

Messen Sie die Zeiten für das Ein- und Ausschalten des Transistors und tragen Sie die Werte in die Tabelle ein. Plotten Sie die Darstellung zur Ermittlung der Ausschaltzeit und erläutern Sie daran, wie die entsprechenden Zeiten ermittelt werden.

Stellen Sie die Amplitude der Eingangsspannung auf $U_e = 2 V_{SS}$ und messen Sie für diese Eingangsspannung die Zeiten für das Ein- und Ausschalten des Transistors. Führen Sie die Messung für beide Eingangsspannungen nochmals mit einem Kollektorwiderstand von $R_C = 1,8 \text{ k}\Omega$ durch. Berechnen Sie für diesen Kollektorwiderstand und die jeweiligen Eingangsspannungen den Übersteuerungsfaktor.

Stellen Sie alle Meßwerte in der Tabelle zusammen und begründen Sie den Einfluß der entsprechenden Parameter (Eingangsspannung, Kollektorwiderstand) auf die Schaltzeiten.

Einschalten			Ausschalten		
Verzögerungszeit	Anstiegszeit	Einschaltzeit	Speicherzeit	Abfallzeit	Ausschaltzeit
a) $U_e = 5 V_{SS}$, $R_C = 510 \Omega$, $\bar{U} = 4,97 \checkmark$					
50 ns	150 ns	200 ns	5,52 µs	0,95 µs	6,47 µs ✓
b) $U_e = 2 V_{SS}$, $R_C = 510 \Omega$, $\bar{U} = 1,5$					
360 ns	950 ns	1310 ns	1,055 µs	0,905 µs	1,96 µs ✓
c) $U_e = 5 V_{SS}$, $R_C = 1,8 \text{ k}\Omega$, $\bar{U} = 4,88 \checkmark$					
10 ns	90 ns	100 ns	5,67 µs	0,33 µs	6,00 µs ✓
d) $U_e = 2 V_{SS}$, $R_C = 1,8 \text{ k}\Omega$, $\bar{U} = 1,5 \checkmark$					
0,08 µs	0,095 µs	0,175 µs	3,415 µs	0,29 µs	3,705 µs

$$\frac{U_e - U_{BE}}{R_B} = I_{B0}$$

$$\bar{U} = \frac{I_{B0}}{I_{B0}}$$

$$I_{B0} = 70 \mu\text{A}$$

$$\bar{U} = \frac{U_e - U_{BE}}{R_D} = \frac{5 - 0,67}{1,8 \text{ k}\Omega} = 2,405 \text{ V}$$

Tabelle: Zusammenstellung der Meßwerte

$$\bar{U} = \frac{U_e - U_{BE}}{R_B} : I_{B0} = \frac{U_e - U_{BE}}{R_B \cdot I_{B0}} = \frac{5 - 0,67 \text{ V}}{12,67 \text{ k}\Omega \cdot 70 \mu\text{A}}$$

Die maximal mögliche zu übertragende Frequenz berechnet sich unter der Voraussetzung $T_V = t_{\text{ein}} : t_{\text{aus}} = 1 : 1$ aus der längsten Schaltzeit:

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{2 \cdot t_{\text{off}}}$$

/1/

Berechnen Sie diese Frequenz für den Fall mit $U_e = 5 \text{ V}$ und $R_C = 510 \ \Omega$. Setzen Sie den entsprechenden Kollektorwiderstand in die Schaltung ein und stellen Sie die Frequenz der Eingangsspannung auf den berechneten Wert ein. Beschreiben Sie den Verlauf der Ausgangsspannung. Begründen Sie die Form und Amplitude der Ausgangsspannung, wenn die Frequenz der Eingangsspannung um mehr als 10 kHz höher als die berechnete maximale Frequenz ist.

$$t_{\text{off}} = 6,47 \mu\text{s}$$

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{2 \cdot 6,47 \mu\text{s}}$$

$$f_{\text{max}} = 77,284 \text{ kHz}$$

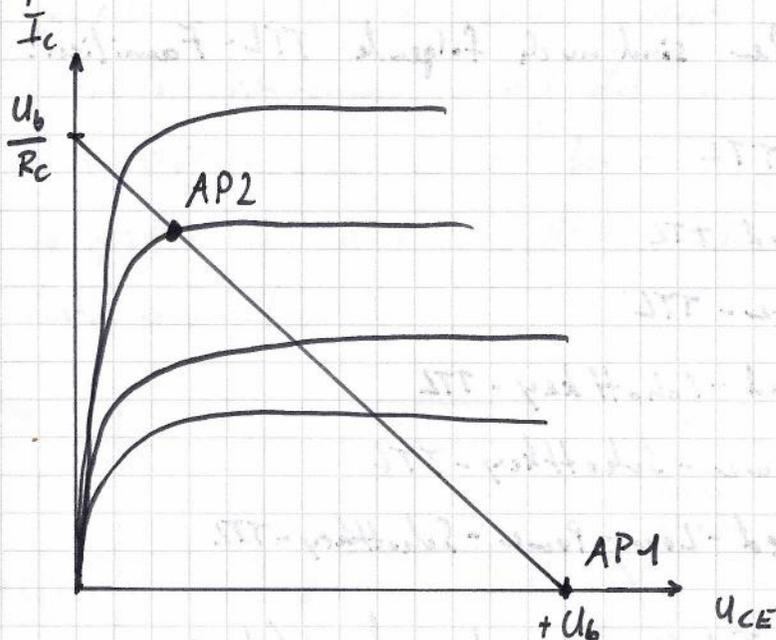
Aufgrund der Ausschaltzeit erreicht die Ausgangsspannung gerade noch das Maximum. Bei Erhöhung der Frequenz um weitere 10 kHz ist dies nicht mehr möglich, da der nächste Einschaltpunkt in den Ausschaltpunkt kommt.

Vorbereitung

2.2.

Im Gegensatz zum Kleinsignalverstärker bei dem der Transistor auf einen Arbeitspunkt (AP) eingestellt wird, wird er im Schalterbetrieb

auf zwei APs eingestellt bzw. arbeitet in zwei Arbeitspunkten. Der erste Arbeitspunkt liegt im gesperrten Bereich, womit die Funktion des geöffneten Schalters realisiert wird. Der zweite AP liegt im Durchlassbereich des Transistors. Hier wird die Funktion des geschlossenen Schalters realisiert.



Kriterien:

AP1: $I_B = 0, I_C = 0, U_{CE} = U_b \rightarrow$ Schalter offen

AP2: $I_B = I_{Bx}, U_{CE} \ll U_{BE} \rightarrow$ Schalter geschlossen

2.3.

Der H-Pegel steht für die binäre 1 und entspricht einem höheren Potential gegenüber dem L-Pegel welcher für eine binäre 0 steht. Für den konkreten Fall der TTL-Technik gelten folgende Potentiale:

L-Pegel: 0V bis 0,8V
H-Pegel: 2V bis 5V } gilt für TTL-Schalt-
kreis eingänge

L-Pegel: 0V bis 0,4V
H-Pegel: 2,4V bis 5V } gilt für TTL-Schalt-
kreis anschlüsse

Die Betriebsspannung für TTL-Schaltkreise liegt bei 5V. ✓

Zu unterscheiden sind noch folgende TTL-Familien:

TTL → Standard-TTL

H-TTL → High Speed TTL

L-TTL → Low-Power-TTL

AS-TTL → Advanced-Schottkey-TTL

LS-TTL → Low-Power-Schottkey-TTL

ALS-TTL → Advanced-Low-Power-Schottkey-TTL

Die folgende Tabelle zeigt typische Werte zu den zuvor genannten TTL-Familien.

Kurzbezeichnung	Betriebsspannung	Leistungsaufnahme	Signalanstiegszeit	typische Schaltfrequenz
TTL	5V	10 mW	10 ns	20 MHz
H-TTL	5V	22 mW	6 ns	30 MHz
L-TTL	5V	1 mW	33 ns	3 MHz
AS-TTL	5V	15 mW	1.7 ns	150 MHz
LS-TTL	5V	2 mW	9.5 ns	40 MHz
ALS-TTL	5V	1 mW	4 ns	40 MHz

2.4.

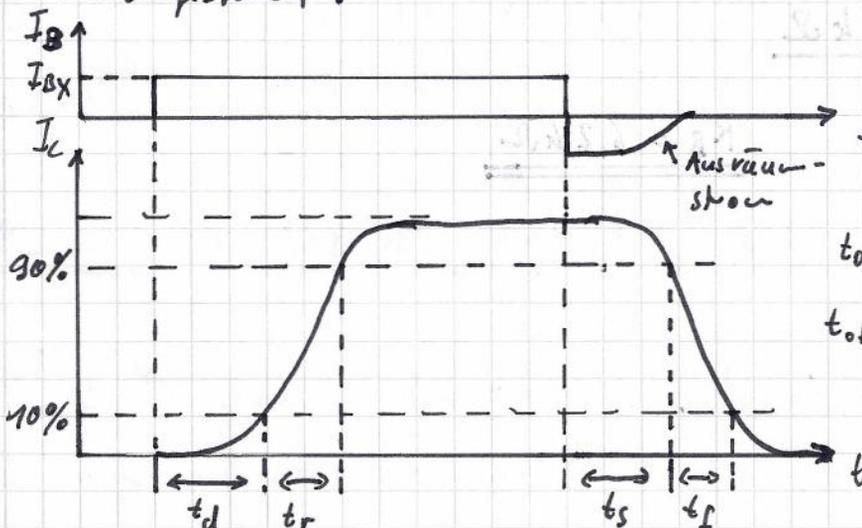
Das Zeitverhalten eines bipolaren Transistors im Schaltbetrieb wird vom Ausruhmstrom $I_{Bx} = \frac{U_{BE} - U_e}{R_D}$ bestimmt. Festgemacht wird das zeitliche

Verhalten dabei am Ausruhmfaktor $q = \frac{I_{Bx}}{I_{B0}}$.

Je größer q desto schneller geht der Transistor in den gesperrten Bereich über. In

Durchlassrichtung wird das zeitliche Verhalten vom Übersteuerungsfaktor $\beta_m = \beta_i = \frac{I_{Bx}}{I_{B0}}$ bestimmt.

Je größer β_i desto schneller ist der Transistor durchgesteuert.



$$t_{on} = t_d + t_r \rightarrow \text{Einschaltzeit}$$

$$t_{off} = t_s + t_f \rightarrow \text{Ausschaltzeit}$$

t_d - delay time

t_s - storage time

t_r - rise time

t_f - fall off time

2.5

geg:

$$U_{eH} = 2,0V$$

$$U_1 = 5V$$

$$u = \ddot{u} = 1,5$$

$$B = 50$$

$$R_c = 510\Omega$$

ges:

R_B

Lsg:

$$U_{CE} \ll U_{BE} \rightarrow 0 \rightsquigarrow U_c = U_1 \rightsquigarrow I_c = \frac{U_1}{R_c}$$

$$I_c = \frac{5V}{510\Omega} \approx \underline{10\mu A}$$

$$B = \frac{I_c}{I_B} \rightsquigarrow I_{B0} = \frac{I_c}{B} = \frac{10\mu A}{50} = \underline{0,2\mu A}$$

$$I_{Bx} = \ddot{u} \cdot I_{B0} = 1,5 \cdot 0,2\mu A = \underline{0,3\mu A}$$

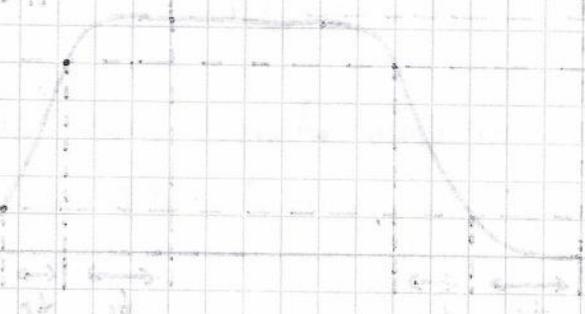
$$R_D = \frac{U_{eH}}{I_{Bx}} = \frac{2,0V}{0,3\mu A}$$

$$\frac{U_{eH} - U_{BE}}{0,3\mu A} = \frac{2V - 0,7V}{0,3\mu A}$$

$$\underline{R_B = 6,6\text{ k}\Omega}$$

nach E24:

$$\underline{\underline{R_B = 6,2\text{ k}\Omega}}$$



3.1. $U_a = U_{ce} = U_{be} = 0,67 V$

$R_B = 10 k\Omega$

$I_c = 8,35 mA$

$U_e = 1,37 V$

$I_B = \frac{U_e - U_{be}}{R_B} = 70 \mu A$

$\beta = \frac{I_c}{I_B} = 119,29$ ✓

$R_B = \frac{U_e - U_{be}}{i + I_B} = 12,67 k\Omega$ ✓

$U_e = 2V$
 $i = 1,5$

3.2. $P_v = U_{ce} \cdot I_c = U_a \cdot I_c$

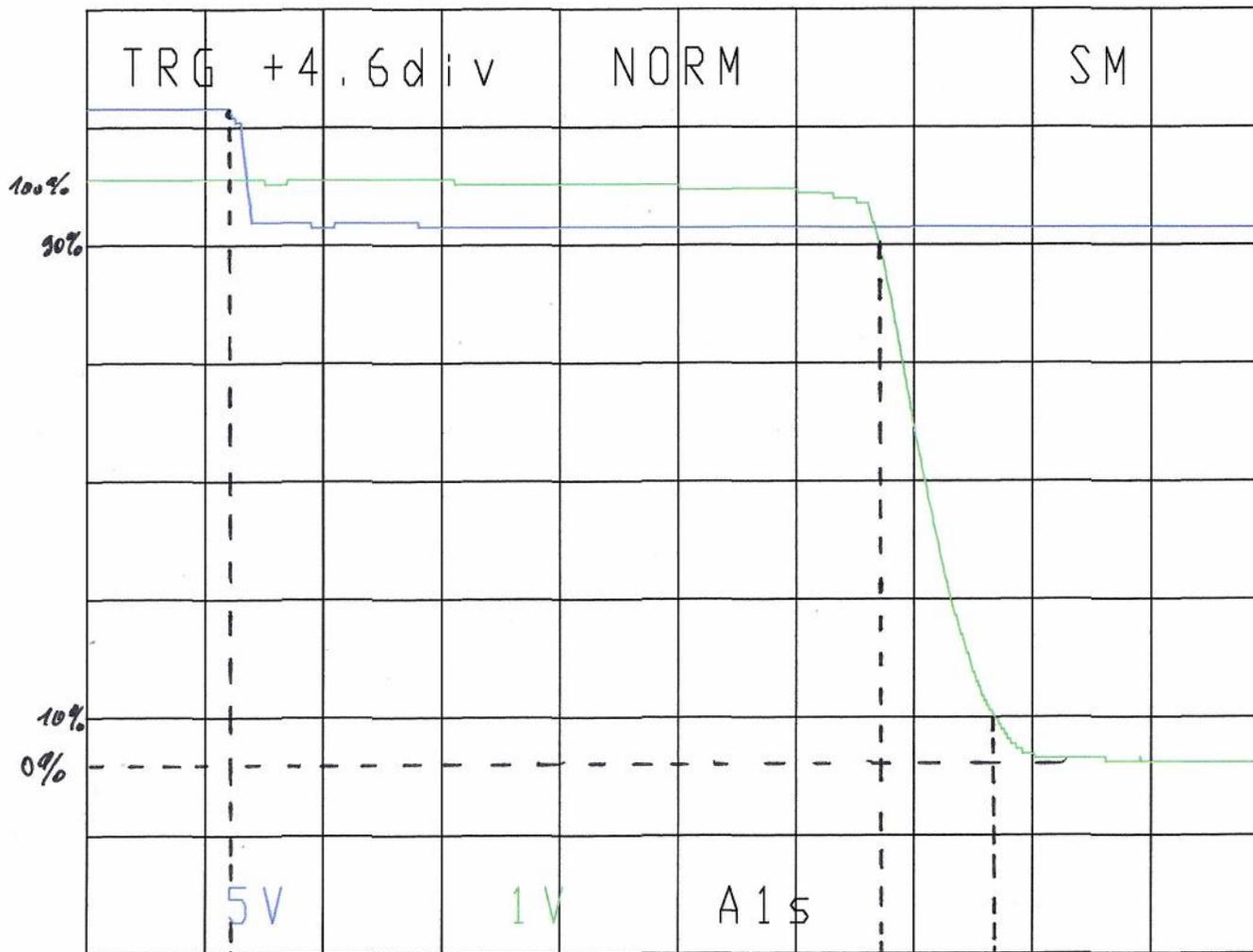
U_e in V	0V	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	
U_a in V	5V	5	5	5	5	5	4,92	4,67	
I_c in mA	0 mA	0	0	0	0	0,01	0,15	0,65	
P in mW	0	0	0	0	0	0,05	0,738	2,94	
U_e in V	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	
U_a in V	4,31	3,88	3,43	2,95	2,44	1,92	1,42	0,90	
I_c in mA	1,34	2,17	3,04	3,97	4,94	5,94	6,92	7,90	
P in mW	5,78	8,42	10,43	11,71	12,05	11,40	9,83	7,11	
U_e in V	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
U_a in V	0,40	0,17	0,14	0,12	0,11	0,08	0,07	0,05	0,04
I_c in mA	8,86	9,31	9,38	9,42	9,44	9,50	9,52	9,56	9,57
P in mW	3,54	1,58	1,31	1,13	1,04	0,76	0,67	0,48	0,38

Die im Diagramm mit — gekennzeichnete Linie schneidet die nicht definierten Bereiche nicht so Normwerte werden eingehalten. ✓ Es handelt sich um eine Invertierung. ✓

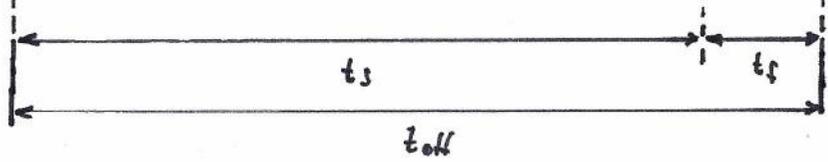
Bei L-Pegel an Eingang liegt am Ausgang eine Spannung zw. 4,3 - 5V am (H-Pegel)

Bei H-Pegel an Eingang liegt am Ausgang eine Spannung zw. 0,0 - 0,11V am (L-Pegel) ✓

3.3. Ausschaltzeit bei $U_e = 5V_{SS}$ und $R_c = 510\Omega$



blau $\hat{=}$ l_0
grün $\hat{=}$ l_1



t_{off} \rightarrow Ausschaltzeit
 t_s \rightarrow storage time (Speicherzeit)
 t_f \rightarrow fall off time (Abfallzeit)