

Fachbereich Elektrotechnik

Praktikum Elektronik 2



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Versuch: Stromquelle und Stromspiegel	Parallelgruppe:	Datum:	Antestat:
Teilnehmer:			Abtestat:

(Name)		(Vorname)	

Einleitung

Durchführung des Praktikums

Die Vorbereitenden Aufgaben sind vor dem Beginn des Praktikums zu bearbeiten und zu dokumentieren. Um eine saubere Dokumentation zu gewährleisten, sollten Sie nach Möglichkeit ein Textverarbeitungsprogramm wie Word, LibreOffice oder Latex verwenden. Sie werden im Laufe Ihres Studiums noch weitere Protokolle und Ausarbeitungen erstellen müssen, daher empfiehlt es sich, frühzeitig in die gängigen Tools einzuarbeiten. **Die Dokumentation der Vorbereitung ist vorab (mindestens 7 Tage vor dem Versuchstermin) über das Ilias-Portal einzureichen und obligatorisch für die Versuchsteilnahme (Antestat).**

Stromspiegel

Eine Stromquelle (current source) liefert einen konstanten Ausgangsstrom und wird überwiegend zur Arbeitspunkteinstellung eingesetzt. Ein Stromspiegel (current mirror) liefert am Ausgang eine verstärkte oder abgeschwächte Kopie des Eingangsstroms, arbeitet also als stromgesteuerte Stromquelle. Man kann jeden Stromspiegel auch als Stromquelle betreiben, indem man den Eingangsstrom konstant hält; in diesem Zusammenhang ist die Stromquelle ein spezieller Anwendungsfall des Stromspiegels. So werden integrierte Stromquellen üblicherweise mit Stromspiegeln realisiert. Der einfachste Stromspiegel besteht aus zwei Transistoren sowie zwei optimalen Widerständen zur Stromgegenkopplung. Der Name Stromspiegel resultiert daher, dass sich von einem einstellbaren Referenzstrom der Ausgangsstrom nahezu unabhängig von der Last ableiten lässt.

Stromquellen

Die Ausgangskennlinien eines Bipolartransistors und eines MOSFETs verlaufen in einem weiten Bereich nahezu horizontal; der Kollektor- bzw. Drainstrom hängt in diesem Bereich praktisch nicht von der Kollektor-Emitter- bzw. Drain-Source-Spannung ab (vergl. Abbildung 1). Daher kann man einen einzelnen Transistor als Stromquelle einsetzen, indem man eine konstante Eingangsspannung anlegt und den Kollektor- bzw. Drainanschluss als Ausgang verwendet.

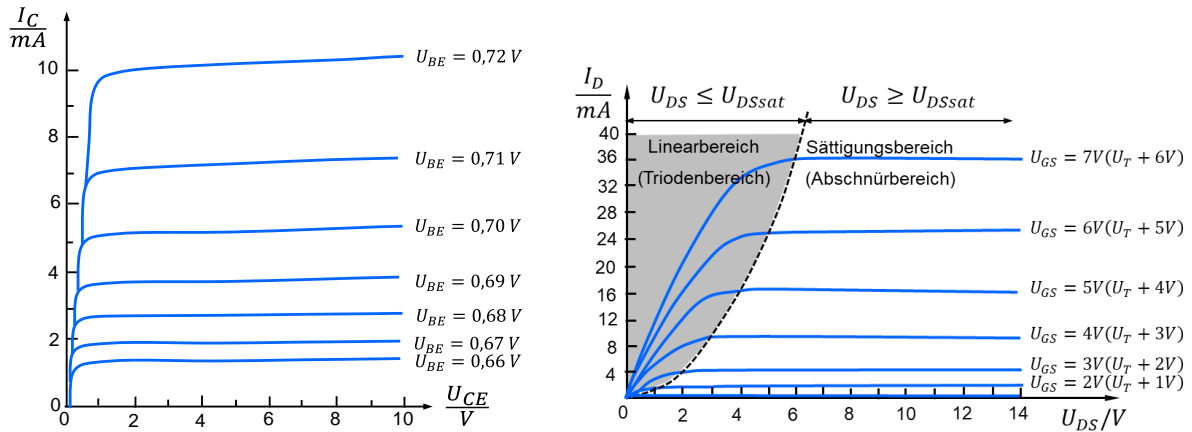


Abbildung 1: Ausgangskennlinienfelder: Bipolartransistor (links), MOSFET (rechts)

Für einen stabilen Betrieb ist allerdings eine zusätzliche Stromgegenkopplung empfehlenswert, damit der Ausgangsstrom trotz fertigungs- und temperaturbedingter Schwankungen der Transistor-Parameter konstant bleibt.

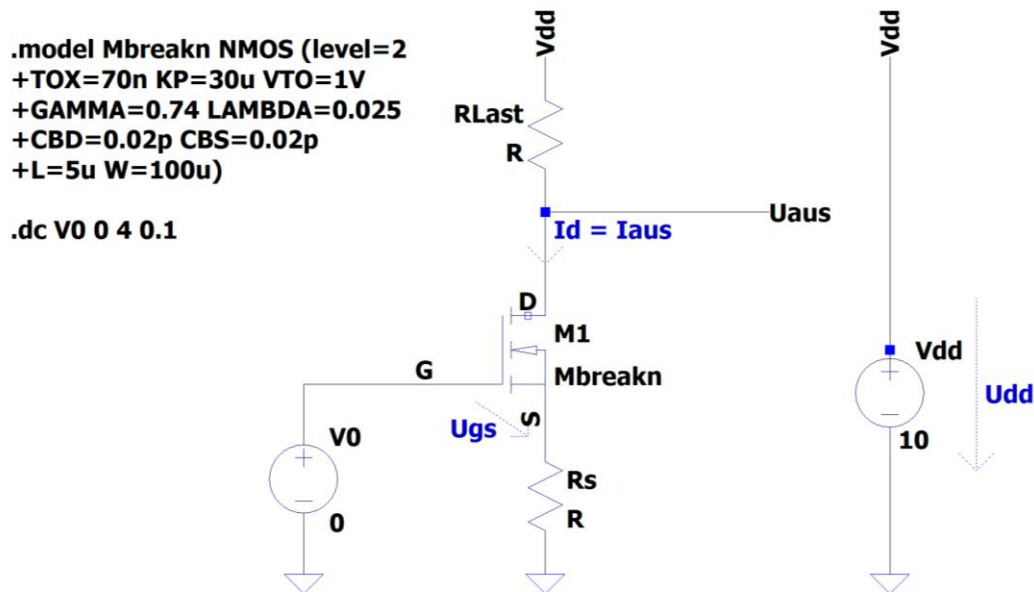


Abbildung 2: MOSFET-Stromquelle mit Gegenkopplung

Damit erhält man die in Abbildung 2 gezeigten Schaltungen. Am Ausgang der Stromquelle muss eine Last angeschlossen sein, durch die der Strom I_{aus} fließen kann. Der Drainstrom bildet somit den Ausgangsstrom: $I_D = I_{aus}$

Die Spannung V_0 teilt sich auf in die Komponenten U_{GS} und U_{RS} :

$$V_0 = U_{RS} + U_{GS} = I_{aus}R_S + U_{GS} = I_{aus}R_S + U_T + \sqrt{\frac{2I_{aus}}{\beta}}$$

Im Kleinsignalfall erhält man für den Ausgangswiderstand aufgrund der Stromgegenkopplung:

$$r_{aus} = \left. \frac{u_{aus}}{i_{aus}} \right|_{V_0=const.} \quad r_{DS} \gg 1/g_m \quad \approx \quad r_{DS}(1 + (g_m)R_S)$$

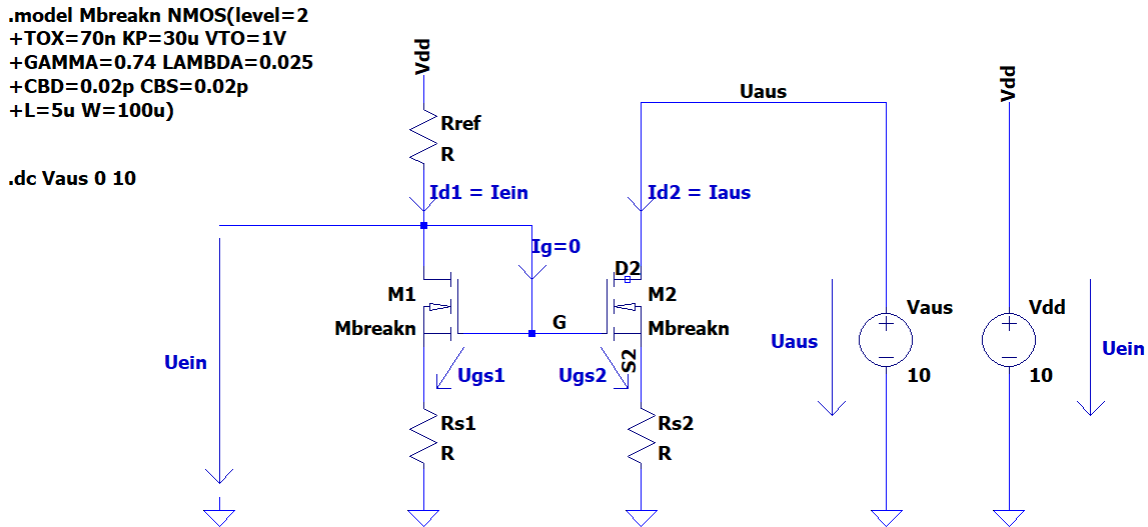


Abbildung 3: MOSFET-Stromspiegel mit Stromgegenkopplung

MOSFET-Stromspiegel

Abbildung 3 zeigt die Ströme und Spannungen beim einfachen Stromspiegel mit n-Kanal-MOSFET. Im angestrebten Arbeitsbereich und für die korrekte Funktion des Stromspiegels arbeiten beide MOSFETs im Sättigungsbereich und es gilt:

$$I_{D1} = \frac{\beta_1}{2} (U_{GS1} - U_T)^2$$

$$I_{D2} = \frac{\beta_2}{2} (U_{GS2} - U_T)^2 (1 + \lambda \cdot U_{DS2,eff})$$

Dabei wird bei Transistor M1 die Kanallängenmodulation bzw. der Early-Effekt¹ wegen $\lambda U_{DS1,eff} = \lambda (U_{GS1} - U_{th}) \ll 1$ vernachlässigt. Da bei MOSFETs kein Gatestrom fließt, entsprechen die Ströme am Ein- und Ausgang den Drainströmen: $I_{ein} = I_{D1}$ und $I_{aus} = I_{D2}$

Der Ausgangsstrom eines Stromspiegels sollte idealerweise nur vom Eingangsstrom und nicht von der Ausgangsspannung abhängen; daraus folgt, dass der Kleinsignal-Ausgangswiderstand

$$r_{aus} = \left. \frac{dU_{aus}}{dI_{aus}} \right|_{I_{ein}=const.} = \left. \frac{u_{aus}}{i_{aus}} \right|_{i_{ein}=0}$$

möglichst groß sein sollte. Man kann ihn aus der Steigung der Ausgangskennlinie im Arbeitsbereich oder mit Hilfe des Kleinsignalersatzschaltbilds ermitteln. Dabei wird der Eingang mit einer idealen Stromquelle angesteuert (siehe Abbildung 4). Während beim einfachen Stromspiegel ohne Gegenkopplung ($R_{S2} = 0$) eine konstante Gate-Source-Spannung U_{GS2} für einen hohen Ausgangswiderstand r_{DS2} sorgt, ist durch den Widerstand R_{S2} an der Source des zweiten Transistors U_{GS2} hier nicht mehr konstant, denn es gilt:

¹ Die Begriffe *Early-Effekt* und *Kanallängenmodulation* wurden im Modul Elektronik 1, Kapitel 3 *Bipolartransistoren* und Kapitel 4 *Feldeffekttransistoren* eingeführt bzw. erklärt.

$$U_{GS2} = U_{GS1} - I_{D2} \cdot R_{S2}$$

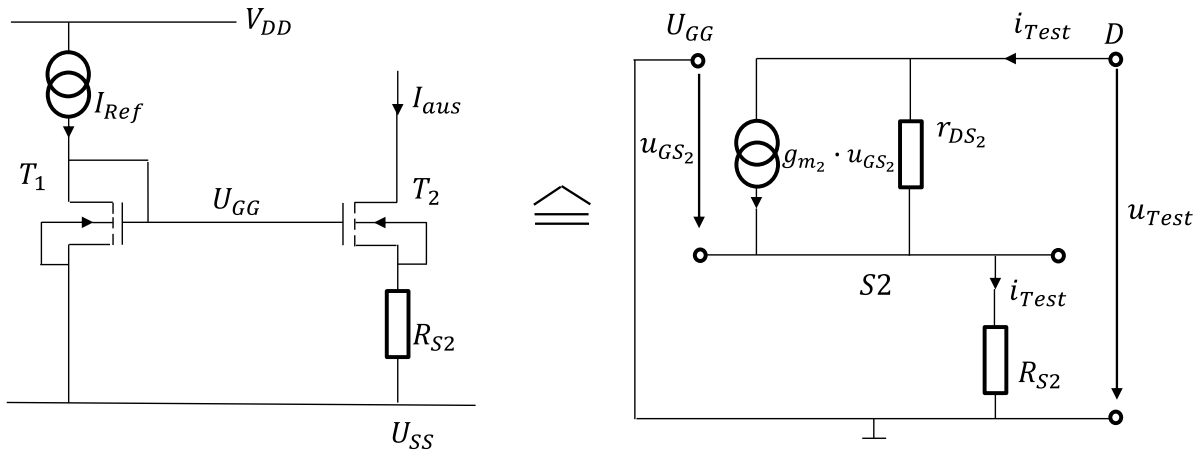


Abbildung 4: Stromspiegel mit Gegenkopplung (links) und das zugehörige Kleinsignal ESB (rechts)

Hiermit wird das Ziel verfolgt, dass bei einer Änderung des Drain-Potentials der Drainstrom möglichst konstant bleibt. Das wird hier durch einen Rückkopplungs- bzw. Gegenkopplungseffekt erreicht. Das Gatepotential des ersten Transistors U_{GG} kann als konstant angesehen und damit im Kleinsignalersatzschaltbild rechts auf Masse gelegt werden (vergleiche Abbildung 4 rechts). Für diese Schaltung soll nun der Ausgangswiderstand ermittelt werden. Dazu wird am Ausgang ein Teststrom i_{Test} eingeprägt und berechnet, wie groß hierdurch die Spannungsänderung u_{Test} ist:

$$\begin{aligned} u_{Test} &= (i_{Test} - g_{m2} \cdot u_{GS2}) \cdot r_{DS2} + R_{S2} \cdot i_{Test} \\ u_{GS2} + R_{S2} \cdot i_{Test} &= 0 \\ \Rightarrow r_{aus} &= \frac{u_{Test}}{i_{Test}} = (1 + g_{m2} \cdot R_{S2}) \cdot r_{DS2} + R_{S2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{mit } g_{m2} \cdot R_{S2} \gg 1: & \quad \approx g_{m2} \cdot R_{S2} \cdot r_{DS2} + R_{S2} \\ \text{mit } g_{m2} \cdot r_{DS2} \gg 1: & \quad \approx g_{m2} \cdot R_{S2} \cdot r_{DS2} \end{aligned}$$

Der bisherige Ausgangswiderstand r_{DS2} ist also in dieser Schaltung um den Faktor $g_{m2}R_{S2}$ verstärkt. Dieser Effekt lässt sich auch qualitativ erklären: Eine Erhöhung der Ausgangsspannung erzeugt einen größeren Strom I_{D2} . Das führt zu einem größeren $U_{RS2} = I_{D2} \cdot R_{S2}$. Da U_{GG} konstant ist, wird damit U_{GS2} kleiner. Das wirkt der Erhöhung von I_{D2} entgegen (Gegenkopplung):

$$U_{out} \uparrow \Rightarrow I_{D2} \uparrow \Rightarrow U_R \uparrow \Rightarrow U_{GS2} \downarrow \Rightarrow I_{D2} \downarrow$$

Versuchsvorbereitung

Verwendete Transistoren

Für die Berechnungen entnehmen Sie die Transistorparameter bitte dem in Abbildung 2 dargestellten Spice-Modell. Beispielsweise ergibt sich

$$\beta = K \cdot \frac{W}{L} = 600 \frac{\mu A}{V^2}$$

Es handelt sich hierbei um das gleiche Transistormodell, das bereits in der Übung 4 *Feldeffektransistoren* in der Vorlesung Elektronik 1 behandelt wurde. Eine Aufschlüsselung der einzelnen Parameter ist auf der Seite <http://ltwiki.org> dargestellt².

MOSFET-Stromquelle

- Bestimmen Sie rechnerisch die Spannung V_0 für die Stromquelle in Abbildung 2, sodass für $R_S = 0\Omega$ ein Ausgangsstrom von $0,5mA$ fließt.
- Wie klein ist demnach die minimale Ausgangsspannung $U_{aus,min}$, bei der die Stromquelle noch korrekt funktioniert? Es gilt weiterhin $R_S = 0\Omega$.
- Überprüfen Sie Ihre Ergebnisse aus a) und b), indem Sie mittels LTspice die Ausgangskennlinie im Bereich von $0V$ bis $10V$ für die berechnete Spannung V_0 bestimmen (DC-Simulation). Stimmen i_{aus} und $U_{aus,min}$ mit den Berechnungen überein?
- Welchen maximalen Widerstandswert darf die Last R_{Last} bei $R_S = 0\Omega$ nicht überschreiten?
- Wie verändern sich die Werte für V_0 , die minimale Ausgangsspannung $U_{aus,min}$ und den maximalen Lastwiderstandswert R_{Last} bei einem Gegenkopplungswiderstand von $R_S = 1k\Omega$?
- Überprüfen Sie Ihre Ergebnisse aus e), indem Sie mittels LTspice die Ausgangskennlinie im Bereich von $0V$ bis $10V$ für die berechnete Spannung V_0 bestimmen (DC-Simulation). Stimmen i_{aus} und $U_{aus,min}$ mit den Berechnungen überein?

n-Kanal-Stromspiegel

- Ist die Beziehung $I_{D1}R_{S1} + U_{GS1} = I_{D2}R_{S2} + U_{GS2}$ bezüglich der Schaltung in Abbildung 3 abhängig von den Betriebszuständen der Transistoren (Sättigungs-/ Sperr-/ Linearbereich)?
- Berechnen Sie für die in Abbildung 3 dargestellte Stromspiegelschaltung das Übersetzungsverhältnis $\frac{I_{aus}}{I_{ein}}$ unter der Annahme $R_{S1} = R_{S2} = 0\Omega$.
- Bestimmen Sie rechnerisch unter der Annahme $R_{S1} = R_{S2} = 0\Omega$ den Widerstand R_{Last} , sodass sich ein Strom $I_{ein} = 0,5mA$ einstellt.
- Von welchen Transistorparametern wird die minimale Ausgangsspannung $U_{aus,min}$ bestimmt? Wie müssen die Transistoren geometrisch angepasst werden um die minimale Ausgangsspannung zu verringern?
- Simulieren Sie mittels LTspice die Ausgangskennlinie der Stromspiegelschaltung aus Abbildung 3 unter der Annahme $R_{S1} = R_{S2} = 0\Omega$, $V_{DD} = 10V$ und variieren Sie die Ausgangsspannung U_{aus} im Bereich 0 bis $10V$.

² http://ltwiki.org/LTspiceHelp/LTspiceHelp/M_MOSFET.htm

n-Kanal-Stromspiegel mit Gegenkopplung

- l) Passen Sie in Abbildung 3 den Widerstand R_{Last} so an, dass sich bei $R_{S1} = R_{S2} = 10k\Omega$ ein Strom $I_{ein} = 0,5mA$ ergibt. Simulieren Sie die Stromspiegelschaltung unter der Annahme $V_{DD} = 10V$ und variieren Sie die Ausgangsspannung U_{aus} im Bereich bis 10 V.
- m) Vergleichen Sie das Ergebnis mit den Ergebnissen aus Teilaufgabe j) (Stromspiegel ohne Gegenkopplung).

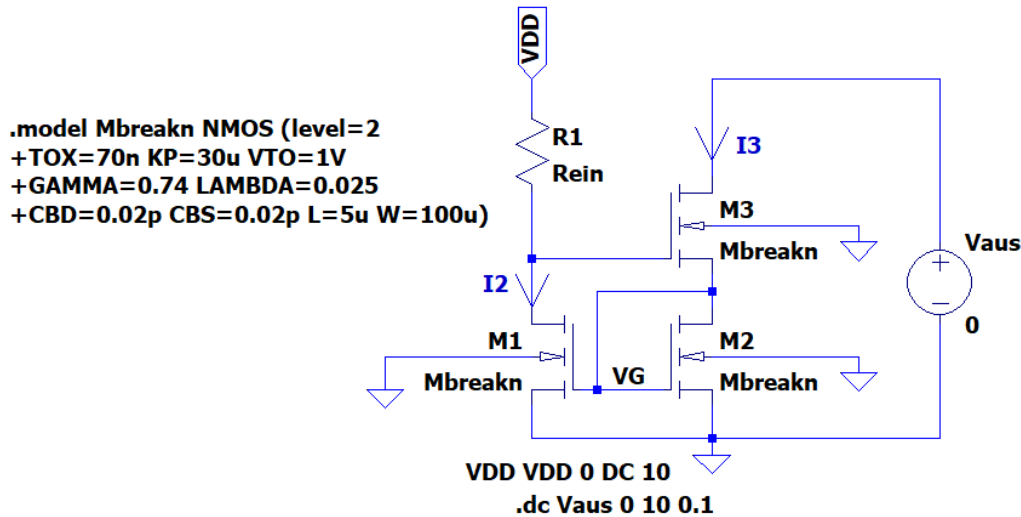


Abbildung 5: Wilson Stromspiegel

- n) Entfernen Sie die Gegenkopplungswiderstände R_{S1} und R_{S2} und erweitern Sie den Stromspiegel aus Abbildung 3 zu einem Wilson Stromspiegel (vergleiche Abbildung 5). Bestimmen Sie rechnerisch den Widerstand R_{Last} so, dass sich wieder ein Strom $I_{ein} = 0,5mA$ ergibt unter Vernachlässigung der Source-Bulk-Spannung.
- o) Simulieren Sie den Wilson Stromspiegel und vergleichen Sie die Abhängigkeit des Ausgangsstroms von der Ausgangsspannung mit Ihren Ergebnissen aus Teilaufgabe j). Welchen Einfluss hat die Source-Bulk-Spannung?
- p) Bis zu welcher minimalen Ausgangsspannung $U_{aus,min}$ kann dieser Wilson Stromspiegel betrieben werden?