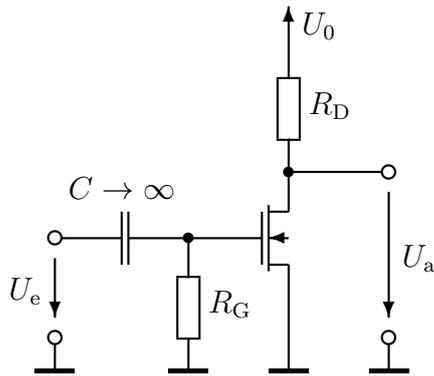


## BEISPIEL 5.5: Sourceschaltung mit selbstleitendem MOSFET



Versorgungsspannung:  $U_0 = 12 \text{ V}$

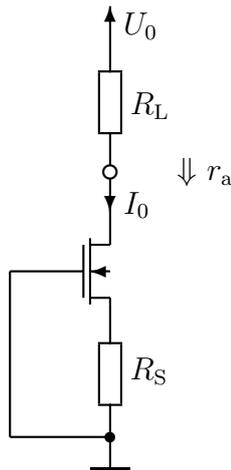
Schwellenspannung:  $U_{\text{th}} = -3 \text{ V}$

Steuerfaktor:  $\beta = 2 \text{ mA/V}^2$

Widerstandswert:  $R_G = 1 \text{ M}\Omega$

- Dimensionieren Sie den Widerstand  $R_D$  so, dass der MOSFET an der Grenze zwischen Ohmschem und Stromquellenbereich arbeitet.
- Berechnen Sie die Kleinsignal-Spannungsverstärkung  $v_u$ .
- Berechnen Sie den Eingangswiderstand  $r_e$ .
- Berechnen Sie den Ausgangswiderstand  $r_a$ .

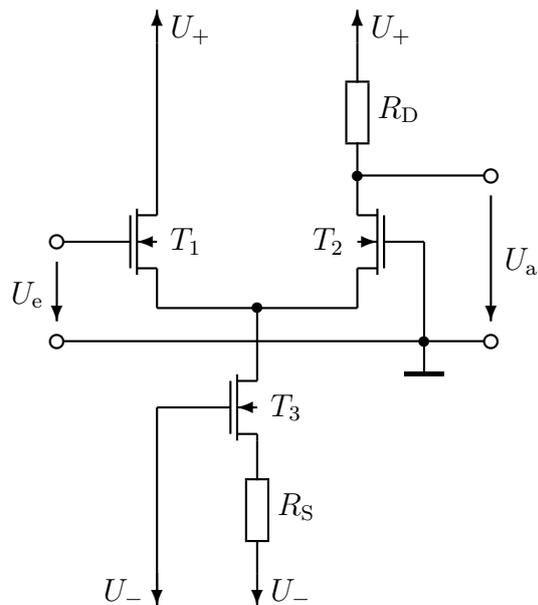
## BEISPIEL 5.6: Stromquelle



Schwellenspannung:  $U_{th} = -4 \text{ V}$   
 Steuerfaktor:  $\beta = 1,5 \text{ mA/V}^2$   
 $TK_{\beta} = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dT} = -0,005 \text{ K}^{-1}$   
 Early-Spannung:  $U_Y = 20 \text{ V}$   
 Widerstandswert:  $R_S = 470 \text{ } \Omega$   
 $U_0$  und  $R_L$  so, dass sich der MOSFET  
 im Stromquellenbereich befindet.

- Berechnen Sie den Stromquellenstrom  $I_0$ .
- Berechnen Sie den Temperaturkoeffizienten des Stromquellenstroms unter Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit der Schwellenspannung.  
*Hinweis:* Es ist rechnerisch einfacher, die quadratische Gleichung für  $I_D$  abzuleiten als die Endformel.  
*Bemerkung:* Wenn Sie genauer rechnen wollen, können Sie zusätzlich die Temperaturabhängigkeit der Schwellenspannung berücksichtigen ( $dU_{th}/dT = -2 \text{ mV/K}$ ).
- Berechnen sie den Ausgangswiderstand  $r_a$ .
- Zeichnen Sie die analoge Stromquelle mit einem p-MOSFET.

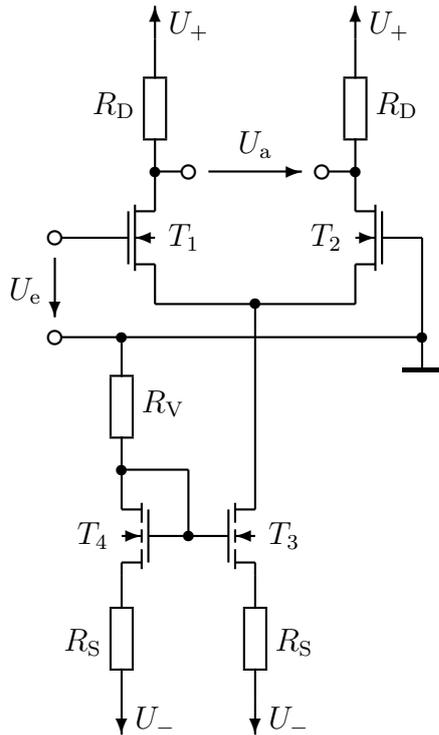
## BEISPIEL 5.7: Differenzverstärker



|                        |   |
|------------------------|---|
| Versorgungsspannungen: | $U_+ = 15 \text{ V}$<br>$U_- = -15 \text{ V}$ |
| Schwellenspannung:     | $U_{th} = -3,5 \text{ V}$                     |
| Steuerfaktor:          | $\beta = 2,5 \text{ mA/V}^2$                  |
| Widerstandswert:       | $R_D = 2,7 \text{ k}\Omega$                   |
| Eingangs-Ruhspeisung:  | $U_{e0} = 0 \text{ V}$                        |
| Spannungsverstärkung:  | $v_u = 5$                                     |

- (a) Dimensionieren Sie den Widerstand  $R_S$  so, dass sich die Spannungsverstärkung  $v_u$  einstellt. Welchen Wert hat dann die Ausgangs-Ruhspeisung  $U_{a0}$ ?
- (b) Wie groß muss die Versorgungsspannung  $U_+$  mindestens gewählt werden, damit der Arbeitspunkt von  $T_2$  im Stromquellenbereich liegt?

## BEISPIEL 5.8: Differenzverstärker

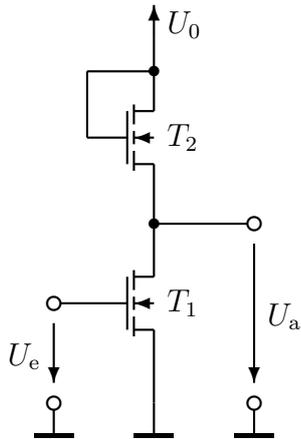


|                        |  |
|------------------------|--|
| Versorgungsspannungen: | $U_+ = 15 \text{ V}$<br>$U_- = -15 \text{ V}$  |
| Schwellspannungen:     | $U_{T1} = U_{T2} = -2 \text{ V}$<br>$U_{T3} = U_{T4} = 2 \text{ V}$                                  |
| Steuereffizient:       | $\beta = 5 \text{ mA/V}^2$<br>$TK_\beta = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dT} = -0,005 \text{ K}^{-1}$ |
| Widerstandswert:       | $R_D = 2 \text{ k}\Omega$  |
| Ruhspannungen:         | $U_{e0} = 0 \text{ V}$<br>$U_{DS3,0} = 10 \text{ V}$   |
| Stromquellenstrom:     | $I_{D3,0} = 5 \text{ mA}$  |

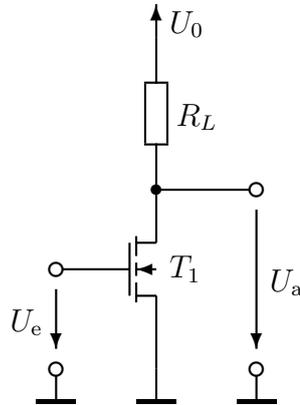
- Dimensionieren Sie die Widerstände  $R_S$  und  $R_V$  der Stromquelle so, dass sich der Drainstrom  $I_{D3,0}$  einstellt.
- Berechnen Sie die Spannungsverstärkung  $v_u$ .
- Bestimmen Sie die Temperaturabhängigkeit  $dv_u/dT$  der Spannungsverstärkung.  
*Hinweis:* Die Temperaturabhängigkeit des Stromquellenstroms kann vernachlässigt werden.
- Überprüfen Sie, dass  $T_1$  und  $T_2$  im Stromquellenbereich arbeiten.

## BEISPIEL 5.9: Vergleich zweier Sourceschaltungen

Schaltung 1



Schaltung 2



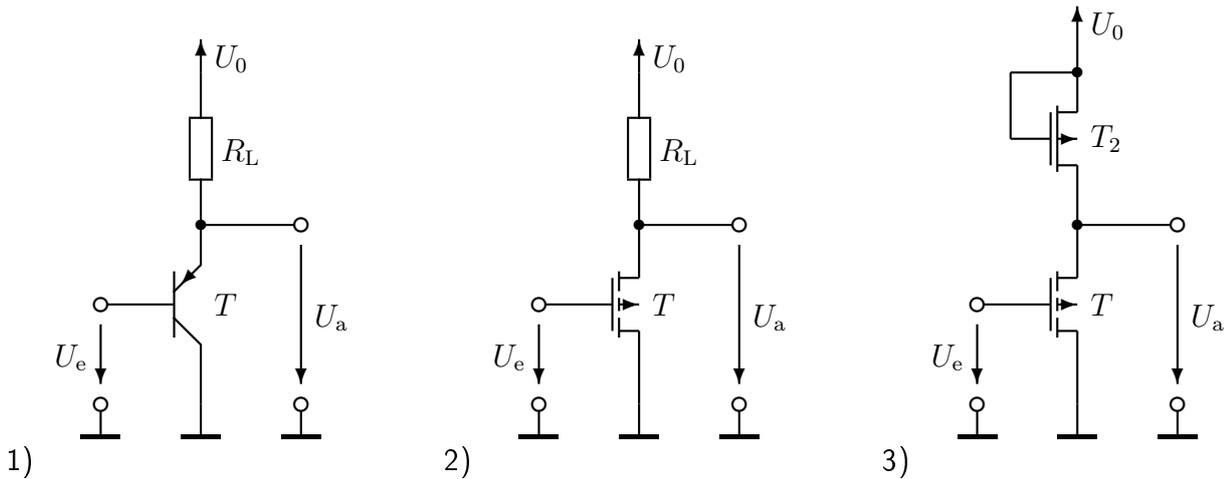
Versorgungsspannung:  $U_0 = 12 \text{ V}$

Schwellenspannungen:  $U_{th1} = U_{th2} = 1 \text{ V}$

Steuerfaktoren:  $\beta_1 = 2 \text{ mA/V}^2$   
 $\beta_2 = 20 \text{ } \mu\text{A/V}^2$

- Berechnen Sie die Eingangs-Ruhschaltung  $U_{e0}$ , für die der Transistor  $T_1$  in Schaltung 1 gerade an der Grenze zwischen Ohmschem und Stromquellenbereich arbeitet.
- Berechnen Sie zu dieser Eingangs-Ruhschaltung die Spannungsverstärkung  $v_u$ .
- Ersetzen Sie Transistor  $T_2$  durch einen Ohmschen Widerstand  $R_L$  (Schaltung 2), sodass der oben berechnete Arbeitspunkt von Transistor  $T_1$  und die Spannungsverstärkung  $v_u$  erhalten bleiben. Dimensionieren Sie den Widerstand  $R_L$  und die neue erforderliche Versorgungsspannung  $U_0$ .

## BEISPIEL 5.10: Sourcefolger mit pMOSFETs



Versorgungsspannung:  $U_0 = 5 \text{ V}$   
 Eingang-Ruhe­spannung:  $U_{e0} = 1 \text{ V}$

Generator-Innenwiderstand:  $R_G = 50 \text{ } \Omega$   
 Lastwiderstand:  $R_L = 800 \text{ } \Omega$

*Bipolartransistor:*

Flussspannung:  $U_f = 0,6 \text{ V}$   
 $\frac{dU_f}{dT} = -2 \text{ mV/K}$   
 Temperaturspannung:  $U_T = 25 \text{ mV}$   
 Stromverstärkung:  $B = 100$   
 Restspannung:  $U_{ECsat} = 0,1 \text{ V}$

*MOSFETs:*

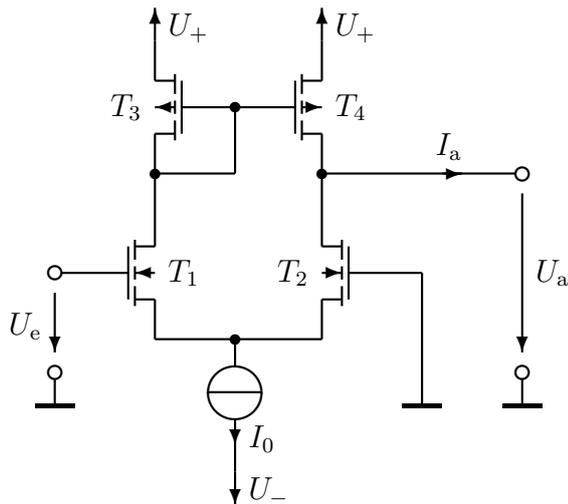
Schwellenspannung  $T$ :  $\bar{U}_{th} = 1 \text{ V}$   
 Steuerfaktor  $T$ :  $\beta = 2,5 \text{ mA/V}^2$   
 $TK_\beta = -0,005 \text{ K}^{-1}$   
 Schwellenspannung  $T_2$ :  $\bar{U}_{th2} = -1 \text{ V}$   
 Steuerfaktor  $T_2$ :  $TK_{\beta_2} = -0,005 \text{ K}^{-1}$

Die Early-Leitwerte der Transistoren können vernachlässigt werden.

- Bestimmen Sie in den Schaltungen 1 und 2 die Ausgangs-Ruhe­spannung  $U_{a0}$ . Dimensionieren Sie den Steuerfaktor  $\beta_2$  von MOSFET  $T_2$  in Schaltung 3 so, dass sich dieselbe Ausgangs-Ruhe­spannung  $U_{a0}$  wie in Schaltung 2 ergibt.
- Berechnen Sie die Spannungsverstärkung  $v_u$ .
- Berechnen Sie den Eingangswiderstand  $r_e$ .
- Berechnen Sie den Ausgangswiderstand  $r_a$ .
- Bestimmen Sie die Temperaturabhängigkeit der Ausgangs-Ruhe­spannung  $dU_{a0}/dT$ .

*Hinweis zu Schaltung 2:* Es ist rechnerisch einfacher, die quadratische Gleichung für  $U_{a0}$  abzuleiten als die Endformel.

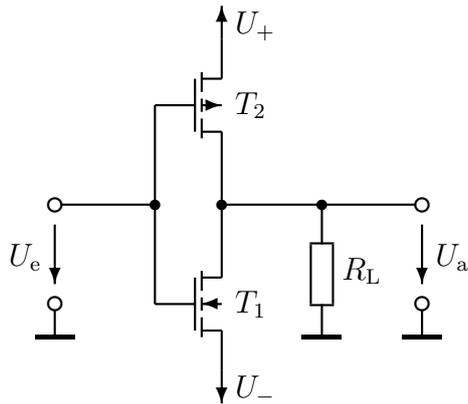
## BEISPIEL 5.11: CMOS-Differenzverstärker



|                        |  |
|------------------------|--|
| Versorgungsspannungen: | $U_+ = 5 \text{ V}$<br>$U_- = -5 \text{ V}$                        |
| Stromquellenstrom:     | $I_0 = 2 \text{ mA}$   |
| Schwellspannungen:     | $U_{T1} = U_{T2} =$<br>$\bar{U}_{T3} = \bar{U}_{T4} = 1 \text{ V}$ |
| Steuerfaktoren:        | $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 =$<br>$\beta_4 = 2 \text{ mA/V}^2$    |
| Arbeitspunkt:          | $U_{e0} = 0 \text{ V}$   |

- Berechnen Sie den Ausgangs-Ruhestrom  $I_{a0}$ .
- Berechnen Sie die Übertragungsteilheit  $g_{md} = i_a/u_e$ .
- In welchem Bereich darf sich die Ausgangsspannung  $U_a$  bewegen, damit alle Transistoren im Stromquellenbereich arbeiten?

## BEISPIEL 5.12: CMOS-Verstärker



Versorgungsspannungen:  $U_+ = 8 \text{ V}$   
 $U_- = -8 \text{ V}$

Schwellenspannungen:  $U_{th1} = \bar{U}_{th2} = 2 \text{ V}$   
Steuerfaktoren:  $\beta_1 = \beta_2 = 0,1 \text{ mA/V}^2$

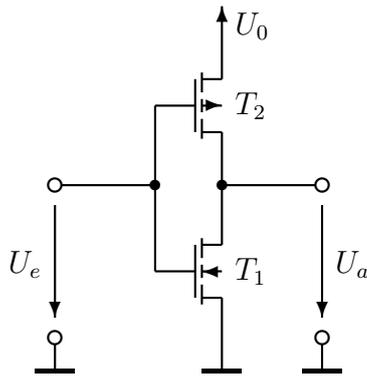
Early-Spannung:  $U_Y = 33,3 \text{ V}$

Widerstandswert:  $R_L = 100 \text{ k}\Omega$

Arbeitspunkt:  $U_{e0} = 0 \text{ V}$

- (a) Berechnen Sie die Kleinsignal-Verstärkung  $v_u = u_a/u_e$  unter Vernachlässigung der Ausgangsleitwerte der Transistoren.
- (b) Berechnen Sie die Kleinsignal-Verstärkung  $v_u = u_a/u_e$  unter Berücksichtigung der Ausgangsleitwerte der Transistoren.

### BEISPIEL 5.13: CMOS-Inverter mit ungleichen MOSFETs

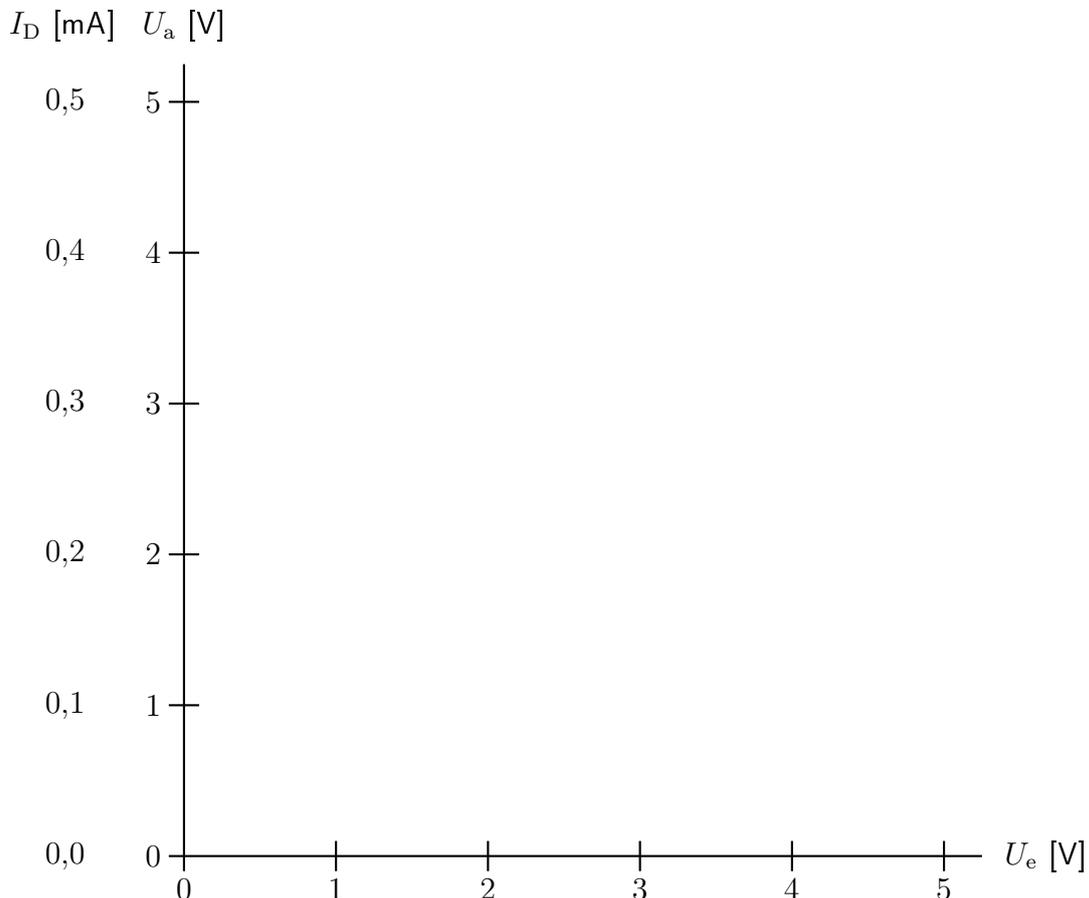


Versorgungsspannung:  $U_0 = 5 \text{ V}$   
 Schwellenspannungen:  $\bar{U}_{th2} = 1 \text{ V}$   
 Steuerfaktoren:  $\beta_1 = 0,9 \text{ mA/V}^2$   
 $\beta_2 = 0,4 \text{ mA/V}^2$

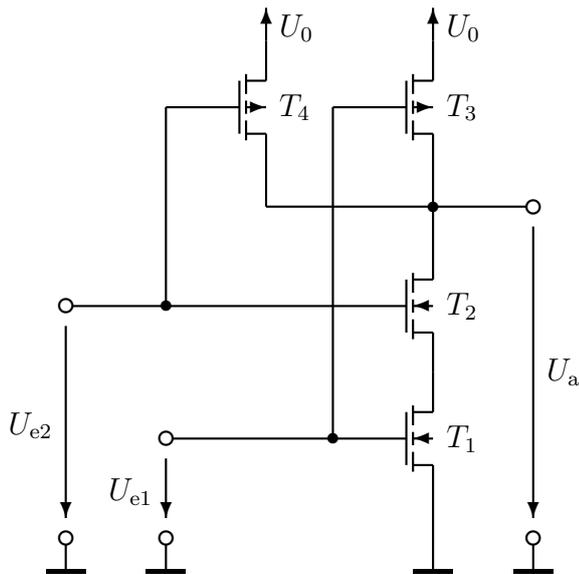
Da die Löcherbeweglichkeit geringer als die Elektronenbeweglichkeit ist, ist der Steuerfaktor des pMOSFET bei gleicher Geometrie geringer als jener des nMOSFET. In diesem Beispiel soll die Ungleichheit der Steuerfaktoren durch unterschiedliche Schwellenspannungen ausgeglichen werden.

- Wie muss die Schwellenspannung des nMOSFET  $T_1$  eingestellt werden, damit der senkrechte Teil der Übertragungskennlinie bei  $U_e = U_0/2$  liegt?
- Zwischen welchen Werten der Ausgangsspannung liegt der senkrechte Teil der Übertragungskennlinie?
- In welchen Eingangsspannungsbereichen ist  $U_a = 0$  bzw.  $U_a = U_0$ ?
- Skizzieren Sie die Übertragungskennlinie  $U_a(U_e)$ .
- Skizzieren Sie den Querstrom  $I_{D1} = I_{D2}$  als Funktion der Eingangsspannung. Wie groß ist sein Maximalwert  $I_{D,max}$ ?

*Hinweis:* Unterscheiden Sie die verschiedenen Arbeitsbereiche. Es gibt jeweils zwei Möglichkeiten, den Querstrom zu berechnen ( $I_{D1}$  oder  $I_{D2}$ ). Wählen Sie immer die einfachere.



## BEISPIEL 5.14: CMOS-NAND-Gatter



Versorgungsspannung:  $U_0 = 5 \text{ V}$

Schwellesspannungen:  $U_{th1} = U_{th2} =$   
 $\bar{U}_{th3} = \bar{U}_{th4} = 1 \text{ V}$

Steuerfaktoren:  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 =$   
 $\beta_4 = 0,5 \text{ mA/V}^2$

- (a) Tragen Sie in die nachfolgende Tabelle für die gegebenen Eingangsspannungen ein, in welchem Betriebszustand sich die einzelnen Transistoren befinden („S“ für Sperrbereich, „O“ für Ohmschen Bereich, „I“ für Stromquellenbereich). Geben Sie weiters die Ausgangsspannung an.

| $U_{e1}$ | $U_{e2}$ | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ | $U_a$ |
|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0        | 0        |       |       |       |       |       |
| $U_0$    | 0        |       |       |       |       |       |
| 0        | $U_0$    |       |       |       |       |       |
| $U_0$    | $U_0$    |       |       |       |       |       |

- (b) Betrachten Sie in diesem und den folgenden Punkten die Übertragungskennlinie  $U_a(U_{e1})$  für  $U_{e2} = U_0$ . Bis zu welchem Wert darf  $U_{e1}$  von  $U_{e1} = 0$  ausgehend erhöht werden, ohne dass sich die Ausgangsspannung ändert? Bis zu welchem Wert darf  $U_{e1}$  von  $U_{e1} = U_0$  ausgehend vermindert werden, ohne dass sich die Ausgangsspannung ändert?
- (c) Bei welcher Eingangsspannung  $U_{e1}$  gibt es einen vertikalen Teil der Übertragungskennlinie  $U_a(U_{e1})$ ?
- (d) Zwischen welchen Werten der Ausgangsspannung  $U_a$  verläuft der vertikale Teil der Übertragungskennlinie  $U_a(U_{e1})$ ?
- Hinweis:* Der Transistor  $T_2$  befindet sich in diesem Fall im Ohmschen Bereich. Approximieren Sie die Kennlinie im Ohmschen Bereich durch den linearen Term in  $U_{DS}$ .
- (e) Skizzieren Sie die Übertragungskennlinie  $U_a(U_{e1})$  des CMOS-NOR-Gatters und vergleichen Sie sie mit der Übertragungskennlinie des aus  $T_1$  und  $T_3$  gebildeten CMOS-Inverters.