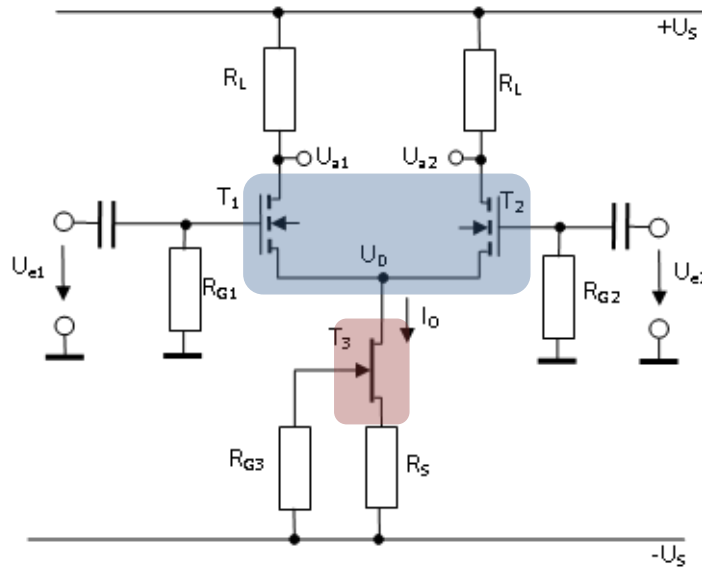


Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker



$$U_s = 15V$$

$$R_L = 5k\Omega$$

$$I_0 = 2mA$$

T1,2 n-Kanal-MOSFET

$$U_{GS0,T1,2} = +3V$$

$$\beta_{1,2} = 10^{-3} \frac{A}{V^2} \quad * s.u.!$$

$$r_{d1,2} \approx \frac{100\Omega \cdot A}{I_D}, \text{ bzw. } \lambda = 0,01 \frac{A}{V}$$

T3 n-Kanal-JFET

$$U_{GS0,T3} = -4V$$

$$\beta_3 = 10^{-3} \frac{A}{V^2}$$

$$r_{d3} \approx \frac{3000\Omega \cdot \sqrt{A}}{\sqrt{I_D}}$$

Gesucht:

- R_S
- Potential U_D an der Verbindung der Sourceanschlüsse von T_1 und T_2
- Kontrolle, ob T_3 im Pinch-off-Bereich bleibt.
- Innenwiderstand der Konstantstromquelle mit T_3
- Diskussion R_{G1}, R_{G2}, R_{G3}
- Differenzverstärkung v_D , Gleichtaktverstärkung v_G und Gleichtaktunterdrückung G
- Möglicher Bereich der Gleichakteingangsspannung, so dass die Transistoren im Pinch-off-Bereich bleiben
- Eingangsdifferenzspannung für vollständige Umsteuerung, d. h. ein Transistor übernimmt den gesamten Strom I_0 , der andere hat $I_0=0$.
- Klirrfaktor bei Ansteuerung mit $u_{eD} = \hat{u}_{eD} \cdot \sin \omega t$ mit $\hat{u}_{eD} = 1,4 V$

$$*: \beta = KP \cdot \frac{W}{L} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu \cdot \epsilon_{ox}}{d_{ox}} \cdot \frac{W}{L}$$

μ : Ladungsträgerbeweglichkeit

Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

Konstantstromquelle Berechnung von R_S

Für den JFET der Konstantstromquelle ergeben sich folgende Verhältnisse:

Das Gate liegt auf $-U_S$. Das Sourcepotenzial ist $U_{S,T3} = -U_S + I \cdot R_S$.

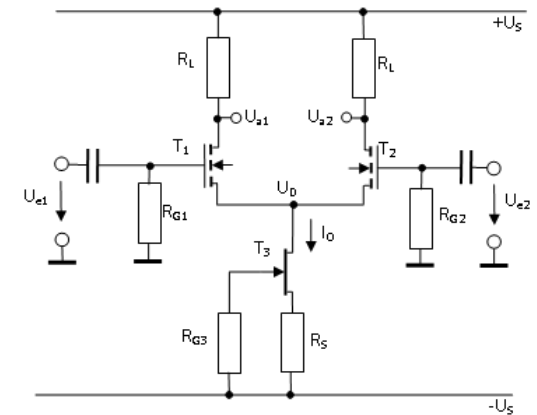
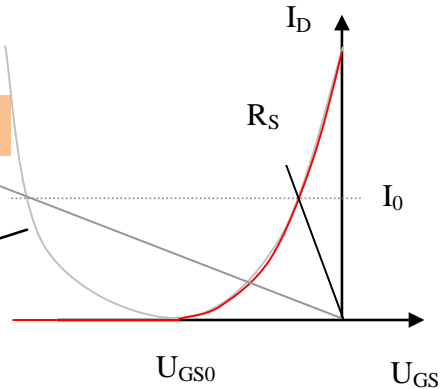
Damit ist $U_{GS,T3} = -U_S - (-U_S + I_0 \cdot R_S) = -I_0 \cdot R_S$.

Die Gleichung für den Drainstrom ist dann:

$$I_0 = \frac{\beta}{2} \cdot (-I_0 \cdot R_S - U_{GS0})^2$$

$$R_S = \frac{\pm \sqrt{\frac{2 \cdot I_0}{\beta}} - U_{GS0}}{I_0} = \frac{-\sqrt{\frac{2 \cdot I_0}{\beta}} - U_{GS0}}{I_0} = \frac{-\sqrt{\frac{2 \cdot 2 \text{mA} \cdot V^2}{1 \text{mA}}} + 4 \text{V}}{2 \text{mA}} = 1 \text{k}\Omega$$

Das Vorzeichen ergibt sich aus der Betrachtung der Übertragungskennlinie: Es ist nur ein Teil der Parabel vorhanden (rot). Dazu gehört der größere Leitwert (kleinerer Widerstand)



Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

Potenzial am Verbindungspunkt der Sourceanschlüsse der Transistoren T1 und T2:

Dabei werden symmetrische Verhältnisse vorausgesetzt, d. h. durch jeden Transistor fließt 1 mA.

Aus der Gleichung für den Drainstrom eines Transistors T1 oder T2 erhält man:

$$U_D = -U_{GS,T1} = -\sqrt{\frac{I_0 \cdot 2}{2 \cdot \beta}} - U_{GS0,T1} = -\sqrt{\frac{2mA \cdot V^2}{1mA}} - 3V = -4.41V$$

$$I_{D1} = \frac{I_0}{2}$$

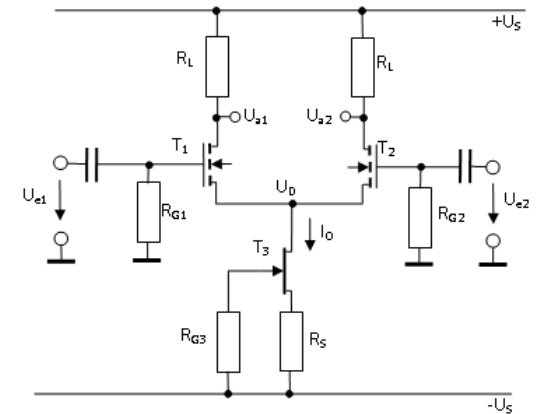
Für das Verbleiben im abgeschnürten Zustand muss $U_{DS} > U_{GS} - U_{GS0}$ sein.

Es ist für T3:

$$U_{DS} = U_D - (-U_S + I_0 \cdot R_S) = -4.41V - (-15V + 2mA \cdot 1k\Omega) = 8.59V$$

$$U_{GS} - U_{GS0} = -I_0 \cdot R_S - U_{GS0} = -2mA \cdot 1k\Omega - (-4V) = 2V$$

D.h. T3 ist zunächst sicher im abgeschnürten Bereich. Die Reserve liegt bei 6.59V. Wie wir noch sehen werden, ist das gerade der Betrag, der als negativer Gleichtaktpegel maximal zulässig ist.



Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

Für die Verstärkungsberechnung, insbesondere für die Gleichtaktverstärkung, wird der dynamische Innenwiderstand der Stromquelle benötigt.

$$U1 \cdot G + (U1 - U2) \cdot g_{d3} + S \cdot U_{GS} = 0$$

$$U2 \cdot G_S + (U2 - U1) \cdot g_{d3} - S \cdot U_{GS} = 0$$

mit $U_{GS} = -U2$

$$U1 \cdot (G + g_{d3}) + U2 \cdot (-g_{d3} - S) = 0$$

$$U1(-g_{d3}) + U2 \cdot (G_S + g_{d3} + S) = 0$$

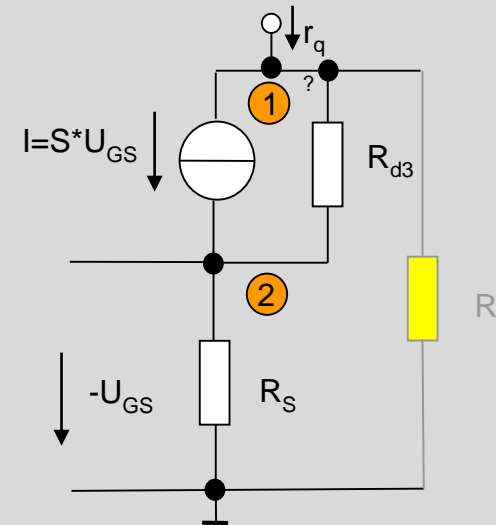
$$\Delta = (G + g_{d3}) \cdot (G_S + g_{d3} + S) - (-g_{d3}) \cdot (-g_{d3} - S)$$

$$\Delta = G \cdot (G_S + g_{d3} + S) + g_{d3} \cdot G_S$$

$$r_q = \frac{\Delta^*}{\Delta^{**}} = \frac{G_S + g_{d3} + S}{g_{d3} \cdot G_S} = \frac{1}{g_{d3}} + \frac{1}{G_S} + \frac{S}{g_{d3} \cdot G_S} = r_{d3} + R_S + S \cdot r_{d3} \cdot R_S \approx r_{d3} \cdot (1 + S \cdot R_S)$$

$$r_{ds} = \frac{300\Omega \cdot A^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{I_D}} = \frac{300\Omega \cdot A^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{2mA}} = 67k\Omega \quad S = \sqrt{2 \cdot \beta \cdot I_D} = \sqrt{2 \cdot 1mA \cdot V^{-2} \cdot 2mA} = 2mS$$

$$r_q = r_d(1 + S \cdot R_S) = 67k\Omega(1 + 2mS \cdot 1k\Omega) = 200k\Omega$$



Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

Alternative Berechnung des Innenwiderstandes der Konstantstromquelle über das totale Differential::

Für $r_q \equiv \frac{dU_D}{dI_D}$ muß das Differential dI_D berechnet werden. Da jetzt auch die Abhängigkeit von U_{DS} zu berücksichtigen ist, gilt $I_D = f(U_{GS}, U_{DS})$, so daß das totale Differential wie folgt zu berechnen ist:

$$dI_D = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} dU_{GS} + \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} dU_{DS} = S dU_{GS} + \frac{1}{r_D} dU_{DS}.$$

Es sind aber

$$dU_{GS} = -R_S dI_D \quad \text{und} \quad dU_{DS} = dU_D - R_S dI_D,$$

so daß der Quellwiderstand wird:

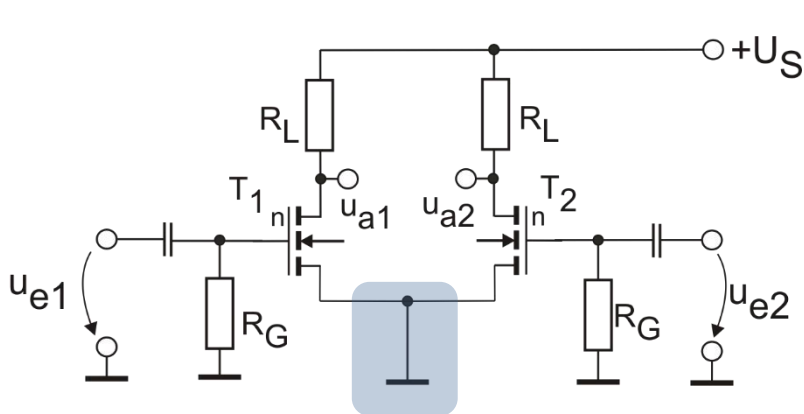
$$r_q = \left(1 + SR_S + \frac{R_S}{r_D}\right) \cdot r_D \approx (1 + SR_S) \cdot r_D$$

Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

1. Differenzverstärkung

Bei symmetrischer Aussteuerung liegt das Potenzial am Fußpunkt (Sourceverbindung T_1, T_2) immer in der Mitte zwischen den jeweiligen Spannungen an T_1 und T_2 . Dieser Punkt kann deshalb als Signalmasse für Differenzspannungen angenommen werden.



$$v_D = \frac{u_{aD}}{u_{eD}} = \frac{u_{a1}}{u_{e1}} = -S \cdot (R_L \parallel r_d)$$

$$S = \sqrt{2 \cdot \beta \cdot I_D} = \sqrt{2 \cdot 0.5 \text{ mA} \cdot V^{-2} \cdot 1 \text{ mA}} = 1.4 \text{ mS}$$

$$r_d = \frac{100 \Omega \cdot A}{I_D} = \frac{100 \Omega \cdot A}{1 \text{ mA}} = 100 \text{ k}\Omega$$

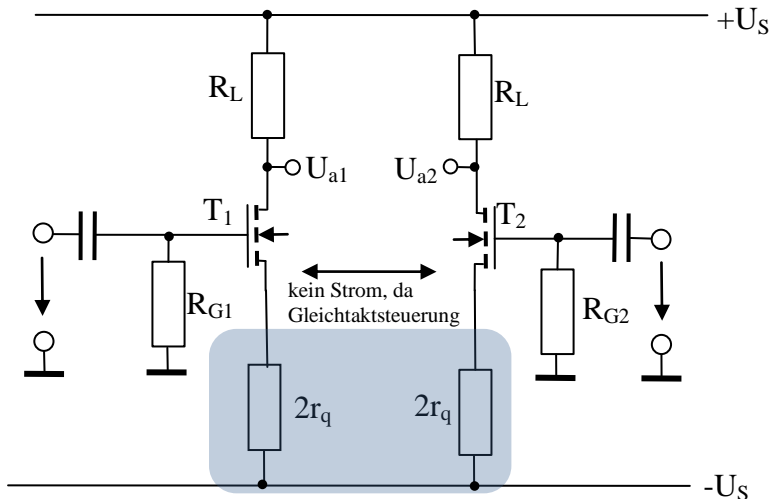
$$v_D = -1.4 \text{ mS} \cdot 5 \text{ k}\Omega \parallel 100 \text{ k}\Omega = -6.73$$

Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

1. Gleichtaktverstärkung:

Da an beiden Transistoren das Eingangspotenzial um denselben Betrag verschoben wird, werden auch alle anderen Spannungen in den Schaltungshälften gleich bleiben. Es fließt kein Strom zwischen den Hälften. Sie können geteilt und einzeln betrachtet werden. Jeder Hälfte wird von der Stromquelle der dynamische Widerstand $2r_q$ zugeordnet.



$$v_{Gl} = \frac{u_{aGl}}{u_{eGl}} = \frac{u_{aGl}}{u_{Gl}} = -\frac{R_L}{2 \cdot r_q} = -\frac{5k\Omega}{2 \cdot 200k\Omega} = -1.25 \cdot 10^{-2}$$

Das Verhältnis der Beträge von Differenzverstärkung zu Gleichtaktverstärkung nennt man Gleichtaktunterdrückung oder CMRR (Common Mode Rejection Rate). Für diesen Verstärker erhalten wir:

$$CMRR = \frac{6.73}{1.25 \cdot 10^{-2}} = 538 \quad \text{bzw.} \quad 54.6dB$$

deutsch: "Gleichtaktunterdrückungsverhältnis"

frequenzabhängig! warum?

Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

Die Gleichtaktverstärkung gibt an, wie sich die Ausgänge verhalten, wenn beide Eingänge gleichphasig mit einer Eingangsspannung belegt werden!

Gleichtakt \neq Gleichspannung !

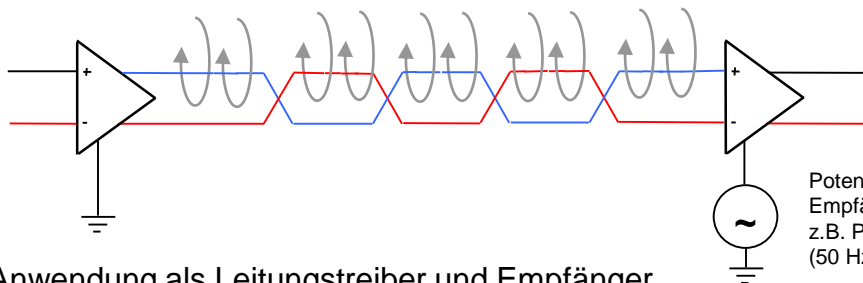
Das kann durchaus eine Wechselspannung sein!

Deshalb vermeide man hier den Gedanken an eine Gleichspannungsverstärkung und damit auch diesen Begriff!

Die beschriebene endliche Gleichtaktunterdrückung wird nicht durch Asymmetrien im Verstärker aufgrund von Parameterabweichungen der Bauelemente beider Hälften hervorgerufen.

Auch der Verstärker mit genau gleichen Hälften hat eine geringe Gleichtaktverstärkung und damit eine endliche Gleichtaktunterdrückung.

Verdrillte Leitung sorgt für Unterdrückung induzierter Störungen auf der Differenzspannung und schafft definierten Wellenwiderstand
-> Unterdrückung von Reflexionen



Potenzialdifferenz zwischen Sender und Empfänger ist Gleichtakteingangsspannung z.B. Potentialdifferenz der Netzspannung (50 Hz "Netzbrummen")

Anwendung als Leitungstreiber und Empfänger für symmetrischen Betrieb

Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

Bereich der Gleichtakteingangsspannung bei $u_{eD} = 0$

Der Verstärker arbeitet nur, solange alle Transistoren im abgeschnürten Bereich verbleiben. Dafür dürfen bestimmte Spannungen an den Transistoren nicht über- bzw. unterschritten werden.

Allgemein muss für jeden Transistor immer $U_{DS} > U_{GS} - U_{GS0}$ gelten. Für die Konstantstromquelle (T3) wurde das bereits untersucht.

Es ergab sich eine maximale **negative** Gleichtakteingangsspannung von 6.59V. Die Differenzeingangsspannung hat (fast) keinen Einfluss auf den Betrieb von T3, da die Spannung an seinem Drainanschluss nahezu konstant bleibt. Positive Gleichtakteingangsspannungen erhöhen das Drainpotential von T3, sind also unkritisch.

Für die Transistoren T1 und T2 ist die Ansteuerung mit **positiver** Gleichtakteingangsspannung zu untersuchen, da dadurch die Drain-Source-Spannung kleiner wird.

$$U_{GS} = -U_D \text{ (Potential am Fußpunkt von } T_1, T_2 \text{)}$$

$$U_{DS} = U_S - R_L \cdot \frac{I_0}{2} - (U_e - U_D) = 15V - 5k\Omega \cdot 1mA - (U_e - 4.41V)$$

$$U_{DS} = 14.41V - U_e$$

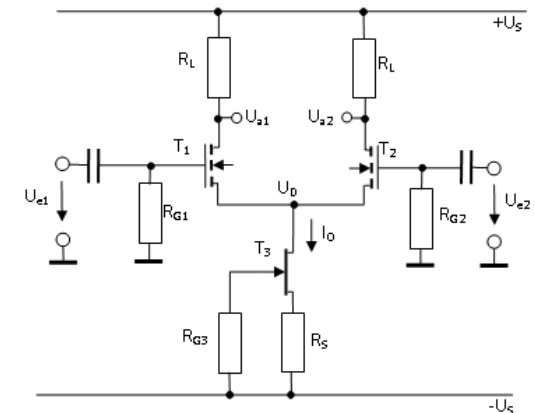
$$U_{GS} - U_{GS0} = \sqrt{\frac{I_0}{\beta}} = 1.41V$$

$$U_e < 13.1V$$

max. bei Vollaussteuerung 2 mA

$$U_{DS} = 9.41V - U_e$$

max. 2V



D.h, ohne Differenzeingangsspannung darf die Gleichtaktansteuerung zwischen -6.69 V und + 13.1 V liegen.

Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

Statische Kennlinie

Die statische Kennlinie zeigt das Großsignalverhalten und damit die maximal mögliche Aussteuerung an. Man kann daraus auch ersehen, in welchem Bereich eine lineare Übertragung erfolgt.

Angenommen wird eine Ansteuerung um an $+\Delta u$ einem und $-\Delta u$ am anderen Eingang.

Die Summe der Drainströme von T1 und T2 ist konstant $= I_0$:

$$I_{D1} + I_{D2} = I_0$$

$$\frac{\beta}{2} (\Delta u - U_D - U_{GS0})^2 + \frac{\beta}{2} (-\Delta u - U_D - U_{GS0})^2 = I_0$$

$$\beta \cdot [\Delta u^2 + (U_D - U_{GS0})^2] = I_0$$

$$U_D = -\sqrt{\frac{I_0}{\beta} - \Delta u^2} - U_{GS0}$$

Die Spannung am Verbindungspunkt der Sourceanschlüsse variiert geringfügig mit der Aussteuerung. Für einen Transistor kann jetzt der Drainstrom aufgeschrieben werden:

$$I_{D1} = \frac{\beta}{2} (\Delta u - U_D - U_{GS0})^2 = \frac{\beta}{2} \left(\Delta u - \left[-\sqrt{\frac{I_0}{\beta} - \Delta u^2} - U_{GS0} \right] - U_{GS0} \right)^2 = \frac{\beta}{2} \left(\Delta u + \sqrt{\frac{I_0}{\beta} - \Delta u^2} \right)^2$$

$$I_{D1} = \frac{\beta}{2} \left(\Delta u^2 + 2\Delta u \sqrt{\frac{I_0}{\beta} - \Delta u^2} + \left[\frac{I_0}{\beta} - \Delta u^2 \right] \right) = \frac{\beta}{2} \left(2\Delta u \sqrt{\frac{I_0}{\beta} - \Delta u^2} + \frac{I_0}{\beta} \right)$$

$$I_{D1} = \frac{I_0}{2} \left(1 + \frac{2\beta \cdot \Delta u}{I_0} \sqrt{\frac{I_0}{\beta} - \Delta u^2} \right)$$

Bei vollständiger Stromübernahme durch einen Transistor wird der Strom im anderen Transistor 0, d. h. :

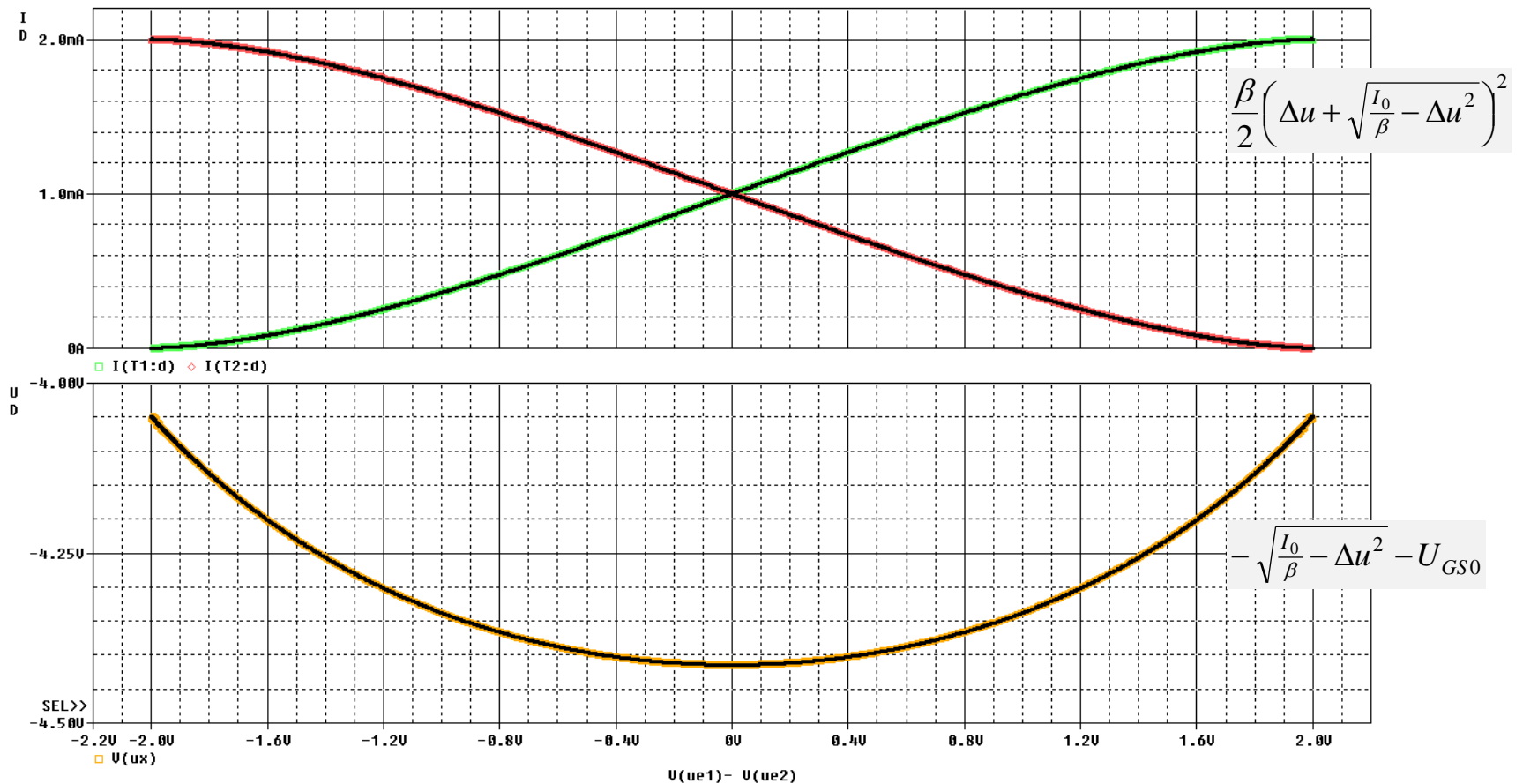
$$\Delta u + \sqrt{\frac{I_0}{\beta} - \Delta u^2} = 0$$

$$\Delta u = \sqrt{\frac{I_0}{2\beta}} = \sqrt{\frac{2 \text{ mA} \cdot \text{V}^2}{2 \cdot 1 \text{ mA}}} = 1 \text{ V}$$

U_{GS}

Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker



Stromübernahme und Spannung am Fußpunkt (Verbindung Source T1 mit Source T2).
 Man beachte, dass auf der X-Achse die Differenzeingangsspannung ($2 \cdot \Delta u$) abgetragen ist.

Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

Klirrfaktorberechnung:

Für die Klirrfaktorberechnung wird die Gleichung für den Strom herangezogen und als Eingangsspannung eine harmonische Schwingung mit der Amplitude 0.7V eingesetzt. Über eine Reihenentwicklung und die Anwendung der Umformungsregeln für Winkelfunktionen können die Amplituden der Grundwelle und der Harmonischen ermittelt werden.

Hier werden nur Oberwellen bis zur 3. bzw. 5. Harmonischen betrachtet:

$$K \approx \frac{\text{Effektivwert der Oberwellen}}{\text{Effektivwert der Grundwelle}}$$

$$I_{D1} = \frac{I_0}{2} \left(1 + \frac{2\beta \cdot \Delta u}{I_0} \sqrt{\frac{I_0}{\beta} - \Delta u^2} \right) = \frac{I_0}{2} \cdot \left(1 + \frac{2\beta}{I_0} \hat{u} \sin \omega t \sqrt{\frac{I_0}{\beta} - \hat{u}^2 \sin^2 \omega t} \right)$$

$$I_{D1} = \frac{I_0}{2} \cdot \left(1 + \frac{2\beta}{I_0} \hat{u} \sin \omega t \sqrt{\frac{I_0}{\beta} - \hat{u}^2 \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)} \right)$$

$$I_{D1} = 10^{-3} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} 0.7 \cdot \sin \omega t \sqrt{2 - \frac{0.7 \cdot 0.7}{2} (1 - \cos 2\omega t)} = 10^{-3} \cdot (1 + 0.7 \cdot \sin \omega t \sqrt{1.75 - 0.25 \cos 2\omega t}) \right)$$

$$I_{D1} = 10^{-3} \cdot \left(1 + 0.7 \cdot \sin \omega t \sqrt{1.75} \sqrt{1 - \frac{0.25}{1.75} \cos 2\omega t} = 10^{-3} \cdot (1 + 0.926 \cdot \sin \omega t \sqrt{1 - 0.143 \cdot \cos 2\omega t}) \right)$$

Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

$$I_{D1} = 10^{-3} \cdot (1 + 0.7 \cdot \sin \omega t \sqrt{1.75} \sqrt{1 - \frac{0.25}{1.75} \cos 2\omega t}) = 10^{-3} \cdot (1 + 0.926 \cdot \sin \omega t \sqrt{1 - 0.143 \cdot \cos 2\omega t})$$

Die Wurzelfunktion wird in eine Reihe zerlegt:

$$\sqrt{1+x} = 1 + \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} + \dots \text{ für } |x| < 1$$

$$I_{D1} = 10^{-3} \cdot (1 + 0.926 \cdot \sin \omega t (1 - 0.071 \cdot \cos 2\omega t + 0.0026 \cos^2 2\omega t))$$

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2} (1 + \cos 2\alpha)$$

$$I_{D1} = 10^{-3} (1 + 0.926 \cdot \sin \omega t (1 - 0.071 \cdot \cos 2\omega t + 0.0026 \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos 4\omega t)))$$

$$I_{D1} = 10^{-3} (1 + 0.927 \cdot \sin \omega t + 0.066 \sin \omega t \cos 2\omega t + 0.0013 \sin \omega t \cos 4\omega t)$$

$$\sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} (\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta))$$

$$I_{D1} = 10^{-3} (1 + 0.927 \cdot \sin \omega t + 0.0335 \sin(-\omega t) + 0.0335 \sin(3\omega t) + 0.00065 \sin(-3\omega t) + 0.00065 \sin(5\omega t))$$

$$\sin(-\alpha) = -\sin \alpha$$

$$I_{D1} = 10^{-3} (1 + 0.927 \cdot \sin \omega t - 0.0335 \sin(\omega t) + 0.0335 \sin(3\omega t) - 0.00065 \sin(3\omega t) + 0.00065 \sin(5\omega t))$$

$$I_{D1} = 10^{-3} (1 + 0.894 \cdot \sin \omega t + 0.03285 \sin(3\omega t) + 0.00065 \sin(5\omega t))$$

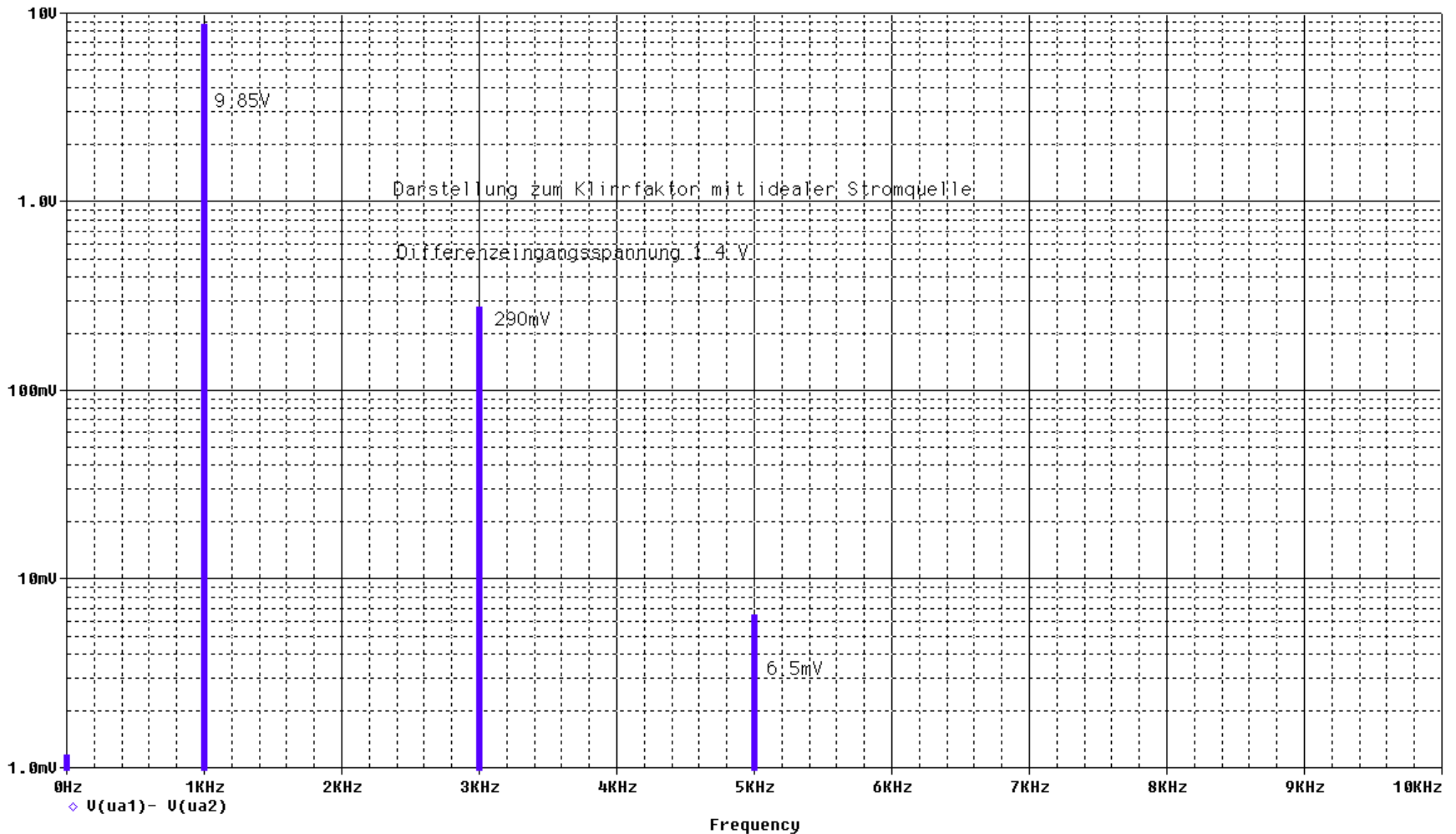
$$\text{Zähler für Klirrfaktor: } Z = \sqrt{0.03285^2 + 0.00065^2} = 0.03286$$

Nur ungerade Oberwellen

$$K \approx \frac{0.03286}{0.894} = 0.0367 = 3.67\%$$

Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

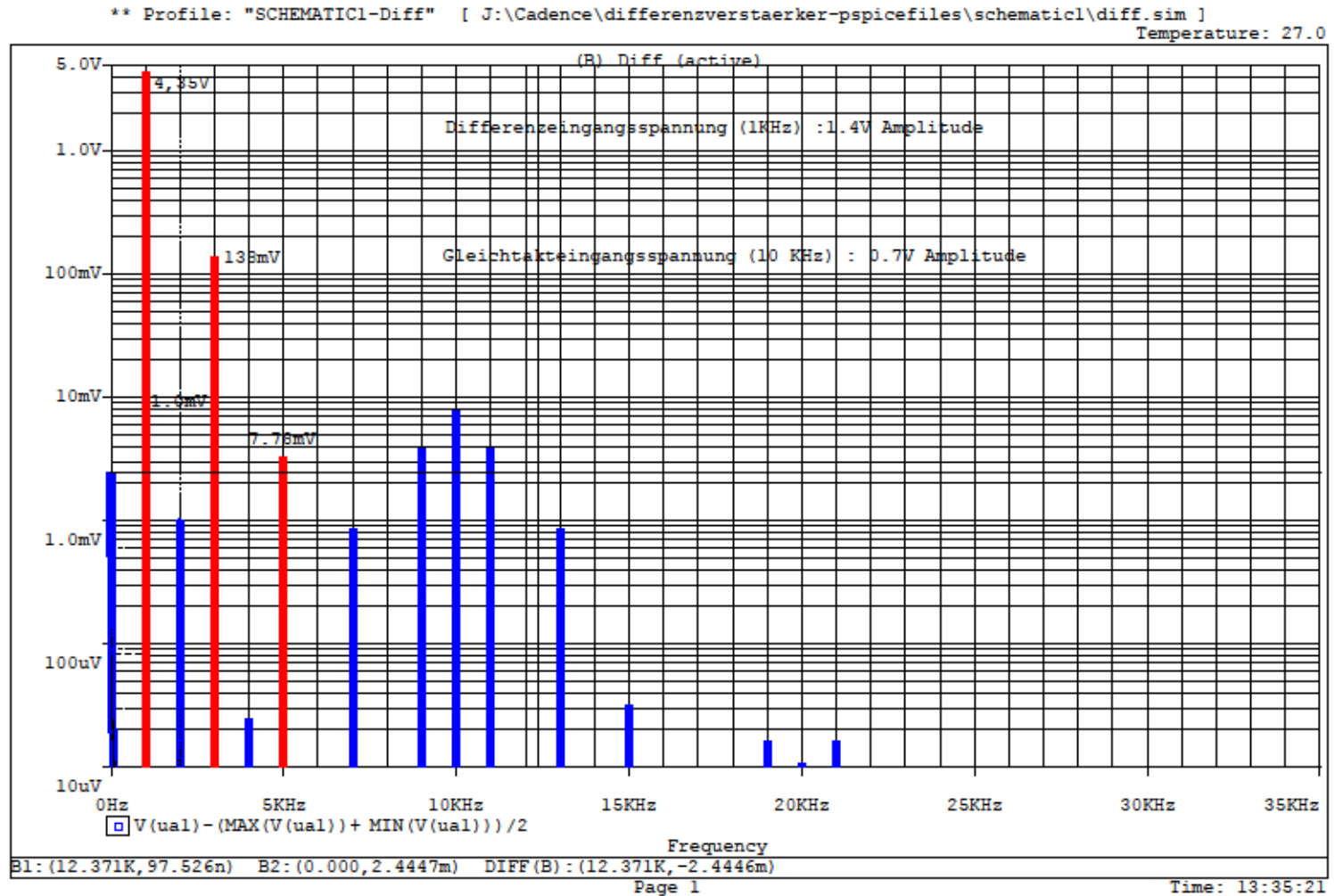
Differenzverstärker



Fourieranalyse des Ausgangs bei 1KHz und einer Amplitude von 1.4V Differenzeingangsspannung aus einer Simulation mit PSpice

Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker



Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

Schritte zum integrierten Differenzverstärker

Differenzverstärker mit Stromspiegel als Quelle

$$I_{D4} = \frac{\beta}{2} (2U_s - I_D R_0 - U_{GS04})^2$$

Für Transistoren eines Typs auf einem Chip (KP und λ identisch)

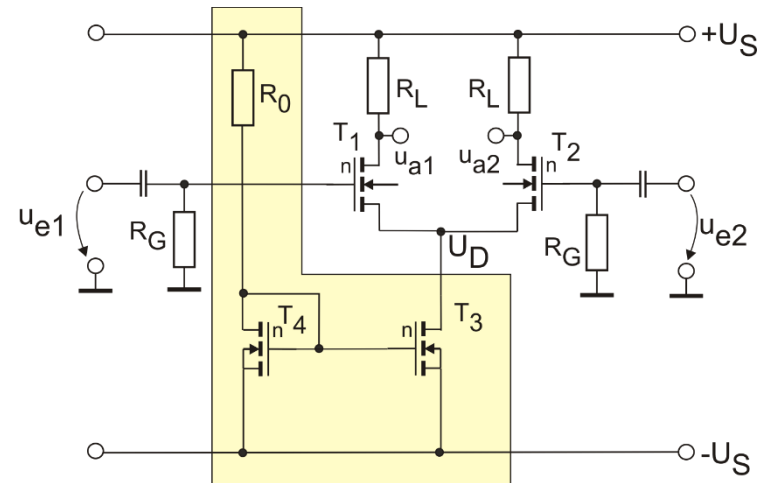
mit $\beta = KP \cdot \frac{W}{L}$

$$I_{DT4} = \frac{\beta_4}{2} (2U_s - I_D R_0 - U_{GS0})^2$$

$$I_{DT3} = \frac{\beta_3}{2} (2U_s - I_D R_0 - U_{GS0})^2$$

$$I_{DT4} = I_{DT3} \frac{\frac{\beta_4}{2}}{\frac{\beta_3}{2}} = I_{DT3} \frac{\frac{W_4}{L_4}}{\frac{W_3}{L_3}}$$

$$\frac{I_{DT3}}{I_{DT4}} = \frac{W_3/L_3}{W_4/L_4}$$



Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

$$U_{GS} - U_{GS0} = U_{DSsat} = \sqrt{\frac{2 \cdot I_{D3}}{\beta}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2mA \cdot V^2}{1mA}} = 2V$$

$$I_{D3} = \frac{\beta_3}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2$$

$$U_{GS} = \sqrt{\frac{I_{D3}}{\frac{\beta_3}{2}}} + U_{GS0}$$

$$I_{D4} = \frac{\beta_4}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2$$

$$R_0 = \frac{(2U_S - U_{GS})}{I_{D4}}$$

$$\beta = KP \cdot \frac{W}{L}$$

$$U_{GS0} = 3V$$

$$KP = 2000 \frac{\mu A}{V^2}$$

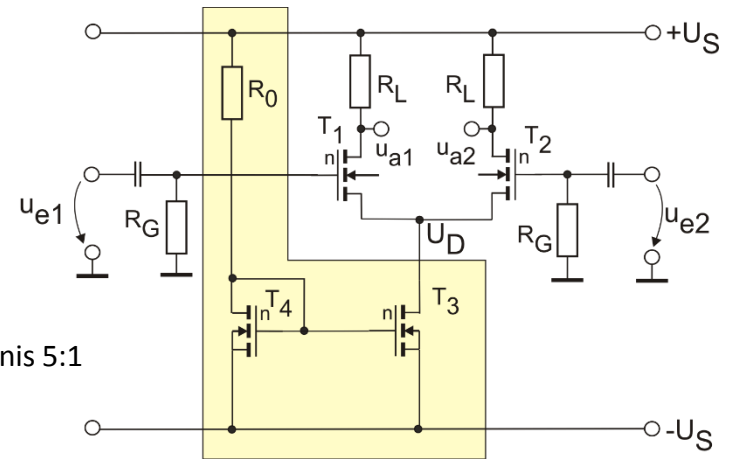
$$\lambda = 0.01$$

$$W_3 = 5 L_3 = 10$$

$$W_4 = 1 L_4 = 10$$

$$U_{GS} = \sqrt{\frac{2 mA V^2}{0,5mA}} + 3V = 5V$$

$$I_{D4} = 0,1 \frac{mA}{V^2} (5V - 3V)^2 = 0,4mA$$



Stromverhältnis 5:1

Abschnürbedingung(Aussteuerung):

$$U_{DS3} > U_{GS} - U_{GS0}$$

$$U_{DS3} > 5V - 3V$$

$$U_{DS3} > 2V$$

$$U_D > -15V + 2V$$

$$U_D > -13V$$

$$R_0 = \frac{(2 \cdot 15V - 5V)}{0,4mA} = 62,5 k\Omega$$

Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

Differenzverstärker mit Stromspiegel als Quelle und als Last

$$I_{D6,7} = \frac{\beta}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2$$

$$I_{D6,7} = \frac{\beta}{2} (U_S - U_{aAP} - U_{GS0})^2$$

Danach können die β und damit die $\frac{W}{L}$ für T6 und T7 eingestellt werden.

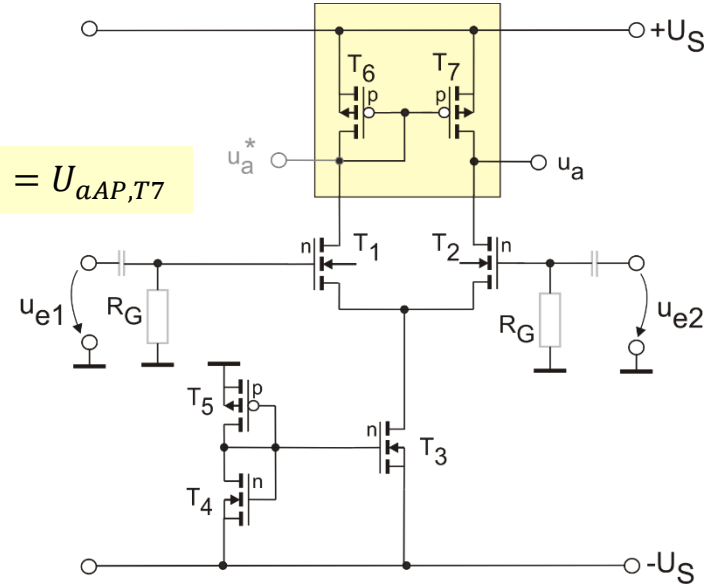
$$\beta = \frac{2 \cdot I_{D6,7}}{(U_S - U_{aAP} - U_{GS0})^2}$$

$$\beta_{6,7} = \frac{2 \text{ mA}}{(15V - 10V - 3V)^2} = 0,25 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

$$\frac{W_{T6,7}}{L_{T6,7}} = \frac{\beta}{KP} = \frac{2 \cdot I_{D6,7}}{KP \cdot (U_{aAP} - U_{GS0})^2}$$

$$\frac{W_{T6,7}}{L_{T6,7}} = 2 \frac{0,25 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}}{2 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}} = 0,25$$

$$U_{aAP,T6} = U_{aAP,T7}$$



$$v = S_{T2}(r_{DS7} || r_{DS2})$$

$$v = \sqrt{2 \cdot \beta_2 \cdot I_{D2}} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_7 \cdot I_{D7}} || \frac{1}{\lambda_2 \cdot I_{D2}} \right)$$

Für alle $\lambda = 0.01$

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{1 \text{ mA}}{\text{V}^2} \cdot 1 \text{ mA}} \cdot \frac{V}{2 \cdot 0,01 \cdot 1 \text{ mA}} = 70,7$$

entspr. $R_L = 50 \text{ k}\Omega$

Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

Kaskode-Stromspiegel mit hohem Innenwiderstand

Für T31:

$$dI_{D30,31} = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} dU_{GS31} + \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} dU_{DS31} = S dU_{GS31} + \frac{1}{r_{D31}} dU_{DS31}$$

$$dU_{GS31} = -r_{D30} dI_D \quad dU_{DS31} = dU_D - r_{D30} dI_D$$

$$dI_D = -S \cdot r_{D30} dI_D + \frac{1}{r_{D31}} (dU_D - r_{D30} dI_D)$$

$$r_{D30} = r_{D31} = r_D$$

$$dI_D = -S \cdot r_D dI_D + \frac{1}{r_D} dU_D - dI_D$$

$$dI_D (2 + S r_D) = \frac{1}{r_D} dU_D$$

$$2 \frac{mA}{V} \cdot 50 k\Omega = 100$$

$$r_q = \frac{dU_D}{dI_D} = r_D (2 + S \cdot r_D) \approx S \cdot r_D^2$$

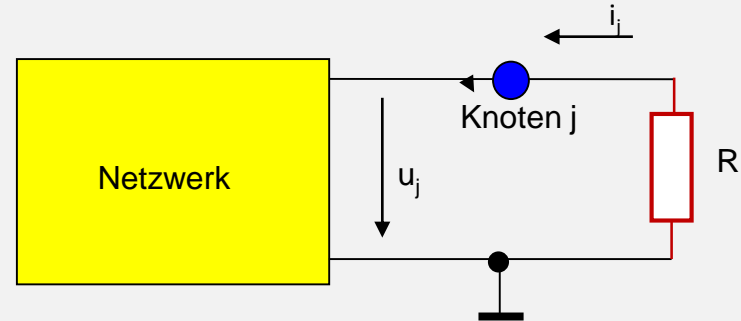
$$r_q = 2 \sqrt{2 \cdot I_{D30,31}} \cdot \left(\frac{1}{\lambda \cdot I_{D30,31}} \right)^2 = \sqrt{2 \cdot 1 \frac{mA}{V^2} \cdot 2 mA} \cdot \left(\frac{1}{0.01 \cdot 2 mA} \right)^2 = 5 M\Omega$$

Die Werte der in der Übung verwendeten Transistoren und Arbeitspunkte weichen stark von den in integrierter Technik verwendeten ab. Man beachte, dass z. B. eine Verkleinerung des Stroms um den Faktor 10 bereits eine r_q -Erhöhung um den Faktor 100 bewirkt.

Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker

Zu bestimmen ist der Innenwiderstand
des Netzwerkes:



Die Knotenspannungsanalyse führt für $n+1$ Knoten (einschließlich Masse) auf die Gleichung:

$$\begin{bmatrix} y_{11} & \dots & y_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ y_{n1} & \dots & y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \\ \dots \\ i_n \end{bmatrix}$$

Die Spannung u_j am Knoten j wird berechnet durch die Division der Determinanten Δ_j , die nach Ersatz der Spalte j durch die Absolutwerte (Stromquellen) errechnet wird, durch die Systemdeterminante Δ .

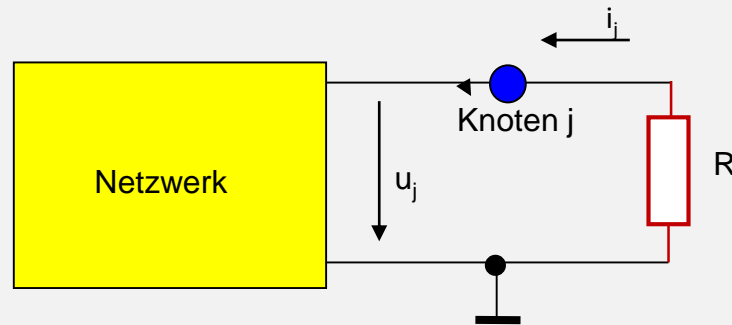
$$u_j = \frac{\Delta_j}{\Delta}$$

Der Leitwert zwischen einem beliebigen Knoten j und Masse steht **nur** in der Hauptdiagonalen an der Stelle jj in der Matrix. Masse als $(n+1)$. Knoten taucht nicht im Spannungsvektor und in der Matrix auf.

D. h. $G = \frac{1}{R}$ ist in Δ_j gar nicht und in Δ linear enthalten.

Übung Grundlagen der Schaltungstechnik

Differenzverstärker



Damit ist folgende Zerlegung möglich: $\Delta = G \cdot \Delta^* + \Delta^{**}$

Und die Gleichung für u_j kann geschrieben werden als:

$$u_j = \frac{\Delta_j}{G \cdot \Delta^* + \Delta^{**}} \quad \text{mit } G = \frac{-i}{u_j}$$

$$u_j = \frac{\Delta_j}{-\frac{i}{u_j} \cdot \Delta^* + \Delta^{**}} \quad \text{umgestellt nach } u_j$$

$$u_j = \frac{\Delta_j}{\Delta^{**}} + i \cdot \frac{\Delta^*}{\Delta^{**}} \quad \text{und der innere Ersatzwiderstand des Netzwerkes ist:}$$

$$r_i = \frac{\partial u_j}{\partial i} = \frac{\Delta^*}{\Delta^{**}}$$

Man schalte einen Widerstand R (Leitwert G) vom zu untersuchenden Ein- oder Ausgang gegen Masse, erstelle die Systemdeterminante für die Knotenspannungsanalyse und zerlege diese in den von G abhängigen und den unabhängigen Teil.
Der Quotient ist der Innenwiderstand der untersuchten Schaltung.