

Praktikum Elektronische Bauelemente

Versuch 7 - Schaltverhalten von Dioden und Transistoren -

I Vorbereitung

1. Zeitliche Spannungs- und Stromverläufe an einer Diode - dargestellt mittels eines vereinfachten Ersatzschaltbildes

a) Einschaltvorgang:

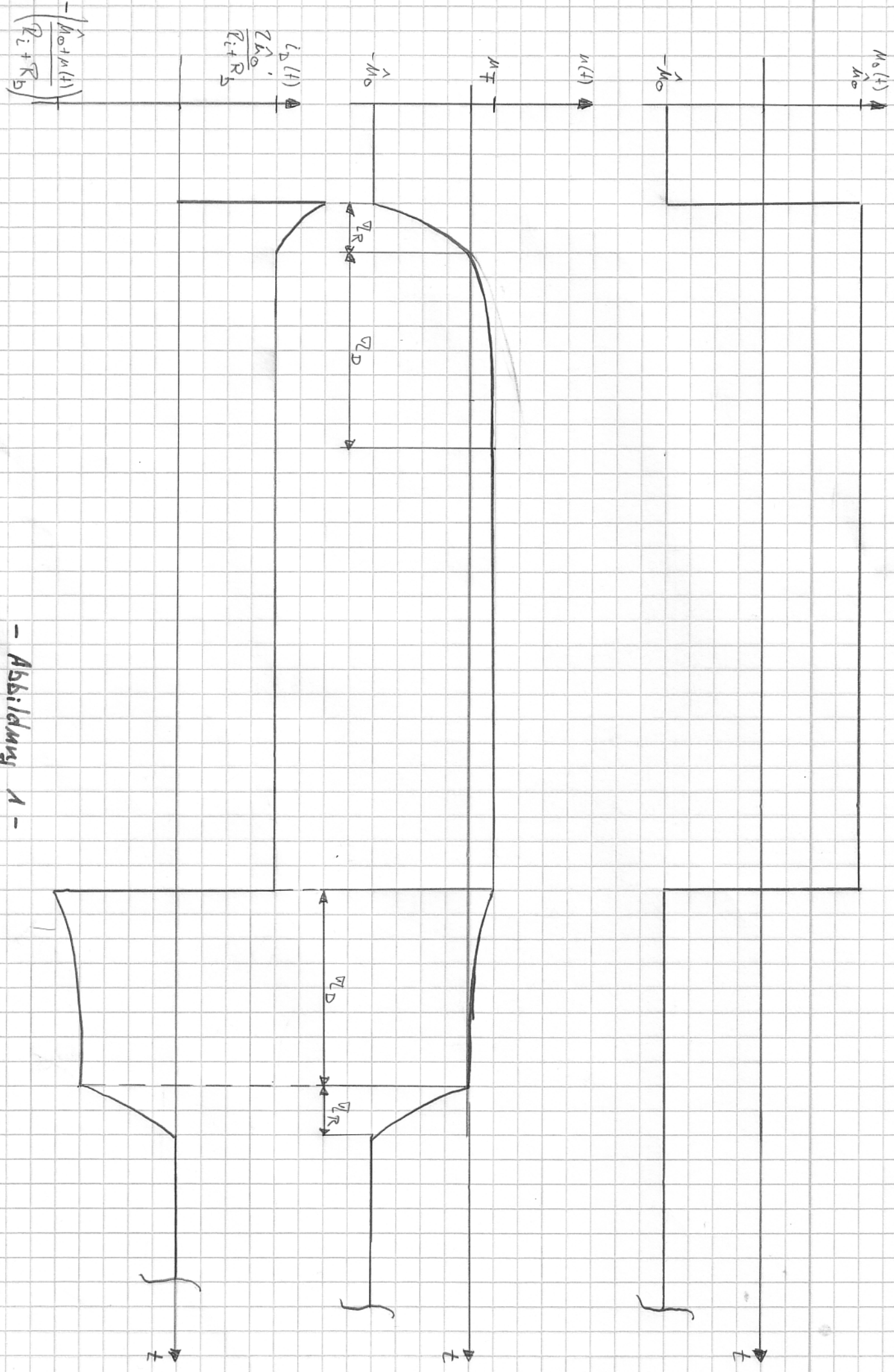
Steigt die Rechteckspannung $u_0(t)$ von $-\hat{u}_0$ auf $+\hat{u}_0$ an, so entlädt sich die Sperrschichtkapazität C_R während der Zeitdauer $\tau_R = (R_i + R_D) C_R$. Dies ist im Spannungsverlauf $u(t)$ zu beobachten.

Aufgrund des Aufladens der Diffusionskapazität C_D tritt im zeitlichen Verlauf des Stromes $i_D(t)$ eine Stromspitze auf. Während der Zeit $\tau_D = (R_i + R_D) C_D$ (Aufladevorgang der Diffusionskapazität) steigt die Spannung $u(t)$ an der Diode auf ihren statischen Endwert U_F . U_F ist dabei die Flussspannung der Diode. Der Strom wiederum erreicht nach τ_R seinen statischen Endwert von $(2\hat{u}_0) / (R_i + R_D)$.

b) Ausschaltvorgang:

Geht die Leuchte Spannung $u_0(t)$ wieder von $+\hat{u}_0$ auf $-\hat{u}_0$ zurück, so fließt der Strom zunächst zurück. Er erreicht dabei den Endwert von $-\frac{(\hat{u}_0 + u(t))}{R_i + R_D}$. Während der Zeitdauer τ_D entlädt sich die Diffusionskapazität. Dabei geht die Spannung an der Diode $u(t)$ von U_F auf 0V zurück. Der Strom nimmt dabei geringfügig zu, und erreicht den Wert $-(2\hat{u}_0)/(R_i + R_D)$. Ist die Diffusionskapazität entladen, so wird die Sperrschichtkapazität C_R geladen. Dies geschieht während der Zeitdauer $\tau_R = (R_i + R_D)C_R$. Der Strom geht dabei wieder auf 0A zurück. Die Spannung $u(t)$ erreicht wieder die Sperrspannung der Diode (hier: $-\hat{u}_0$).

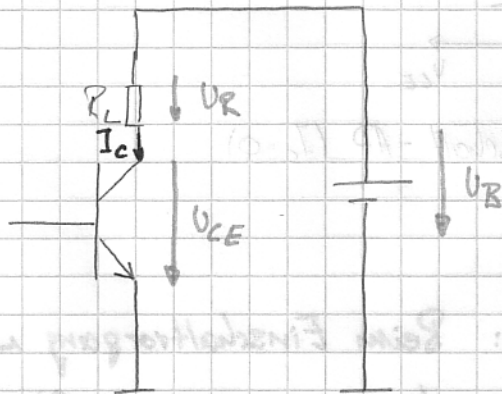
Zeitliche Verläufe: siehe Abbildung 1



- Abbildung 1 -

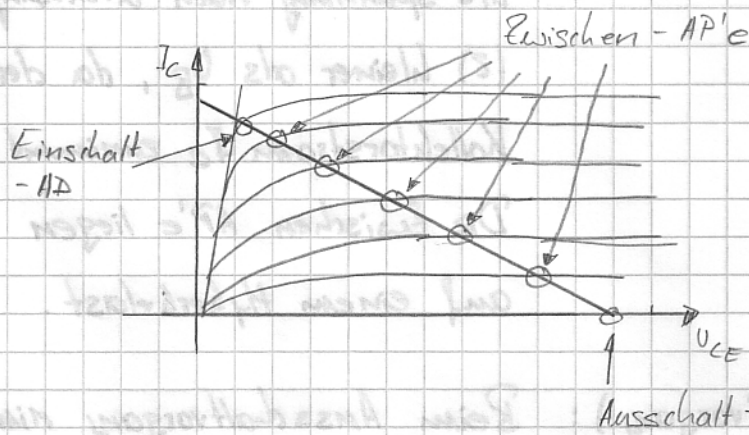
2. Schaltverhalten von Bipolartransistoren

a) Ohmscher Last



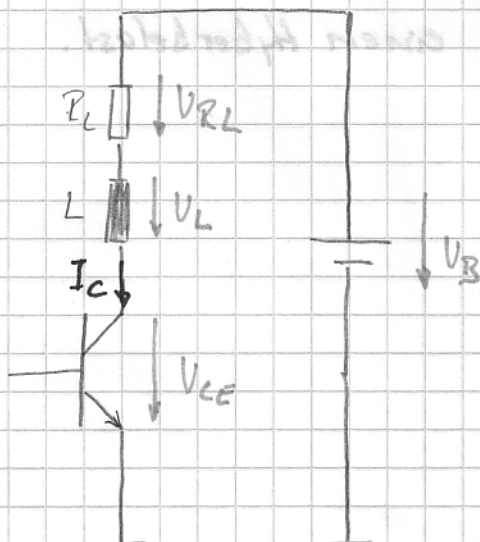
$$\text{KVL: } U_R + U_{CE} - U_B = 0$$

$$U_{CE} = U_B - U_R = U_B - I_C \cdot R_L$$



Beim Ein- und Ausschaltvorgang durchlaufen die Zwischen-AP'e die Gerade $I_C = \frac{-U_{CE} + U_B}{R_L}$.

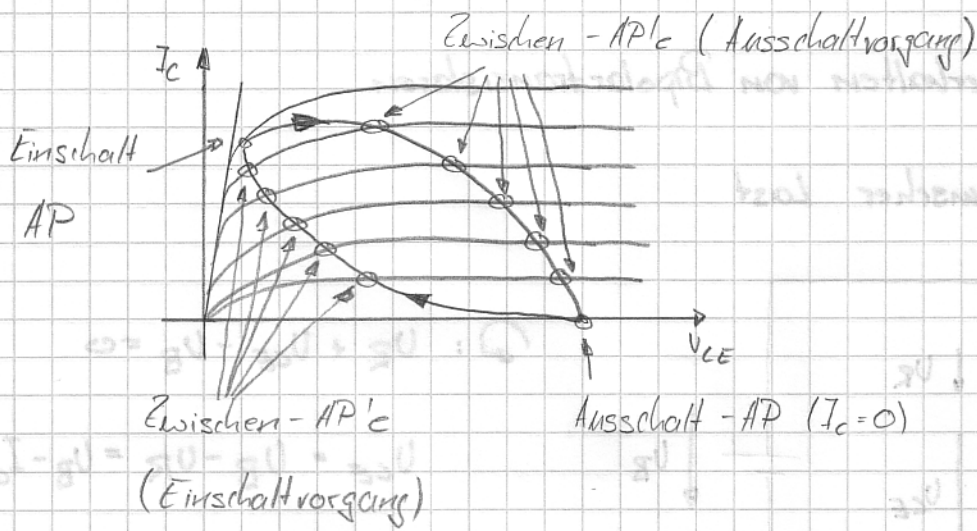
b) Induktive Last



$$\text{KVL: } -U_B + U_{RL} + U_L + U_{CE} = 0$$

$$U_{CE} = U_B - U_{RL} - U_L$$

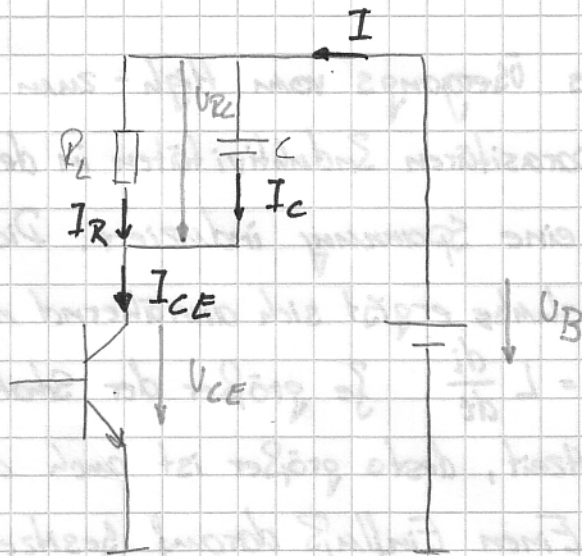
$$U_{CE} = U_B - I_C \cdot R_L - L \frac{dI_C(t)}{dt}$$



Fall 1 (Einschaltvorgang): Beim Einschaltvorgang wird die Spannung nach Gleichung (2) kleiner als U_B , da der Kollektorstrom I_c zunimmt. Die Zwischen-AP'e liegen auf einem Hyperbelast.

Fall 2 (Ausschaltvorgang): Beim Ausschaltvorgang nimmt die Spannung U_{ce} nach Gleichung (2) zu und erreicht am Ausschalt-AP ($I_c = 0$) ihren Endwert U_B . Die Zwischen-AP'e durchlaufen einen Hyperbelast.

c) Kapazitive Last



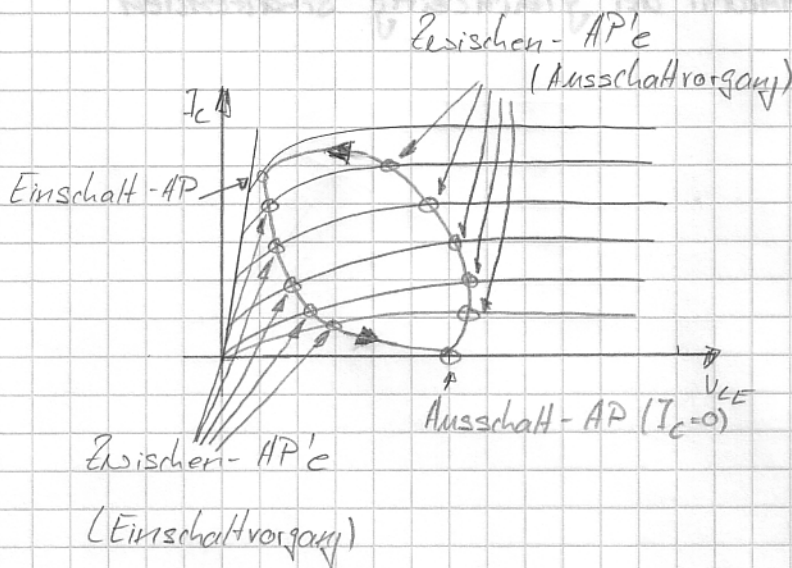
$$\text{KNP: } I_{CE} = I_R + I_C =$$

$$= U_{CE} \cdot R_L + C \frac{dU_{CE}}{dt}$$

$$\text{KVL: } -U_B + U_{CE} + U_{CE} = 0$$

$$U_{CE} = U_B - U_{CE}$$

$$\Rightarrow I_{CE} = (U_B - U_{CE}) R_L + C \frac{d(U_B - U_{CE})}{dt}$$



Rein ohm'sche Last: $I_C = \frac{-U_{CE} + U_B}{R_L}$

Fall 1 (Einschaltvorgang): Bei rein ohm'scher Last bewegen sich die Zwischen-AP'e auf einer Geraden mit der Steigung R_L .
Bei ohmsch-kapazitiver Last bewegen sie sich auf einem Hyperbelast.

Fall 2 (Ausschaltvorgang): Bei ohmscher Last liegen die Zwischen-AP'e auf einer Geraden, bei kapazitiver auf einem Hyperbelast.

3. Ground - Bouncing Effekt

Es wird während des Übergangs vom High- zum Low-Pegel aufgrund von parasitären Induktivitäten in der „Masse-Verbindung“ eine Spannung induziert. Die Größe des Spannungslumps ergibt sich annähernd nach der Gleichung: $U_{\text{Ind}} = L \frac{di}{dt}$. Je größer der Schaltstrom und je kürzer die Schaltzeit, desto größer ist auch die induzierte Spannung. Einen Einfluß darauf besitzen auch noch die Anzahl der gleichzeitig schaltenden Ausgänge.

II Durchführung

1. Das Schaltverhalten der Si-Leistungsdiode BYX88-500

Es wurde ein Versuchsaufbau nach Bild 5 der Aufgabenstellung (Meßschaltung EB 15) realisiert.

Dabei wurde die Spannung u_D und der Strom i_D oszilloskopiert. Der Rechteckgenerator lieferte eine Frequenz von $f_0 = 25 \text{ kHz}$.

Unter Konstanthaltung von I_{RM} wurde die Ausgangsspannung des Rechteckgenerators so verändert, dass sich unterschiedliche Werte für I_{Tmax} einstellen.

Die Ergebnisse hierzu sind in den Abbildungen 2-4 zu sehen.

Die Auswertung der Ausdrücke ergab folgende Meßergebnisse:

I_{Tmax}	t_{on}	t_{rr}
50 mA	4,24 μs	5,41 μs
100 mA	4,84 μs	7,16 μs
150 mA	2,35 μs	9,88 μs

Eine graphische Auswertung hierzu ist in Abbildung 5 zu finden.

2. Das Schaltverhalten eines Ge-NF-Transistors

Nach Messschaltung EB 16 (Bild 8 der Aufgabenstellung)

wurde das Schaltverhalten eines Ge-NF-Transistors

aufgenommen. Dazu wurden die Spannungsverläufe

U_{zL} und U_{qB} oszilloskopiert. Hieraus lassen sich

die Werte der Ströme $i_c = \frac{U_{zL}}{Z_L}$ und $i_B = \frac{U_{qB}}{200\Omega}$

errechnen. Der Rechteckgenerator lieferte eine

Frequenz von $f_0 = 25 \text{ kHz}$.

Bei der Messung wurde I_{RM} auf konstant 57 mA

gehalten. Konstant blieb ebenfalls der Strom $I_{CM} = 6,2 \text{ mA}$.

Verändert wurde der Strom I_{BP} im Intervall

$$5 \text{ mA} \leq I_{BP} \leq 50 \text{ mA}.$$

Dies ergab folgende Meßergebnisse (siehe Abbildungen 6 - 17):

I_{BP}	T_d	T_r	T_{on}	T_s	T_f	T_{off}
17,6 mA	200 ns	440 ns	660 ns	410 ns	410 ns	880 ns
20,6 mA	235 ns	470 ns	706 ns	471 ns	235 ns	941 ns
55,2 mA	176 ns	341 ns	518 ns	706 ns	353 ns	941 ns
79,4 mA	153 ns	255 ns	418 ns	765 ns	421 ns	1176 ns
95,6 mA	164 ns	235 ns	400 ns	882 ns	234 ns	1118 ns
205 mA	76 ns	28 ns	294 ns	1650 ns	736 ns	2350 ns

Diese Meßwerte wurden wie folgt dargestellt:

$$t_d, t_r, t_{on} = f(I_{BP}) \rightarrow \text{Abbildung 18}$$

$$t_s, t_f, t_{off} = f(I_{BP}) \rightarrow \text{Abbildung 19}$$

3. Schaltzeitverkürzung mittels Klemmdiode

Zwischen den Klemmen B und C der Meßschaltung EB 16 wurde eine Diode geschaltet. Die Diode befand sich somit zwischen dem Kollektor und der Basis des Transistors. Es wurden wiederum die Spannungsverläufe u_{AB} und u_L oszilloskopiert. Diese Spannungsverläufe lassen wiederum Rückschlüsse auf die Stromverläufe i_B und i_C wie in 2. zu.

Abbildung 20 zeigt das Schaltverhalten des Ge-NF-Transistors ohne Diode.

Hieraus ergeben sich folgende Schaltzeiten:

$$t_f = 188 \text{ ns} \quad (\text{Fall-Time} \rightarrow 0,3 \cdot I_{RM} \rightarrow 0,1 \cdot I_{RM})$$

$$t_{rr} = 188 \text{ ns} \quad (\text{Sperrverzugszeit})$$

Abbildung 21 zeigt das Schaltverhalten mit Klemmdiode.

Hieraus ergeben sich folgende Schaltzeiten:

$$t_f = 153 \text{ ns}$$

$$t_{rr} = 153 \text{ ns}$$

Es ist zu erkennen, dass der Transistor mit Klemmdiode schneller schaltet.

4. Übergänge zwischen Ausschalt- und Einschalt-AP

Nach Bild 9 der Aufgabenstellung (Meßschaltung EB 16) wurden die Übergänge zwischen Aus- und Einschalt-AP's gemessen. Dazu wurde eine Präzessionsspannung mit der Frequenz $f_0 = 10$ kHz an die Schaltung gelegt.

Im x-y-Modus des Oszilloskop ergaben sich folgende Schirmbilder:

Abbildung 22: Übergang zwischen Aus- und Einschalt-AP mit rein ohmscher Last

Abbildung 23: Übergang zwischen Aus- und Einschalt-AP mit ohmsch-induktiver Last

Abbildung 24: Übergang zwischen Aus- und Einschalt-AP mit ohmsch-kapazitiver Last

5. Ground-Bouncing Effekt

Mittels Meßschaltung EB 10 (Bild 10 der Aufgabenstellung) wurde der Ground-Bouncing Effekt bei dem High-speed-CMOS Baustein 74HC240 und dem BiCMOS Baustein 74ABT240 nachgewiesen.

Abbildung 25 zeigt den Ground-Bouncing Effekt beim High-speed-CMOS Baustein ohne Last an Ausgang 10, während Abbildung 26 den Effekt mit Last zeigt.

In Abbildung 27 ist der Effekt beim BiCMOS Baustein ohne Last und in Abbildung 28 mit Last zu sehen.

III Auswertung

1. In der Vorbereitung wurde ein idealisiertes Modell der Diode benutzt. Vermessen wurde jedoch eine reale Diode. Desweiteren wurden beim Modell aus der Vorbereitung die parasitären Effekte der Leitungen (Induktivitäten, Kapazitäten) und die Spannungsabhängigkeit der Sperrschicht- / Diffusionskapazitäten außer Acht gelassen. Außerdem wurde im Modell eine unendliche Föhnensteilheit des Rechteckgenerators angenommen. Aus diesen Gründen stimmen die zeitlichen Verläufe nicht genau überein.
3. Mit einer kapazitiven Last verhängen sich die Schaltzeiten des Transistors. Dabei wird jedoch der Kollektorstrom größer. Außerdem treten größere Stromspitzen beim Kollektorstrom auf. Mit einer induktiven Last wiederum verringern sich die Stromspitzen, da die Kapazitäten des Transistors kompensiert werden. Der Kollektorstrom wird jedoch ebenfalls größer, was eine Schaltzeitverlängerung in diesem Fall zur Folge hat.
5. Es wird nicht die korrekte Induktivität zur „Masse“ erfasst, da sich in der Verdrahtung zum Pin parasitäre Effekte (Leitungskapazitäten, -induktivitäten, -widerstand) finden.

IV Simulation mit PSpice (Versuch 1A)

1. Simulation der Meßschaltung EB 16

In PSpice wurde die Meßschaltung EB 16 simuliert. Dem wurden die Modellparameter in soweit angepasst, dass das Simulationsergebnis annähernd mit dem Meßergebnis übereinstimmte.

Abbildung 29 & 30: Rein ohmsche Last

Abbildung 31 & 32: Ohmsch- / Induktive Last

Abbildung 33 & 34: Ohmsch- / Kapazitive Last

Abbildung 35 & 36: Schaltzeitverkürzung mittels Klemmdiode

2. Simulation des Ground-Bouncing Effekts

Abbildung 37 zeigt eine Schaltung, mit der der Ground-Bouncing Effekt simuliert werden kann. Das Simulationsergebnis ist in Abbildung 38 festgehalten.