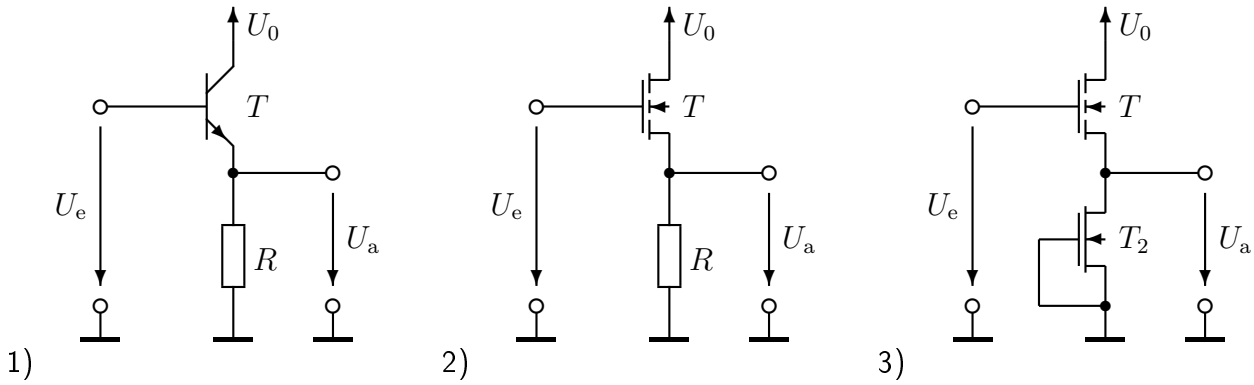


BEISPIEL 5.1: Sourcefolger



Versorgungsspannung: $U_0 = 5 \text{ V}$
 Eingangss-Ruhespannung: $U_{e0} = 4 \text{ V}$
 Generator-Innenwiderstand: $R_G = 1 \text{ k}\Omega$

Kollektor-Ruhestrom: $I_{C0} = 1 \text{ mA}$
 Drain-Ruhestrom: $I_{D0} = 1 \text{ mA}$

Bipolartransistor:

Flussspannung: $U_f = 0,6 \text{ V}$
 Temperaturspannung: $U_T = 25 \text{ mV}$
 Stromverstärkung: $B = 100$
 Early-Spannung: $U_Y = 50 \text{ V}$
 Restspannung: $U_{CEsat} = 0,1 \text{ V}$

MOSFETs:

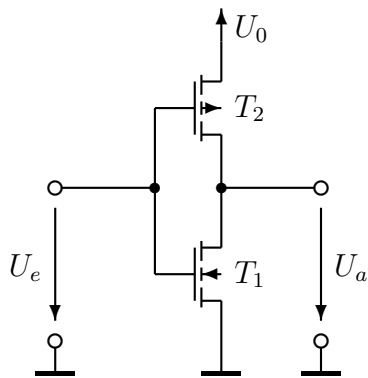
Schwellspannung T : $U_T = 1 \text{ V}$
 Steuerfaktor T : $\beta = 2,5 \text{ mA/V}^2$
 Schwellspannung T_2 : $U_{T2} = -1 \text{ V}$
 Early-Spannung: $U_Y = 50 \text{ V}$ ($\lambda = 0,02 \text{ V}^{-1}$)

Lösen Sie für jede der 3 Schaltungen folgende Aufgaben:

- Dimensionieren Sie den Widerstand R bzw. den Steuerfaktor β_2 von MOSFET T_2 , sodass sich der Arbeitspunkt einstellt.
- Berechnen Sie unter Berücksichtigung der Early-Leitwerte die Spannungsverstärkung v_u .
- Berechnen Sie unter Berücksichtigung der Early-Leitwerte den Eingangswiderstand r_e .
- Berechnen Sie unter Berücksichtigung der Early-Leitwerte den Ausgangswiderstand r_a .
- Welchen Wert $U_{e,\min}$ darf die Eingangsspannung nicht unterschreiten, damit alle Transistoren im aktiven Bereich (Stromquellenbereich) bleiben?

	Schaltung 1	Schaltung 2	Schaltung 3
R bzw. β_2			
$1/g_m$			
$1/g_{CE}$ bzw. $1/g_{DS}$			
v_u			
r_e			
r_a			
$U_{e,\min}$			

BEISPIEL 5.2: CMOS-Inverter



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

Schwellspannungen: $U_{T1} = \bar{U}_{T2} = 1 \text{ V}$

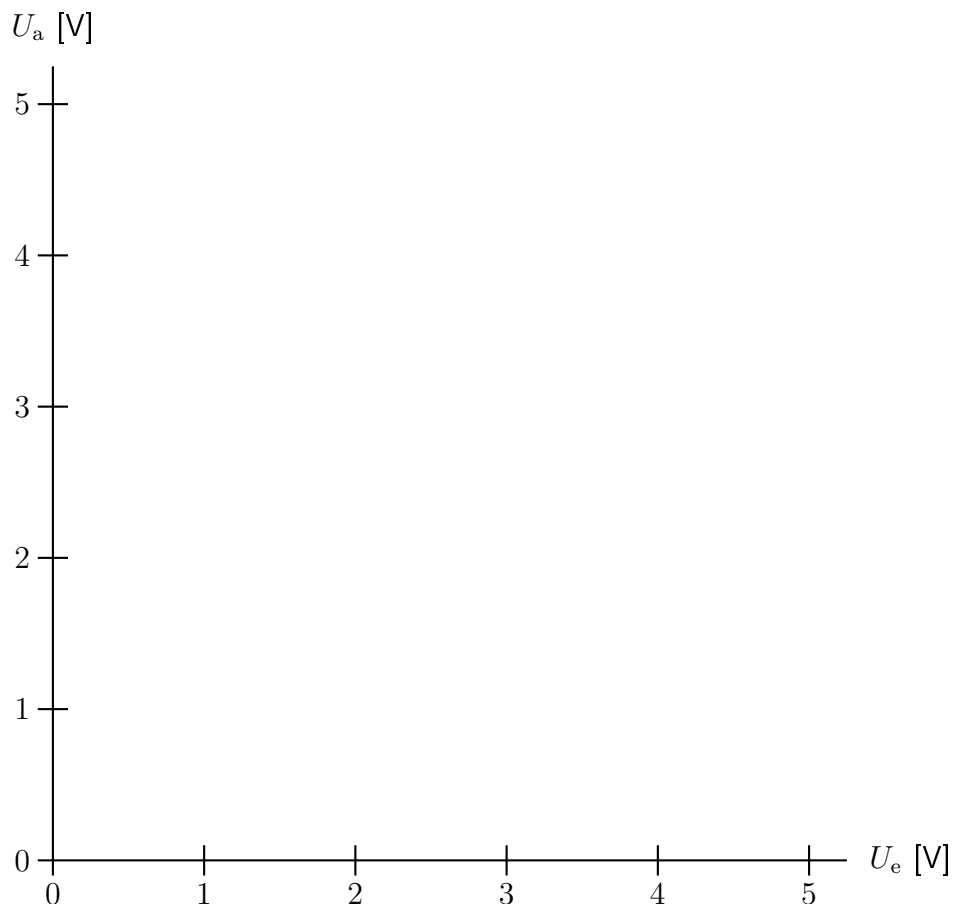
Steuerfaktoren: $\beta_1 = \beta_2 = 0,25 \text{ mA/V}^2$

Der CMOS-Inverter ist das einfachste logische Glied in CMOS-Technologie.

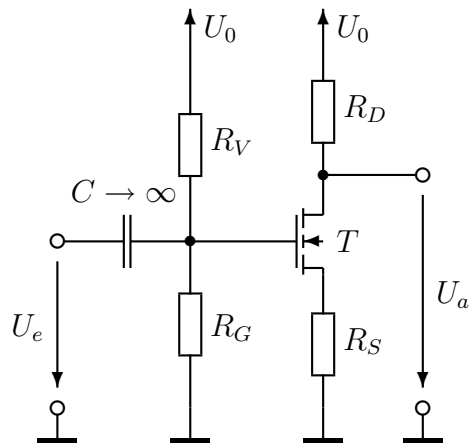
Ermitteln Sie die Übertragungskennlinie $U_a(U_e)$

- in jenen Bereichen, in denen jeweils einer der Transistoren sperrt.
- in jenem Bereich, in dem beide Transistoren im Stromquellenbereich arbeiten.
- in jenen Bereichen, in denen jeweils ein Transistor im Stromquellenbereich und der andere im Ohmschen Bereich arbeitet.

Hinweis: Die einzelnen Bereiche der Kennlinie gehen stetig mit stetigen Tangenten ineinander über.



BEISPIEL 5.3: Sourceschaltung mit Stromgegenkopplung

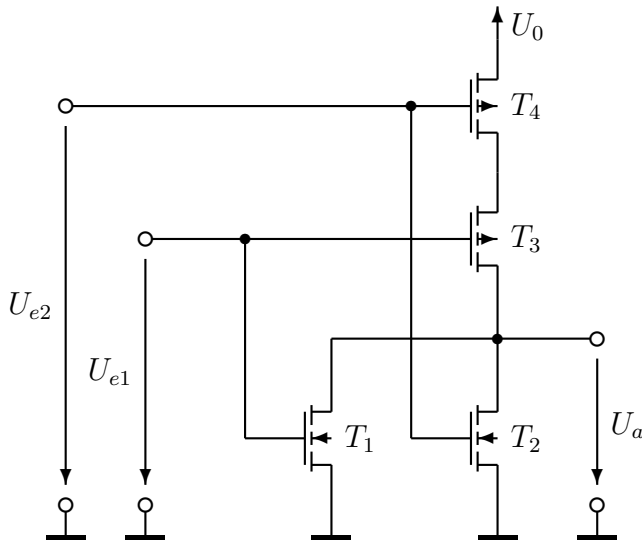


Versorgungsspannung: $U_0 = 15 \text{ V}$
 Schwellspannung: $U_T = 1 \text{ V}$
 Steuerfaktor: $\beta = 1 \text{ mA/V}^2$
 Widerstandswerte: $R_V = 4 \text{ M}\Omega$
 $R_G = 1 \text{ M}\Omega$
 $R_S = 600 \text{ }\Omega$
 $R_D = 8 \text{ k}\Omega$

- Berechnen Sie die Ausgangs-Ruhespannung U_{a0} .
- Berechnen Sie die Kleinsignal-Spannungsverstärkung v_u .
- Berechnen Sie den Eingangswiderstand r_e .
- Berechnen sie den Ausgangswiderstand r_a .
- Bestimmen Sie die maximale Amplitude $(\hat{u}_a)_{\max}$ für sinusförmige Eingangsspannungen, sodass der Transistor den Stromquellenbereich nicht verlässt.

Vergleichen Sie die Eigenschaften mit jenen der Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung.

BEISPIEL 5.4: CMOS-NOR-Gatter



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

Schwellspannungen: $U_{T1} = U_{T2} = U_{T3} = U_{T4} = 1 \text{ V}$

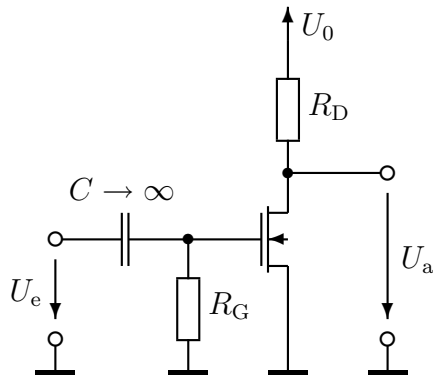
Steuerfaktoren: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0,5 \text{ mA/V}^2$

- (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 $U_{e2} = 0$. 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 $U_a(U_{e1})$?
Hinweis: Der Transistor T_4 befindet sich im Ohmschen Bereich (warum?). Approximieren Sie die Kennlinie im Ohmschen Bereich durch den linearen Term in U_{SD} .
- (d) Zwischen welchen Werten der Ausgangsspannung U_a verläuft der vertikale Teil der Übertragungskennlinie $U_a(U_{e1})$?
- (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.

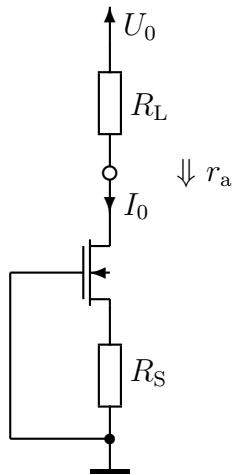
BEISPIEL 5.5: Sourceschaltung mit selbstleitendem MOSFET



Versorgungsspannung: $U_0 = 12 \text{ V}$
Schwellspannung: $U_T = -3 \text{ V}$
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 .

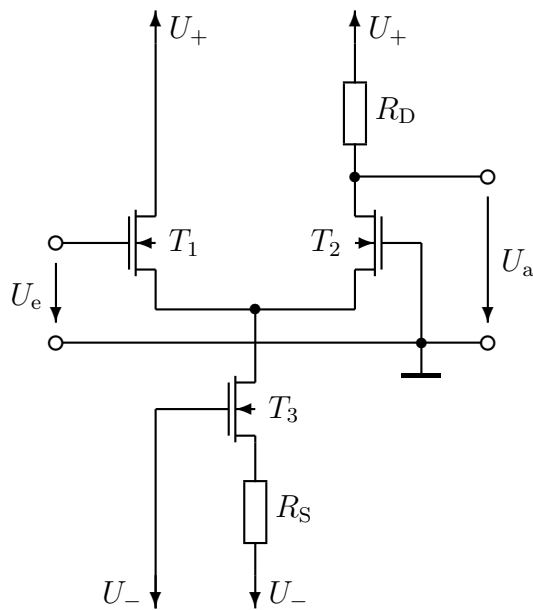
BEISPIEL 5.6: Stromquelle



Schwellspannung: $U_T = -4 \text{ V}$
 Steuerfaktor: $\beta = 1,5 \text{ mA/V}^2$
 $TK_\beta = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dT} = -0,005 \text{ K}^{-1}$
 Early-Spannung: $U_Y = 20 \text{ V}$ ($\lambda = 0,05 \text{ V}^{-1}$)
 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 Schwellspannung.
Bemerkung: Wenn Sie genauer rechnen wollen, können Sie zusätzlich die Temperaturabhängigkeit der Schwellspannung berücksichtigen ($dU_T/dT = -2 \text{ mV/K}$).
- Berechnen sie den Ausgangswiderstand r_a .
- Zeichnen Sie die analoge Stromquelle mit einem p-MOSFET.

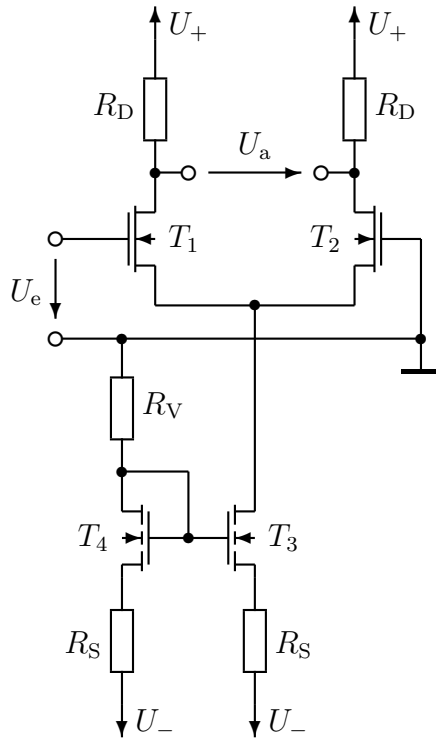
BEISPIEL 5.7: Differenzverstärker



Versorgungsspannungen:	$U_+ = 15 \text{ V}$ $U_- = -15 \text{ V}$
Schwellspannung:	$U_T = -3,5 \text{ V}$
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 Versorgungsspeisung U_+ mindestens sein, damit der Arbeitspunkt von T_2 im Stromquellenbereich liegt?

BEISPIEL 5.8: Differenzverstärker

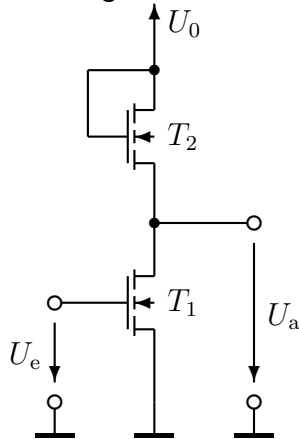


Versorgungsspannungen:	$U_+ = 15 \text{ V}$ $U_- = -15 \text{ V}$
Schwellspannungen:	$U_{T1} = U_{T2} = -2 \text{ V}$ $U_{T3} = U_{T4} = 2 \text{ V}$
Steuereffizient:	$\beta = 5 \text{ mA/V}^2$ $TK_\beta = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dT} = -0,005 \text{ K}^{-1}$
Widerstandswert:	$R_D = 2 \text{ k}\Omega$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

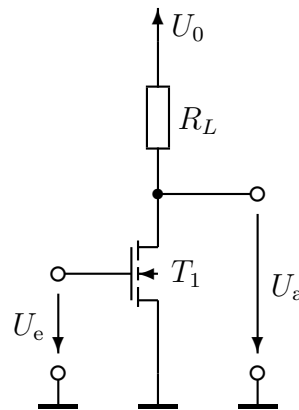
- Dimensionieren Sie die Widerstände R_S und R_V der Stromquelle so, dass sich der Drainstrom $I_{D3,0}$ einstellt.
- Berechnen Sie die Spannungsverstärkung v_u .
- Bestimmen Sie die Temperaturabhängigkeit dv_u/dT der Spannungsverstärkung.
Hinweis: Die Temperaturabhängigkeit des Stromquellenstroms kann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

BEISPIEL 5.9: Vergleich zweier Sourceschaltungen

Schaltung 1



Schaltung 2



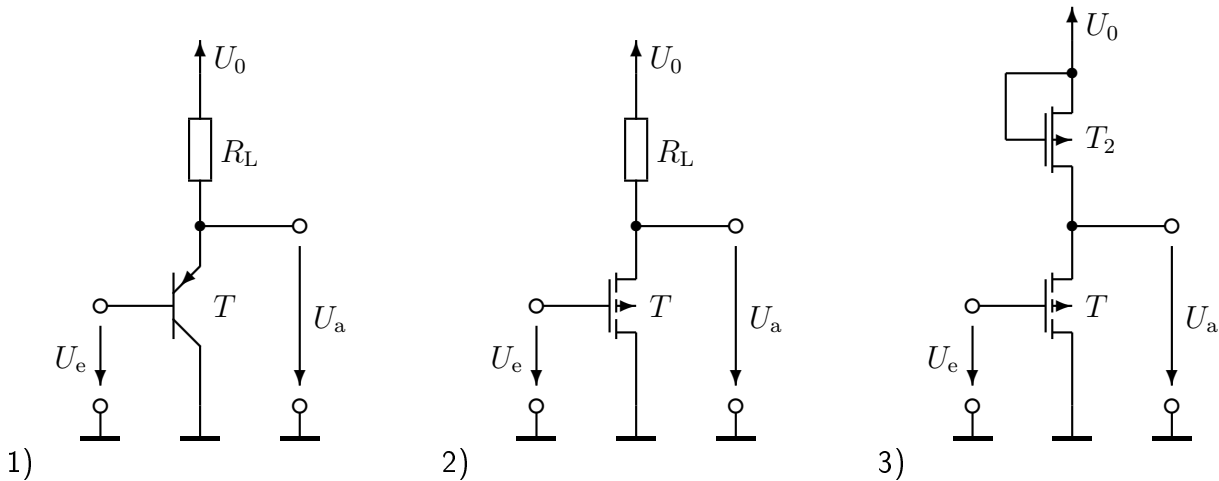
Versorgungsspannung: $U_0 = 12 \text{ V}$

Schwellspannungen: $U_{T1} = U_{T2} = 1 \text{ V}$

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

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

Bipolartransistor:

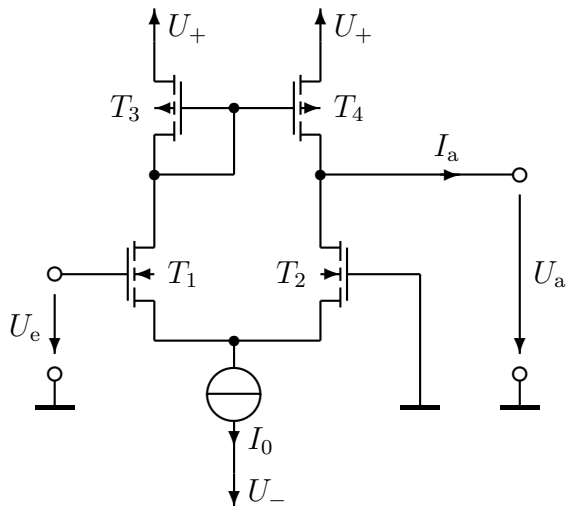
Flussspannung: $U_f = 0,6 \text{ V}$
 $\frac{dU_f}{dT} = -2 \text{ mV/K}$
 Temperaturspannung: $U_T = 25 \text{ mV}$
 Stromverstärkung: $B = 100$
 Restspannung: $U_{ECsat} = 0,1 \text{ V}$

MOSFETs:

Schwells­spannung T : $\bar{U}_T = 1 \text{ V}$
 Steuerfaktor T : $\beta = 2,5 \text{ mA/V}^2$
 $TK_\beta = -0,005 \text{ K}^{-1}$
 Schwells­spannung T_2 : $\bar{U}_{T2} = -1 \text{ V}$
 Steuerfaktor T_2 : $TK_{\beta_2} = -0,005 \text{ K}^{-1}$

- Bestimmen Sie in den Schaltungen 1 und 2 die Ausgangs-Ruhe­spannung U_{a0} . Dimensionieren Sie den Steuerfaktor β_2 von MOSFET T_2 in Schaltung 3 so, dass sich dieselbe Ausgangs-Ruhe­spannung U_{a0} wie in Schaltung 2 ergibt.
- Berechnen Sie unter Vernachlässigung der Early-Leitwerte die Spannungsverstärkung v_u .
- Berechnen Sie unter Vernachlässigung der Early-Leitwerte den Eingangswiderstand r_e .
- Berechnen Sie unter Vernachlässigung der Early-Leitwerte den Ausgangswiderstand r_a .
- Bestimmen Sie die Temperaturabhängigkeit der Ausgangs-Ruhe­spannung dU_{a0}/dT .

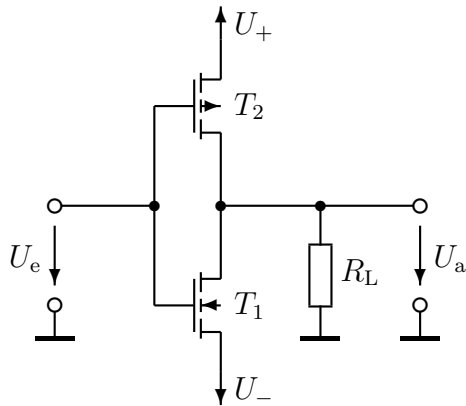
BEISPIEL 5.11: CMOS-Differenzverstärker



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

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

BEISPIEL 5.12: CMOS-Verstärker



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

Schwellspannungen: $U_{T1} = \bar{U}_{T2} = 2 \text{ V}$
Steuerfaktoren: $\beta_1 = \beta_2 = 0,1 \text{ mA/V}^2$

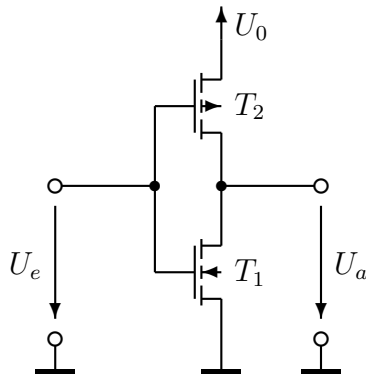
Early-Spannung: $U_Y = 33,3 \text{ V}$
($\lambda = 0,03 \text{ V}^{-1}$)

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.

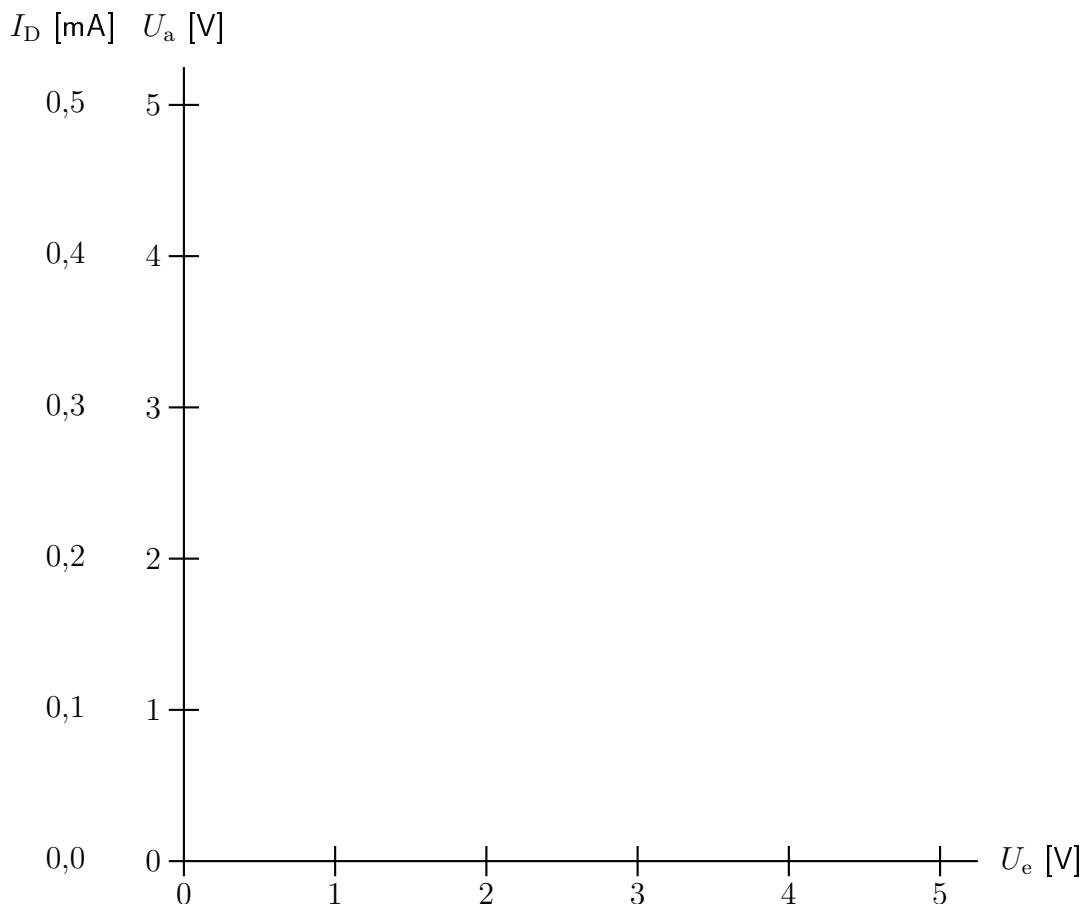
BEISPIEL 5.13: CMOS-Inverter mit ungleichen MOSFETs



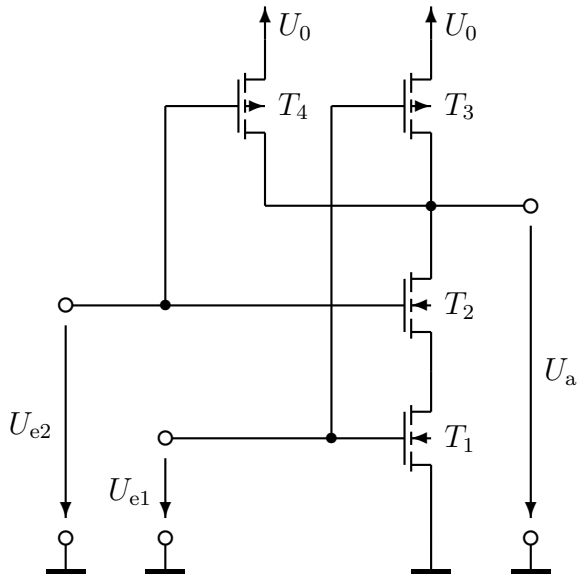
Versorgungsspannung: $U_0 = 5 \text{ V}$
 Schwellspannungen: $\bar{U}_{T2} = 1 \text{ V}$
 Steuerfaktoren: $\beta_1 = 0,9 \text{ mA/V}^2$
 $\beta_2 = 0,4 \text{ mA/V}^2$

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

- Wie muss die Schwellspannung 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.
- Skizzieren Sie den Querstrom $I_{D1} = I_{D2}$ als Funktion der Eingangsspannung. Wie groß ist sein Maximalwert $I_{D,max}$?



BEISPIEL 5.14: CMOS-NAND-Gatter



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

Schwelspannungen: $U_{T1} = U_{T2} = \bar{U}_{T3} = \bar{U}_{T4} = 1 \text{ V}$

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.