

# Übung 6 – Elektronische Schaltungen (ES)

Sommersemester 2020

## Schmitt-Trigger, MOS-Schaltkreise

INSTITUT FÜR HOCHFREQUENZTECHNIK UND ELEKTRONIK



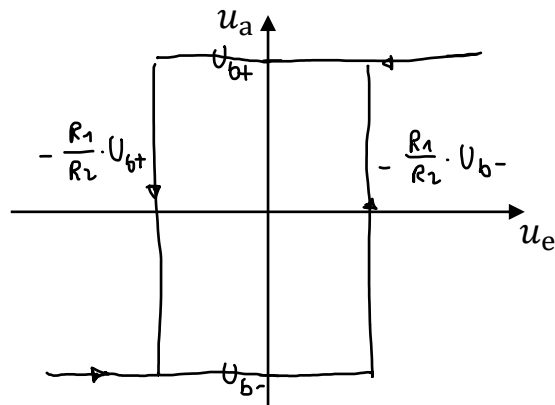
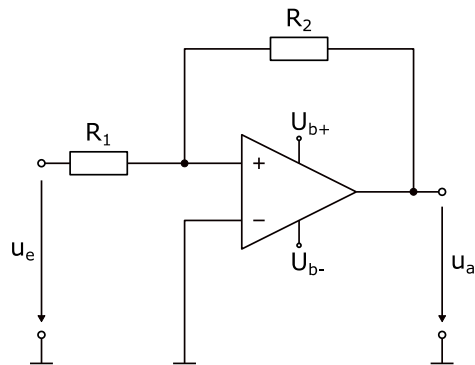
# Schmitt-Trigger

- Ausgangspegel: wohl definiert, d.h. HIGH oder LOW
- Schaltpunkt:  $U_D = 0V$
- Übertragungskennlinie: Hysterese, d.h. Ausgangsgröße hängt nicht nur von der Eingangsgröße ab, sondern auch vom vorherigen Zustand der Ausgangsgröße

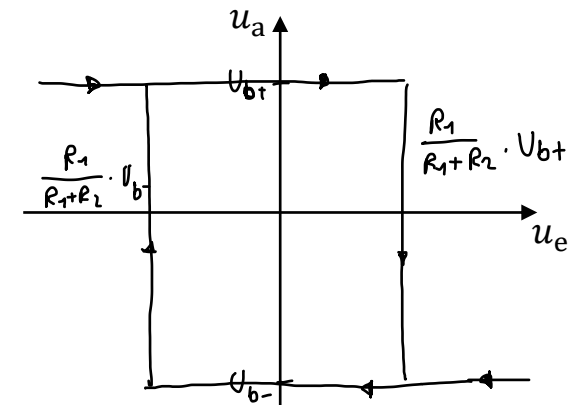
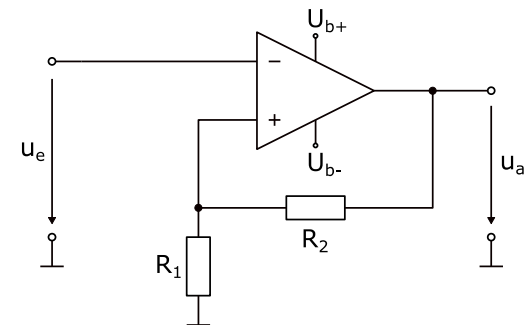
# Schmitt-Trigger – Operationsverstärker

## ■ Kopplungsart: Mitkopplung

### ■ Nicht-invertierender Schmitt-Trigger

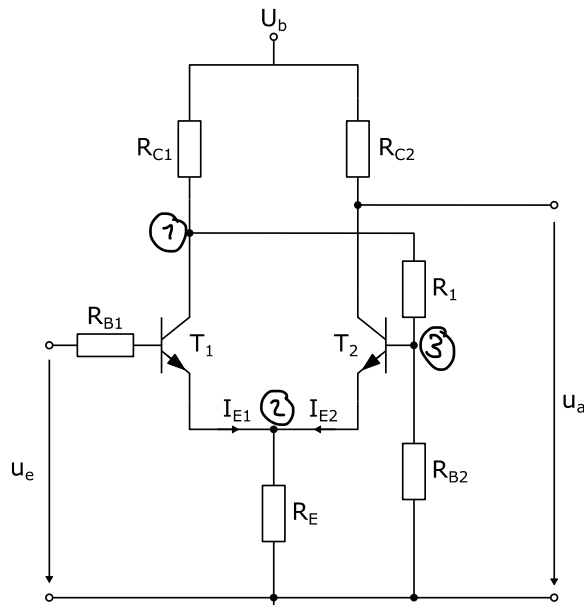


### ■ Invertierender Schmitt-Trigger



# Aufgabe 1

- a) ges.:  $u_e = 0 \rightarrow T_1, T_2 ?$ ;  $T_1$  leitet  $\rightarrow T_2 ?$



1)  $T_1$  sperrt

$$U_{RB2} = U_b \cdot \frac{R_{B2}}{R_{C1} + R_1 + R_{B2}} = 5,1 \text{ V} > 0,7 \text{ V}$$

$\rightarrow T_2$  leitet

2)  $T_1$  leitet

$T_2$  sperrt, da  $U_{32} < 0,7 \text{ V}$

$$\begin{aligned} R_{C1} &= 9 \text{ k}\Omega \\ R_{C2} &= 3 \text{ k}\Omega \\ R_E &= 1 \text{ k}\Omega \\ R_1 &= 30 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= 39 \text{ k}\Omega \\ R_{B2} &= 20 \text{ k}\Omega \\ U_b &= +15 \text{ V} \end{aligned}$$

### Annahmen:

$$T \text{ ein: } U_{CE} = 0,2 \text{ V}$$

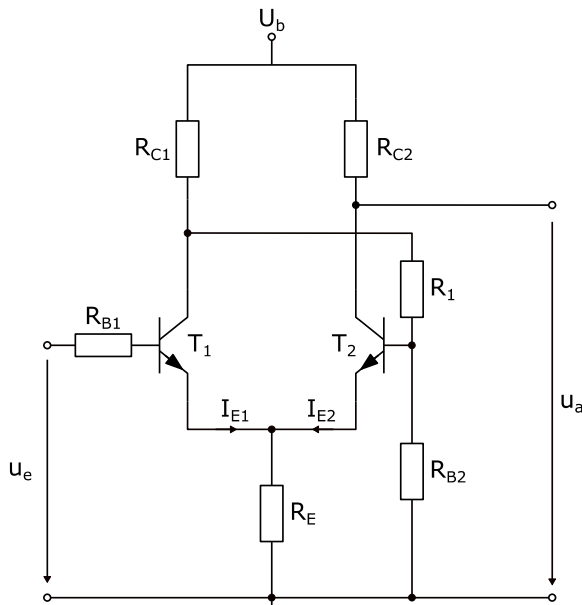
$$T \text{ aus: } I_C = 0$$

$$\text{Schaltvorgang: } U_{BE} = 0,7 \text{ V}$$

$$I_B = 0$$

# Aufgabe 1

## ■ b) ges.: Schaltschwellen



1)  $u_{e, \text{ein}}$ : vorherige Zustand:  $T_1$  sperrt,  $T_2$  leitet

$$\begin{aligned}
 u_{e, \text{ein}} &= u_{BE,1} + u_{RE} \\
 &= 0,7\text{V} + 3,7\text{mA} \cdot 1\text{k}\Omega \\
 &= 4,4\text{V}
 \end{aligned}
 \quad
 \left[
 \begin{aligned}
 u_{RE} &= I_{E2} \cdot R_E \\
 I_{E2} = I_{C2} &= \frac{U_b - U_{CE,2}}{R_E + R_{C2}} = 3,7\text{mA}
 \end{aligned}
 \right.$$

2)  $u_{e, \text{aus}}$ : vorherige Zustand:  $T_1$  leitet,  $T_2$  sperrt

$$\begin{aligned}
 u_{e, \text{ein}} &= u_{BE,1} + u_{RE} \\
 &= 0,7\text{V} + 1,48\text{mA} \cdot 1\text{k}\Omega \\
 &= 2,18\text{V}
 \end{aligned}
 \quad
 \left[
 \begin{aligned}
 u_{RE} &= I_{E1} \cdot R_E \\
 I_{E1} = I_{C1} &= \frac{U_b - U_{CE,1}}{R_E + R_{C1}} = 1,48\text{mA}
 \end{aligned}
 \right.$$

$$\begin{aligned}
 R_{C1} &= 9\text{ k}\Omega \\
 R_{C2} &= 3\text{ k}\Omega \\
 R_E &= 1\text{ k}\Omega \\
 R_1 &= 30\text{ k}\Omega \\
 R_2 &= 39\text{ k}\Omega \\
 R_{B2} &= 20\text{ k}\Omega \\
 U_b &= +15\text{ V}
 \end{aligned}$$

### Annahmen:

$$T \text{ ein: } U_{CE} = 0,2\text{ V}$$

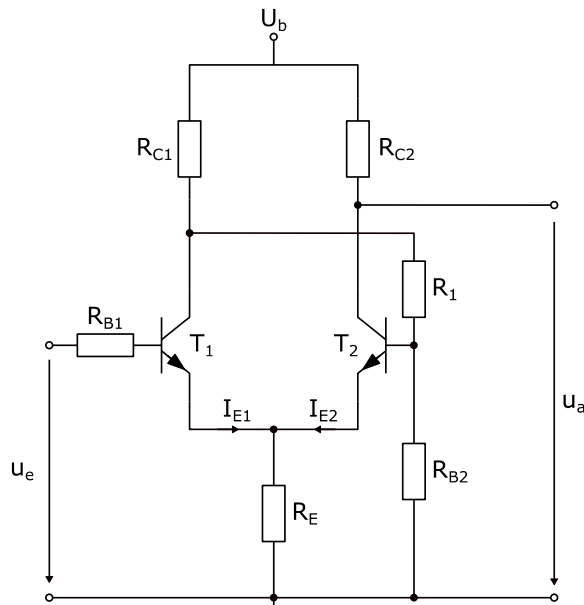
$$T \text{ aus: } I_C = 0$$

$$\text{Schaltvorgang: } U_{BE} = 0,7\text{ V}$$

$$I_B = 0$$

# Aufgabe 1

■ c) ges.:  $u_{a,\min}$ ,  $u_{a,\max}$



$T_1$  sperrt &  $T_2$  leitet

$$u_a = u_{CE12} + I_{E2} \cdot R_E = 0,2\text{V} + 3,7\text{mA} \cdot 1\text{k}\Omega$$

$$= 3,9\text{V} = u_{a,\min}$$

$T_1$  leitet &  $T_2$  sperrt

$$u_a = U_b = 15\text{V} = u_{a,\max}$$

$$R_{C1} = 9\text{ k}\Omega$$

$$R_{C2} = 3\text{ k}\Omega$$

$$R_E = 1\text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 30\text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 39\text{ k}\Omega$$

$$R_{B2} = 20\text{ k}\Omega$$

$$U_b = +15\text{ V}$$

Annahmen:

T ein:  $U_{CE} = 0,2\text{ V}$

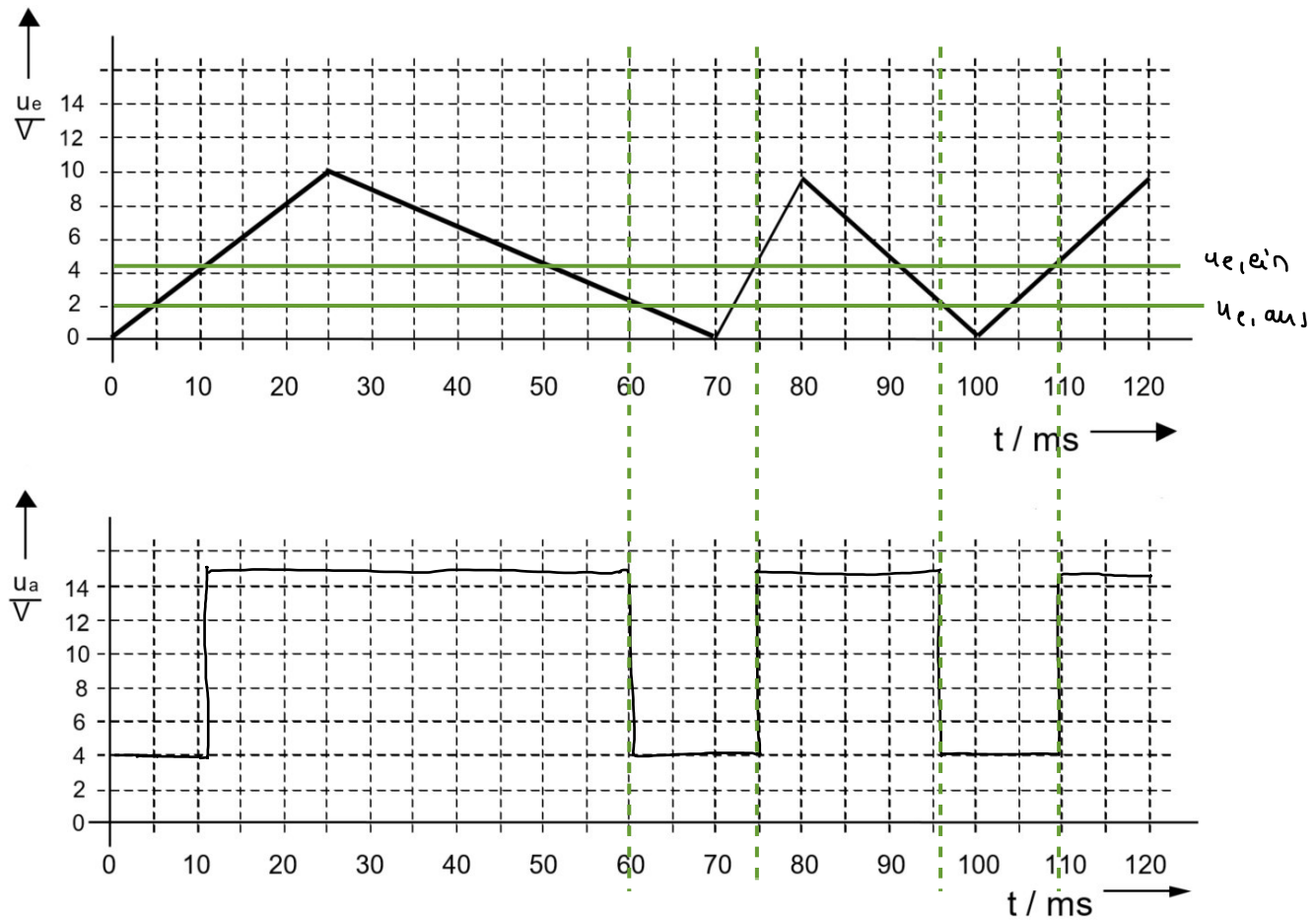
T aus:  $I_C = 0$

Schaltvorgang:  $U_{BE} = 0,7\text{ V}$

$I_B = 0$

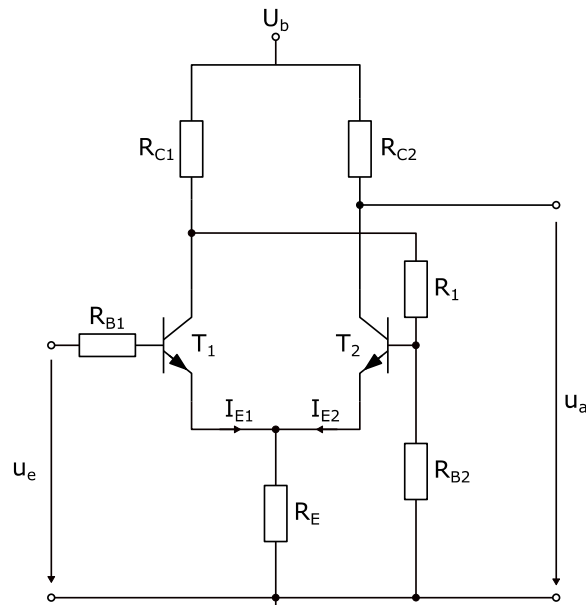
# Aufgabe 1

■ d) ges.:  $u_a(t)$



# Aufgabe 1

- e) ges.: Bezeichnung der Schaltung



Nicht invertierender Schmitt-Trigger

$$\begin{aligned}
 R_{C1} &= 9 \text{ k}\Omega \\
 R_{C2} &= 3 \text{ k}\Omega \\
 R_E &= 1 \text{ k}\Omega \\
 R_1 &= 30 \text{ k}\Omega \\
 R_2 &= 39 \text{ k}\Omega \\
 R_{B2} &= 20 \text{ k}\Omega \\
 U_b &= +15 \text{ V}
 \end{aligned}$$

### Annahmen:

$$\text{T ein: } U_{CE} = 0,2 \text{ V}$$

$$\text{T aus: } I_C = 0$$

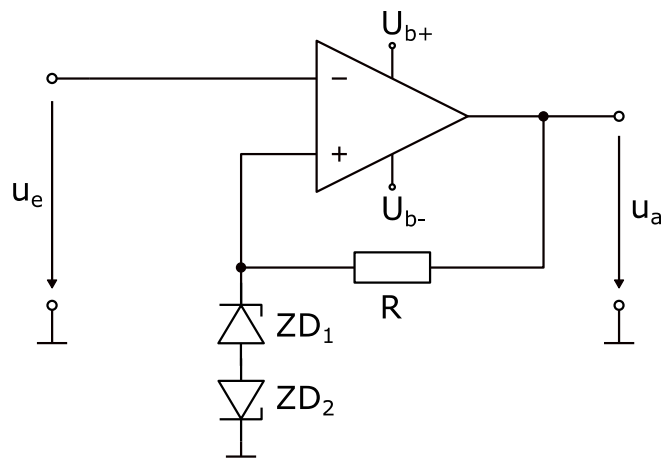
$$\text{Schaltvorgang: } U_{BE} = 0,7 \text{ V}$$

$$I_B = 0$$



# Aufgabe 2

- a) ges.: Rückkopplung, Bezeichnung



• Mitkopplung

→ invertierender Schmitt-Trigger

$R = 5 \text{ k}\Omega$ $U_b = \pm 12 \text{ V}$ $U_{Z1} = 2,7 \text{ V}$ $U_{Z2} = 5,1 \text{ V}$
---

# Aufgabe 2

■ b) ges.:  $u_{e1}$ ,  $u_{e2}$  sodass  $u_a = 0$

1.  $u_a = +12V$

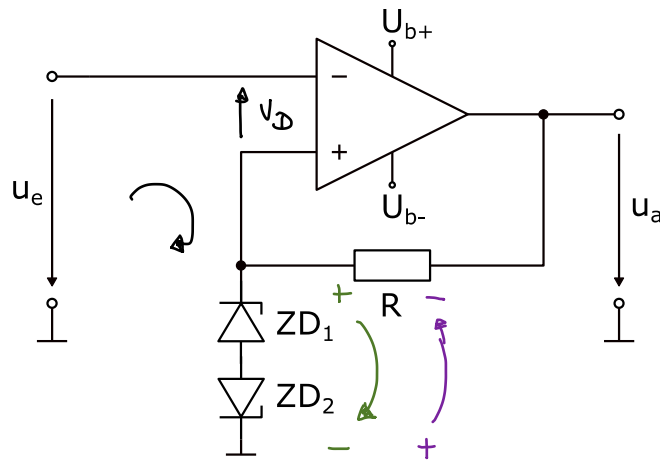
$$-u_e - U_D + U_{Z1} + 0,7V = 0$$

$$U_D = 0 \rightarrow u_e = U_{Z1} + 0,7V = 2,7V + 0,7V = 3,4V$$

2.  $u_a = -12V$

$$-u_e - U_D - 0,7V - U_{Z2} = 0$$

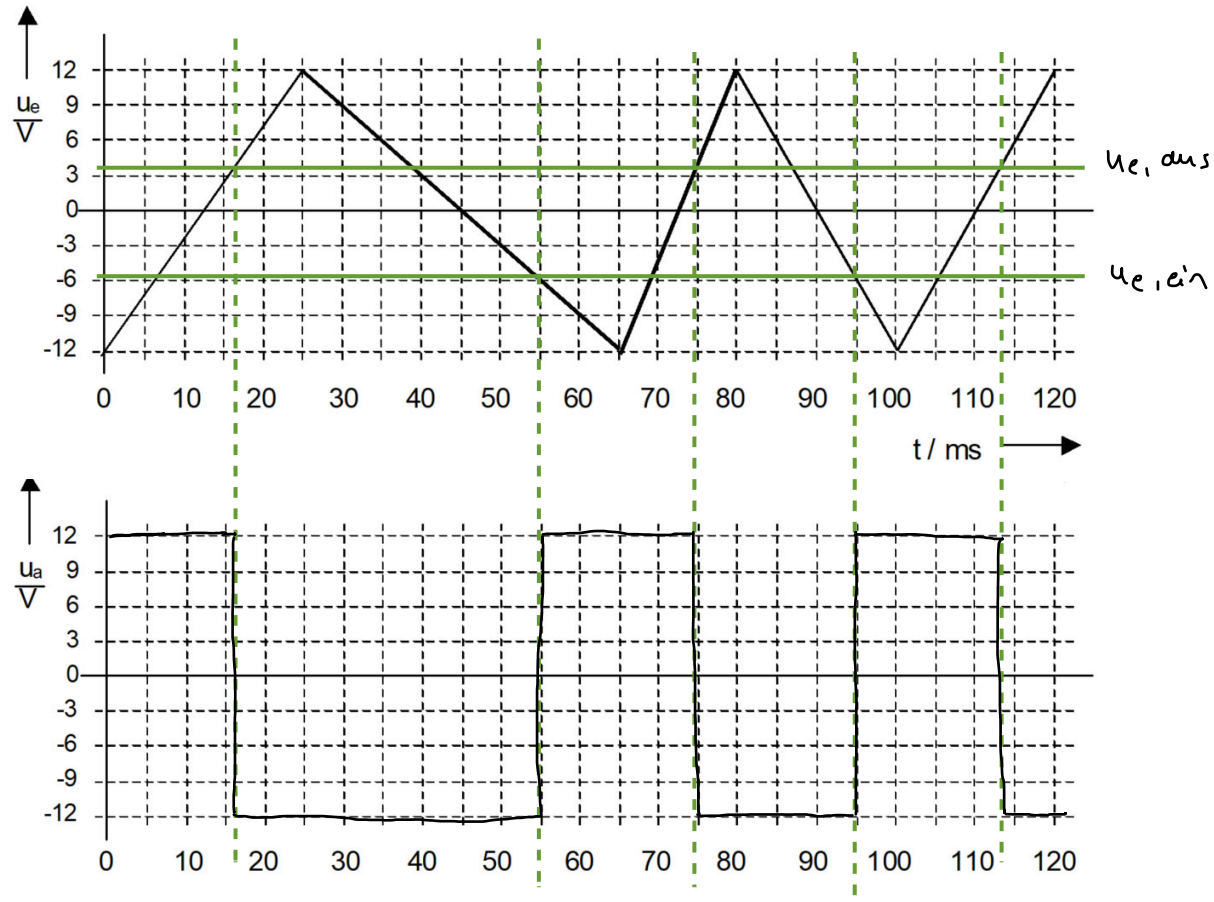
$$U_D = 0 \rightarrow u_e = -U_{Z2} - 0,7V = -5,1V - 0,7V = -5,8V$$



$R = 5 \text{ k}\Omega$ $U_b = \pm 12 \text{ V}$ $U_{Z1} = 2,7 \text{ V}$ $U_{Z2} = 5,1 \text{ V}$
---

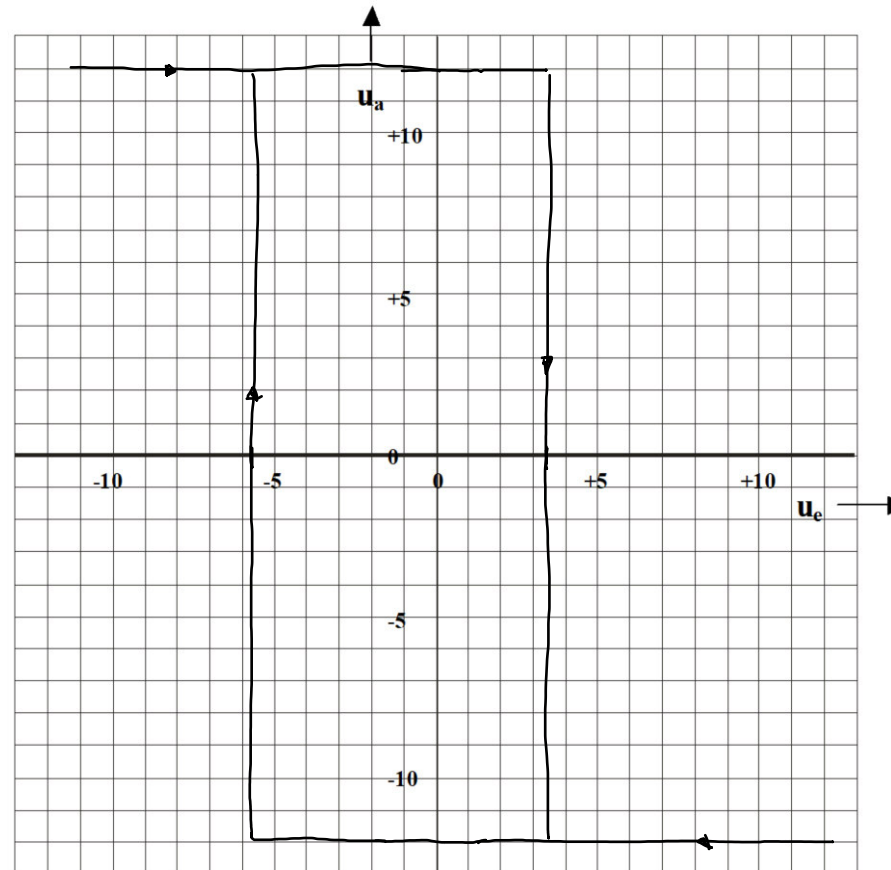
# Aufgabe 2

■ c) ges.:  $u_a(t)$



# Aufgabe 2

■ d) ges.:  $u_a(u_e)$



# Digitale Schaltungstechnik

## ■ Eigenschaften:

- Nur 2 Zustände einer Spannung: HIGH (logischer Zustand: 1)\*  
LOW (logischer Zustand: 0)
- 2 extreme Arbeitspunkt der Transistoren: leitend oder gesperrt
- Realisierung durch verschiedene Schaltungstechniken (Logikfamilien)

## ■ Statisches Verhalten:

- **Logische Pegel:**  $V_H, V_L$

- **Störabstände:**

- Absolut:  $\Delta V_H = V_H - V_S$

- $\Delta V_L = V_S - V_L$

- Relativ:  $\gamma_H = \frac{\Delta V_H}{\Delta V}$

- $\gamma_L = \frac{\Delta V_L}{\Delta V}$

\* Bei positiver Logik

# Digitale Schaltungstechnik

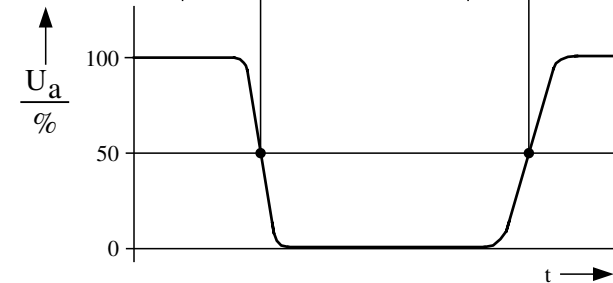
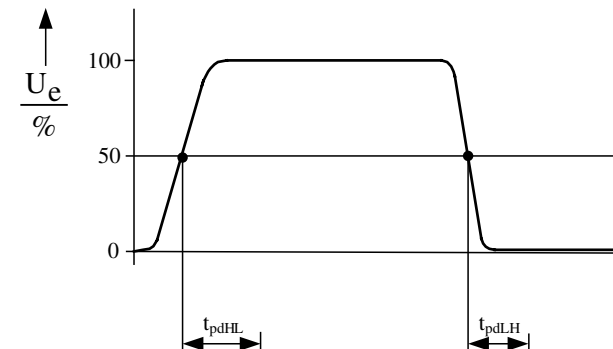
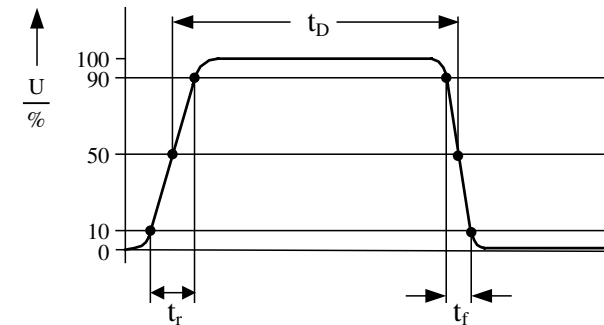
## ■ Dynamisches Verhalten

■ **Anstiegszeit ( $t_r$ ):** Zeitdifferenz zwischen 10% und 90% des Ausgangspegels

**Fallzeit ( $t_f$ ):** Zeitdifferenz zwischen 90% und 10% des Ausgangspegels

■ **Gatterlaufzeit ( $t_{pd}$ ):** Verzögerung zwischen 50% der Eingangsspannung und 50% der Ausgangsspannung jeweils bei Anstieg und Abfall

$$t_{pd} = \frac{t_{pdHL} + t_{pdLH}}{2}$$



Quelle: ES Skript

# Digitale Schaltungstechnik

## ■ Verlustleistung

- Statisch: Ausgang ist entweder auf HIGH oder LOW

$$P_{\text{stat}} = U \cdot I$$

- Dynamisch: Wechsel zwischen zwei Zuständen

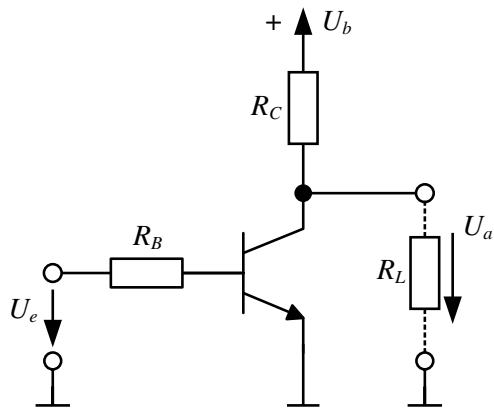
$$P_{\text{dyn}} = C \cdot (U_H - U_L)^2 f_t$$

- Gesamtleistung:

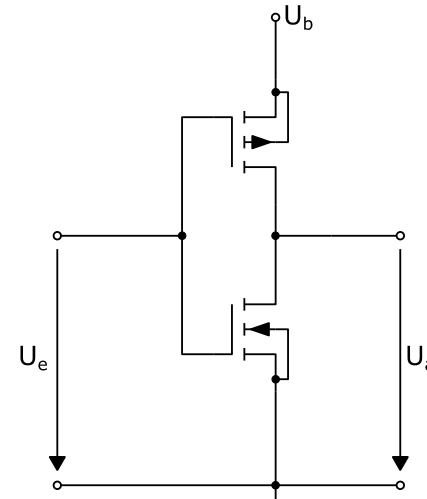
$$P_{\text{ges}} = P_{\text{dyn}} + r \cdot P_{\text{stat}} \quad , \quad r: \text{Tastverhältnis}$$

# Inverter

## ■ Emitterschaltung



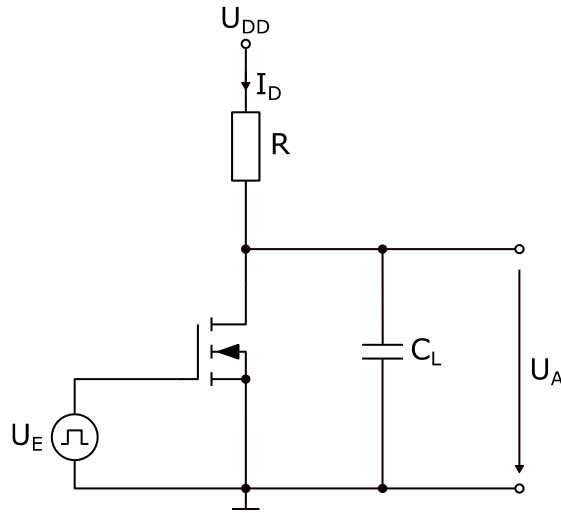
## ■ CMOS





# Aufgabe 3

■ a) ges.:  $U_H, U_L$



$R = 1 \text{ k}\Omega$   
 $r_{DS,on} = 50 \text{ }\Omega$   
 $C_L = 2 \text{ pF}$   
 $U_{DD} = 5 \text{ V}$   
 $u_{e,min} = 0 \text{ V}$   
 $u_{e,max} = 5 \text{ V}$

1)  $U_E = 0 \text{ V} \rightarrow T \text{ sport}$

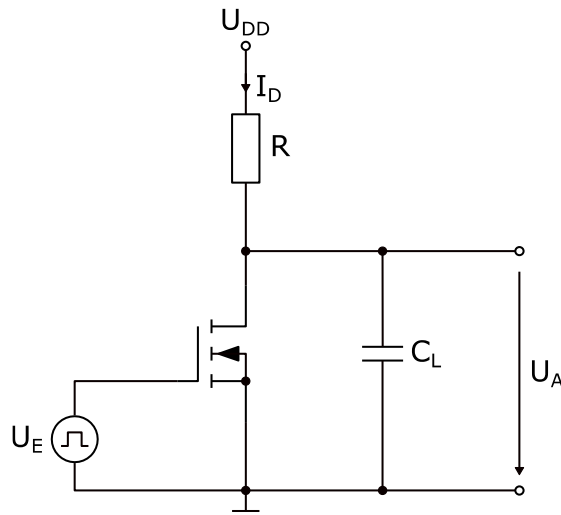
$$U_A = U_{DD} = 5 \text{ V} = U_H$$

2)  $U_E = 5 \text{ V} \rightarrow T \text{ leitet}$

$$\begin{aligned}
 U_A &= U_{DD} \cdot \frac{r_{DS,on}}{R + r_{DS,on}} = 5 \text{ V} \cdot \frac{50 \text{ }\Omega}{1050 \text{ }\Omega} \\
 &= 0,24 \text{ V} = U_L
 \end{aligned}$$

# Aufgabe 3

■ b) ges.:  $P_{\text{stat}}$



$$P_{\text{stat}} = U \cdot I$$

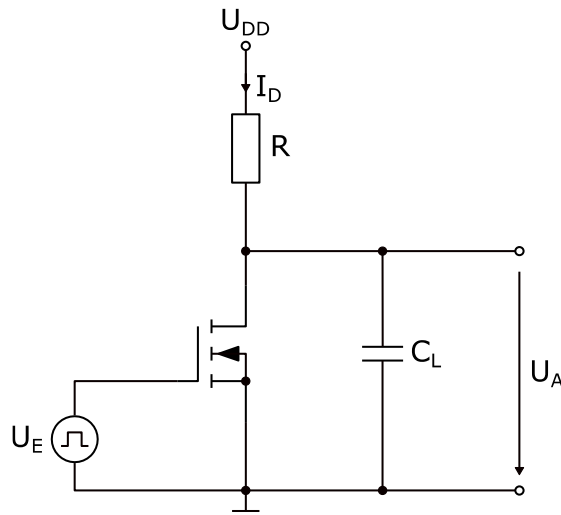
$$P_{\text{stat}} \big|_{U_A = U_H} = 0$$

$$\begin{aligned}
 P_{\text{stat}} \big|_{U_A = U_L} &= U_{\text{DD}} \cdot I_D = U_{\text{DD}} \cdot \frac{U_{\text{DD}}}{R + r_{\text{DS,ON}}} \\
 &= \frac{25 \text{ V}^2}{1050 \text{ } \Omega} \approx 24 \text{ mW}
 \end{aligned}$$

- $R = 1 \text{ k}\Omega$
- $r_{\text{DS,on}} = 50 \text{ } \Omega$
- $C_L = 2 \text{ pF}$
- $U_{\text{DD}} = 5 \text{ V}$
- $u_{\text{e,min}} = 0 \text{ V}$
- $u_{\text{e,max}} = 5 \text{ V}$

# Aufgabe 3

■ c) ges.:  $P_{\text{dyn}}$

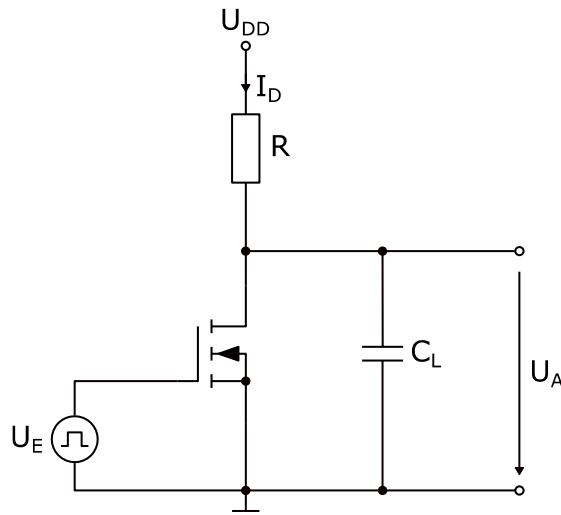


$$\begin{aligned}
 P_{\text{dyn}} &= C \cdot (U_H - U_L)^2 \cdot f \\
 &= 2 \text{ pF} \cdot (5 \text{ V} - 0,24 \text{ V})^2 \cdot 10 \text{ MHz} \\
 &= 453 \text{ } \mu\text{W}
 \end{aligned}$$

$R = 1 \text{ k}\Omega$ $r_{\text{DS,on}} = 50 \text{ } \Omega$ $C_L = 2 \text{ pF}$ $U_{\text{DD}} = 5 \text{ V}$ $u_{\text{e,min}} = 0 \text{ V}$ $u_{\text{e,max}} = 5 \text{ V}$ $f = 10 \text{ MHz}$
---

# Aufgabe 3

■ d) ges.:  $P_{ges}$



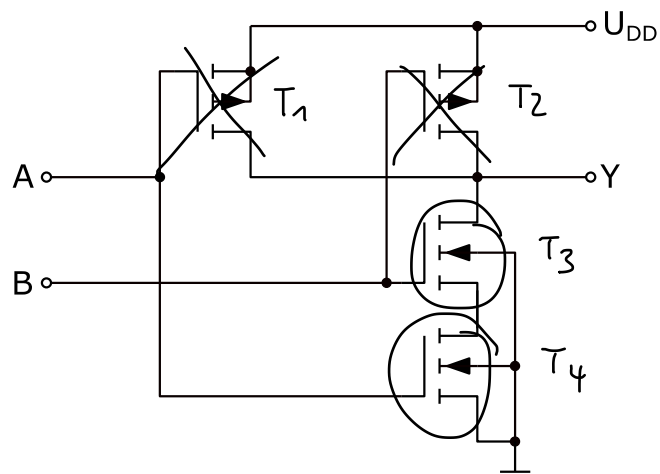
$$P_{ges} = P_{dyn} + r \cdot P_{stat} = 453 \mu W + 0,5 \cdot 24 \text{ mW}$$

$$= 12,453 \text{ mW}$$

$R = 1 \text{ k}\Omega$   
 $r_{DS,on} = 50 \Omega$   
 $C_L = 2 \text{ pF}$   
 $U_{DD} = 5 \text{ V}$   
 $u_{e,min} = 0 \text{ V}$   
 $u_{e,max} = 5 \text{ V}$   
 $f = 10 \text{ MHz}$   
 $r = 0,5$

# Aufgabe 4

■ a) ges.: Wahrheitstabelle

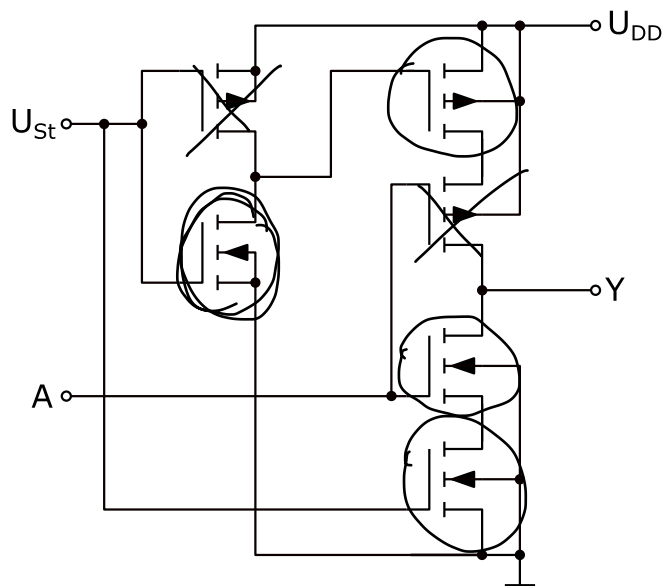


A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

→ NAND

# Aufgabe 4

■ a) ges.: Wahrheitstabelle



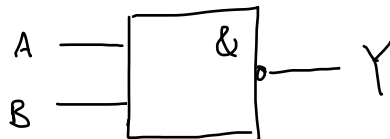
$U_{st}$	A	Y
0	X	Hi Z
1	0	1
1	1	0

↳ Tri-state Inverter

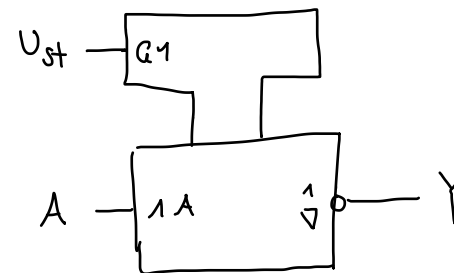
# Aufgabe 4

■ b) ges.: Schaltzeichen

NAND

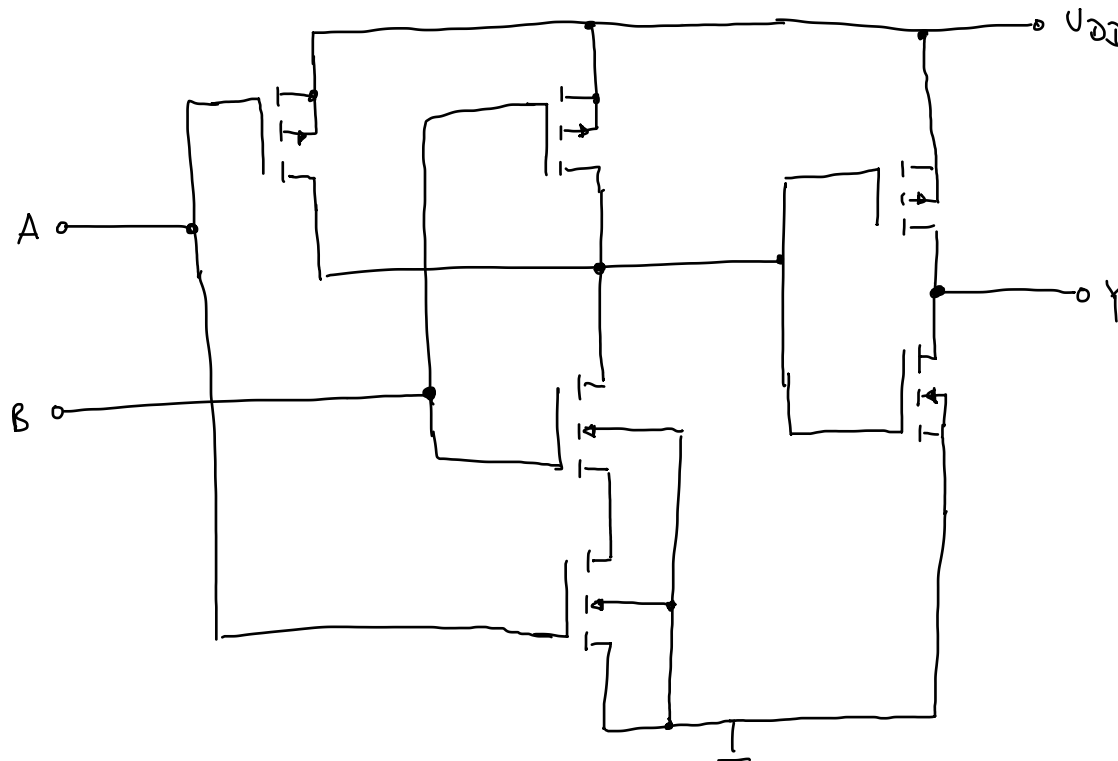


Tri - state Inverter



# Aufgabe 4

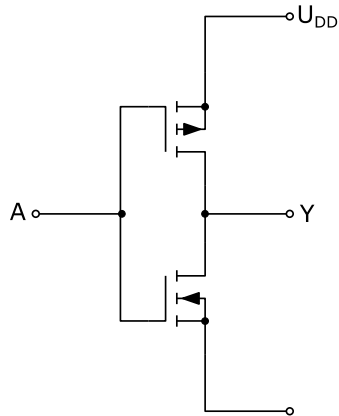
- c) ges.: 2-fach AND-Gatter in CMOS-Technik



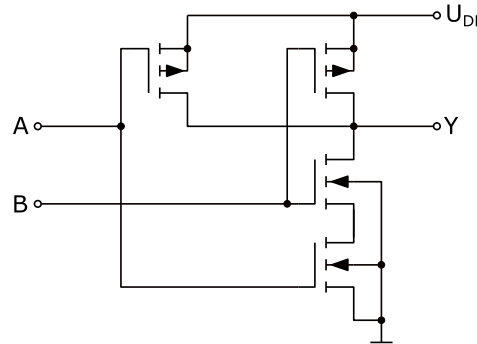


# CMOS Gatter – Übersicht

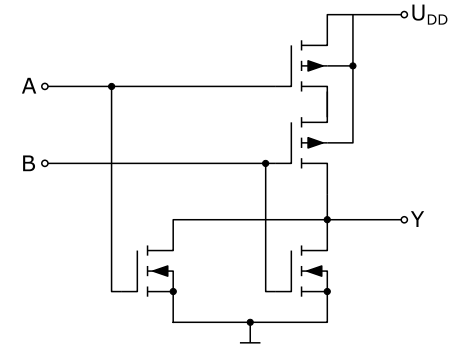
## Inverter



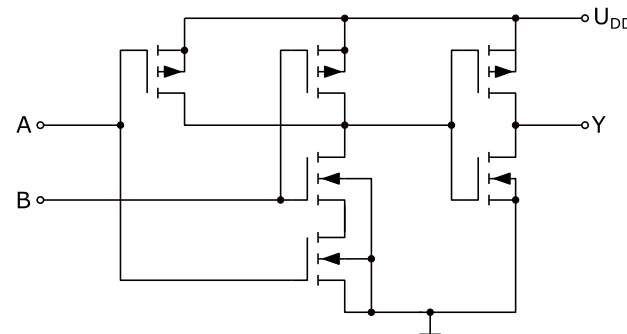
## NAND



## NOR



## AND



## OR

