

## Vorlesung 7

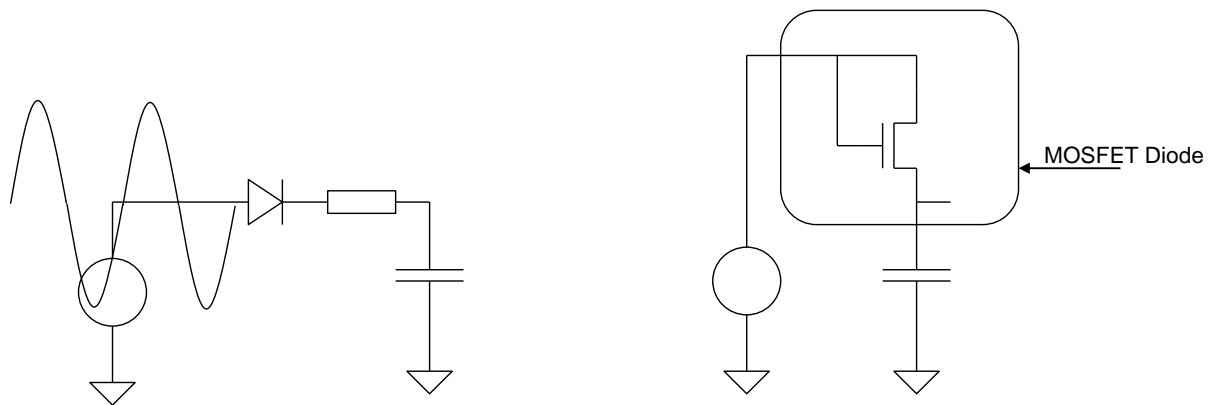
### MOSFET-Diode, Stromquelle und Stromspeigel

Das Thema dieser Vorlesung sind einige grundlegende Schaltungen MOSFET-Diode, Stromquelle und Stromspeigel

#### Diode-Connected MOSFET (MOSFET Diode)

##### Anwendungen

Die ursprüngliche Anwendung einer Diode ist Gleichrichter. In einer CMOS Technologie ist es oft unpraktisch PN Diode zu verwenden. Dioden in Durchlassrichtung erzeugen Minoritätsladungsträger was zu Problemen (Latchup) führen kann. Eine MOSFET Schaltung die Diode ersetzen kann ist in Abbildung 1 rechts gezeigt. Wir nennen es MOSFET Diode oder auf English diode connected transistor.



*Abbildung 1: MOSFET Diode wird als Gleichrichter benutzt*

Eine weitere Anwendung der MOSFET-Diode ist ein Ersatz für den Widerstand als Komponente. Widerstände werden in CMOS Technologie als Polysilizium-Strukturen realisiert. Widerstände von  $>1\text{M}\Omega$  ist im Layout groß. Eine MOSFET Diode kann einen großen Widerstand ersetzen wenn die Linearität nicht besonders wichtig ist. Das zeigt Abbildung 2.

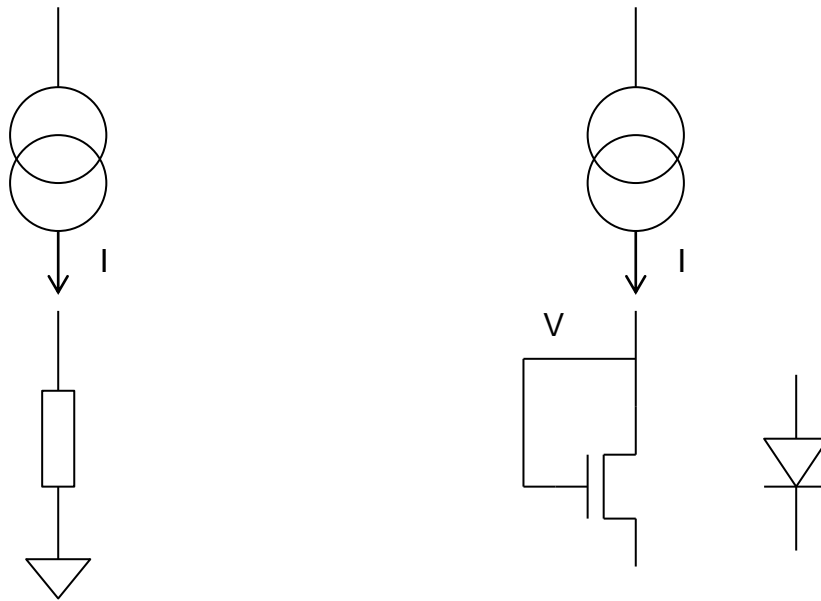


Abbildung 2: MOSFET Diode als Ersatz für Widerstand

### Funktionsweise

Um die Funktionsweise einer Schaltung zu verstehen ist es oft hilfreich, einen Einschaltvorgang sich vorzustellen. Die Eingangsquelle wird eingeschaltet und jeder Knoten in der Schaltung hat eine Kapazität. Wenn ein Strom in die Kapazität fließt steigt das Potential als Integral des Stromes.

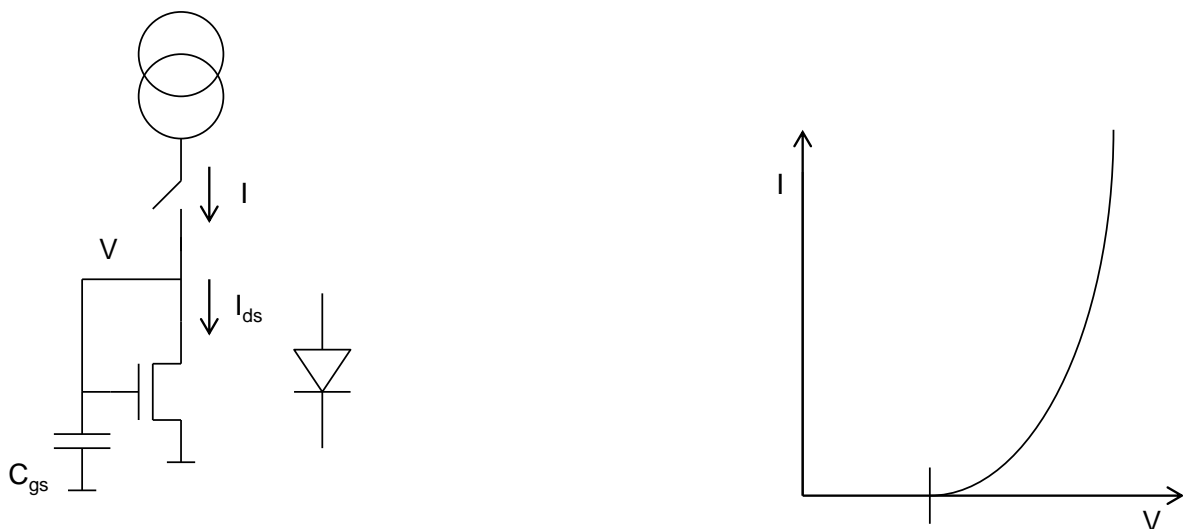


Abbildung 3: Funktionsweise der MOSFET Diode

Nehmen wir also an, eine Signal-Stromquelle ist an diese MOSFET Diode angeschlossen und sie wird eingeschaltet, Abbildung 3.

Falls der  $I_{ds}$  Strom zu klein ist um den Eingangsstrom ( $I$ ) in die Masse zu leiten, fließt ein Teil des Eingangsstromes in die Gate Kapazität.  $V_{gs}$  steigt. Dadurch steigt auch der Transistorstrom

(es gilt  $I_{ds} \sim (V_{gs} - V_{th})^2$ ) bis der Strom  $I_{ds}$  dem Strom  $I$  gleich wird. Ab dann verändert sich die Spannung am Gate nicht mehr.

Ein MOSFET mit verbundenem Gate und Drain ist immer in Sättigung (falls es in starker Inversion arbeitet). Die Bedingung für Sättigung  $V_{ds} > V_{gs} - V_{th}$  ist erfüllt wenn Drain und Source kurzgeschlossen sind.

Wir werden in dieser Vorlesung annehmen, dass die Transistoren in starker Inversion arbeiten und wir werden den Substrateffekt am Drain vernachlässigen.

MOSFET Diode hat eine Dioden-Ähnliche Kennlinie.

$$I = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_{th})^2$$

Betrachten wir nochmals die Anwendung der MOSFET Diode als Widerstand

Es gibt zwei Varianten der Schaltung:

Der Signalstrom kann entweder an Drain/Gate oder an Source angeschlossen werden, Abbildung 4.

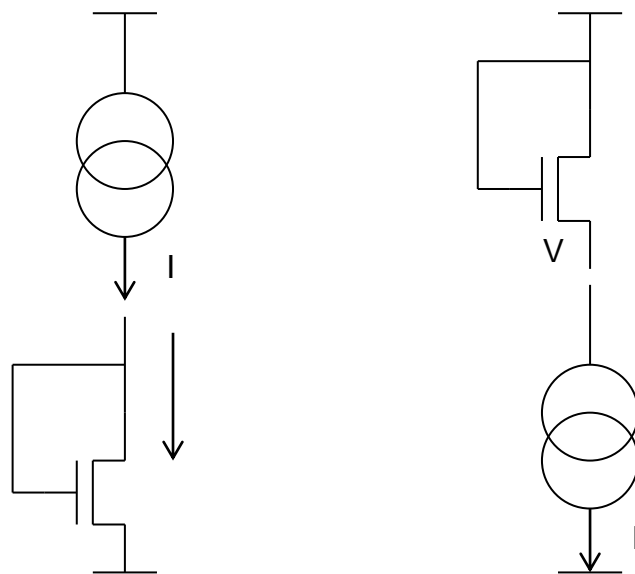


Abbildung 4: Zwei Varianten der MOSFET Diode

Die MOSFET Diode ist eine „passive“ Schaltung.

Passiv bedeutet  $i_{out} = 0$ , wenn  $v_{out} = 0$ .  $i_{out}$  und  $v_{out}$  sind die Kleinsignale. Die passiven Schaltungen sind nur durch eine Impedanz beschrieben. Das Kleinsignalmodell der Diode sehen wir in Abbildung 5 rechts.

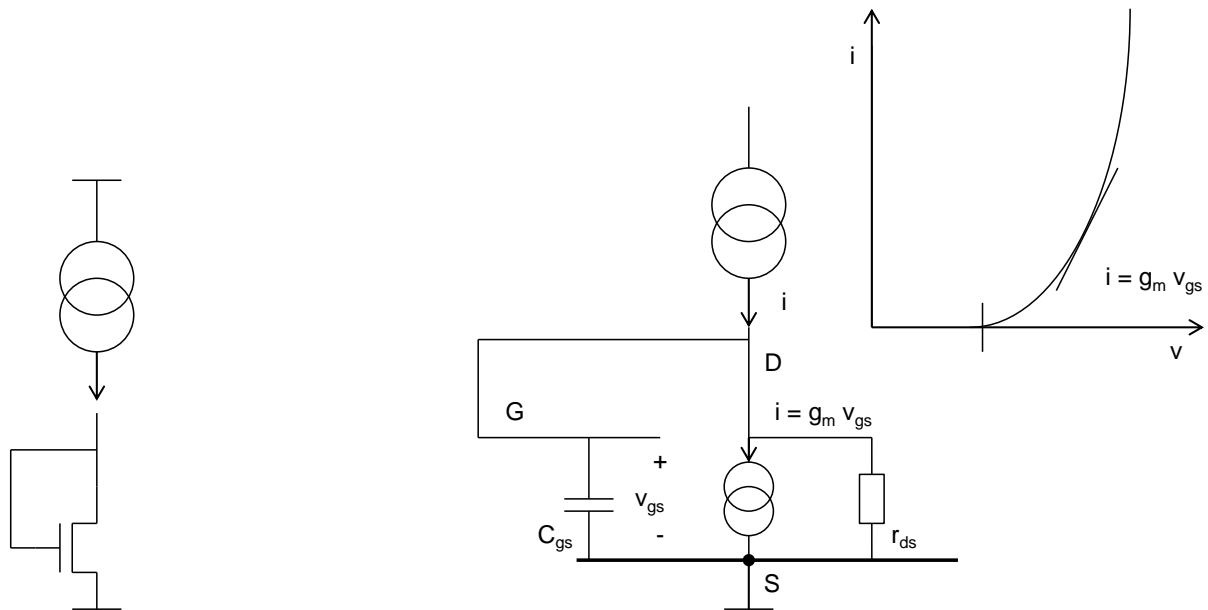


Abbildung 5: Kleinsignalmodell der Diode

Wie groß ist der Kleinsignalwiderstand der MOSFET Diode?

Um den Widerstand herzuleiten stellen wir uns ein Ohmmeter angeschlossen an die Diode vor, Abbildung 6. Nehmen wir an, dass das Ohmmeter eine Spannung erzeugt und den Strom „misst“ um den Widerstand zu bestimmen. Wir betrachten nur die Änderungen der Spannung und des Stroms (kleine Signale). Eine Spannungsänderung  $dv$  (ein Kleinsignal  $dv$ ) erzeugt die Kleinsignalspannung  $v_{gs} = dv$ , was zum Kleinsignalstrom  $i_{ds} = g_m \times dv$  führt. Das entspricht einem Widerstand von  $1/g_m$ . Es gibt zusätzlich auch einen Strom durch den  $r_{ds}$ -Widerstand. Dieser Widerstand modelliert den Early Effekt. Der Gesamtwiderstand ist dann  $r_{ds}$  in parallel mit  $1/g_m$ . (Abbildung 7) Normalerweise kann man  $r_{ds}$  vernachlässigen da  $r_{ds} \gg 1/g_m$  ist. In dem Fall ist es:

$$r_{dio} = \frac{1}{g_m} \parallel r_{ds} \approx \frac{1}{g_m}$$

Die Kleinsignal-Kapazität der Diode ist  $C_{gs}$  (Gate-Source dynamische Kapazität) in parallel mit  $C_{jd}$  (dynamische Kapazität der Drain-Substrate Sperrzone).

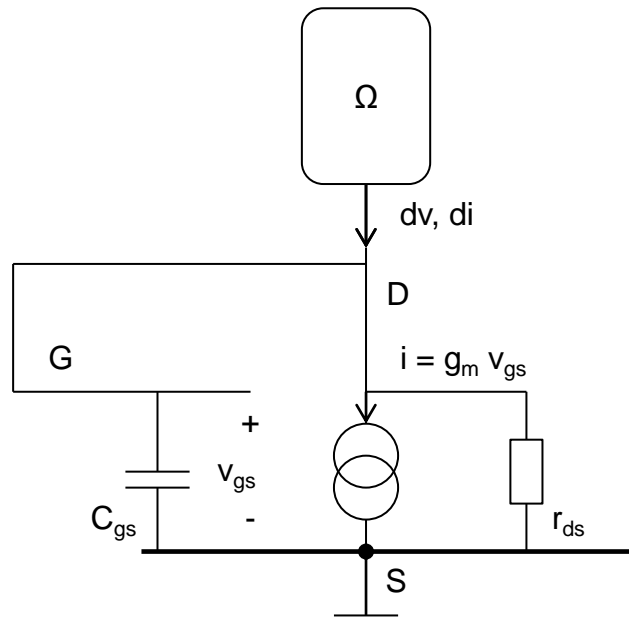


Abbildung 6: Kleinsignalwiderstand der MOSFET Diode

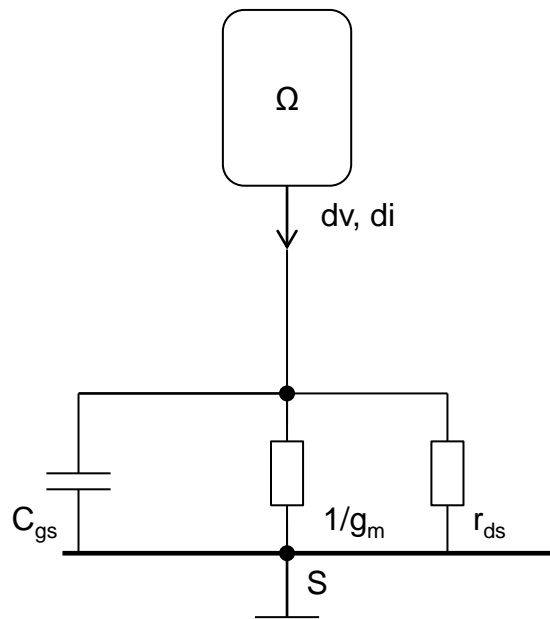


Abbildung 7: Ersatzschaltung der MOSFET Diode

Abbildung 8 zeigt verschiedene Varianten der MOSFET Diode.

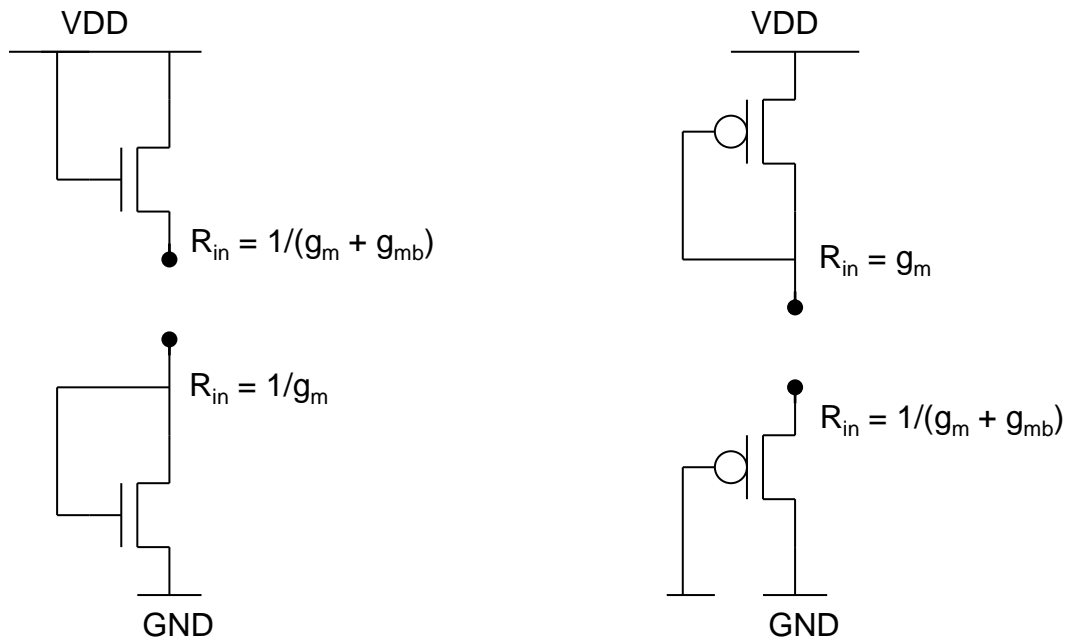


Abbildung 8: Eingangswiderstände von verschiedenen Varianten der MOSFET Diode

Die Widerstände haben leicht verschiedene Werte, je nachdem ob Substrateffekt eine Rolle spielt. Wenn der Eingang der Diode (in Abbildung 8 mit Punkt gekennzeichnet) Source ist, führt die Spannungsänderung am Eingang  $dv$  (Kleinsignal  $dv$ ) zur Änderung von  $v_{gs}$  und  $v_{bs}$ . Das führt zum größeren  $i_{ds}$  Strom (im Vergleich zur Schaltung von Abbildung 6 wo sich nur  $v_{gs}$  ändert) und einem Widerstand von:

$$r_{dio} \approx \frac{1}{g_m + g_{mb}} = \frac{1}{ng_m}$$

Faktor  $n$  ist slope factor von 1.25.

### Stromquelle

Eine weitere Schaltung ist die Spannungsgesteuerte Stromquelle (U-I-Wandler), Abbildung 9.

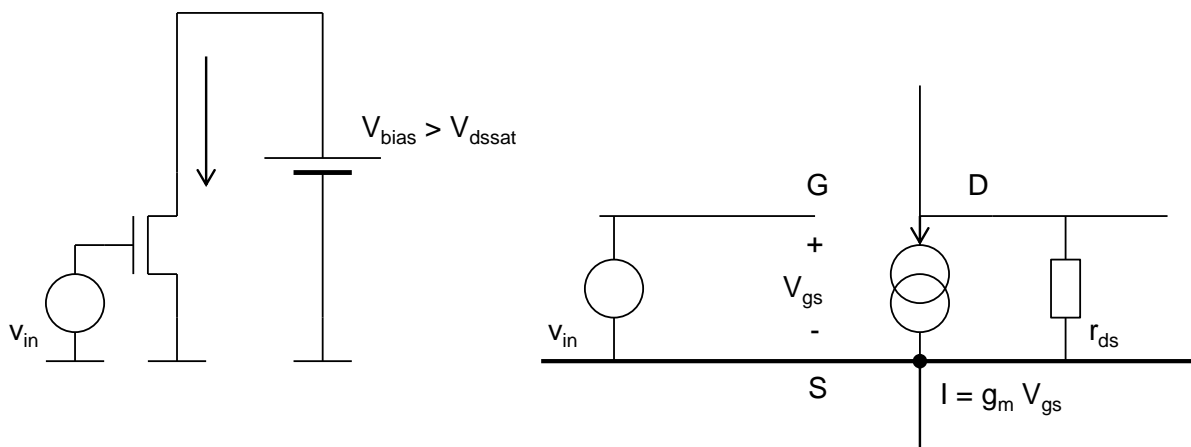
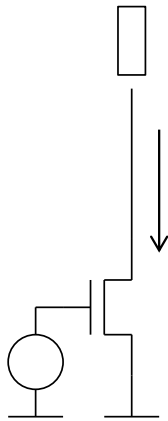


Abbildung 9: Stromquelle. Kleinsignalschaltung ist rechts

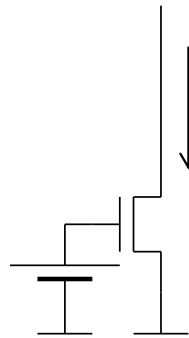
Eingangsspannung ist an Gate des Transistors angeschlossen. Drain muss an eine Bias-Spannung angeschlossen werden, um Sättigung des Transistors zu erreichen. (Bedingung  $V_{ds} > V_{dssat} = V_{gs} - V_{th}$ )

Ausgangswiderstand ist  $r_{ds}$ . Es handelt sich um eine aktive Schaltung. Aktiv bedeutet für Kleinsignale, dass der Kleinsignal-Ausgangsstrom  $i_{out}$  ungleich null sein kann, wenn  $v_{out} = 0$ . Aktive Schaltungen sind durch Eingangs-/Ausgangs impedanzen und Verstärkungen beschrieben.

Es gibt zwei Hauptanwendungen – Bias-Stromquelle und Signalquelle.



Signalstromquelle, z.B. als teil des Verstärkers



Biasstromquelle (Konstantstromquelle)

*Abbildung 10: Zwei Anwendungen der Stromquelle*

Anwendung 1 (Abbildung 10): Bias-Stromquelle oder Quelle des konstanten Stromes „Konstantstromquelle“. Konstantstromquelle bekommen wir, wenn wir zwischen Gate und Source eine Konstantspannungsquelle anschließen.

Wir können solche Stromquellen mit NMOS und mit PMOS Transistoren realisieren.

Source von NMOS-basierten Stromquelle ist normalerweise an Masse (GND) angeschlossen, , rechts.

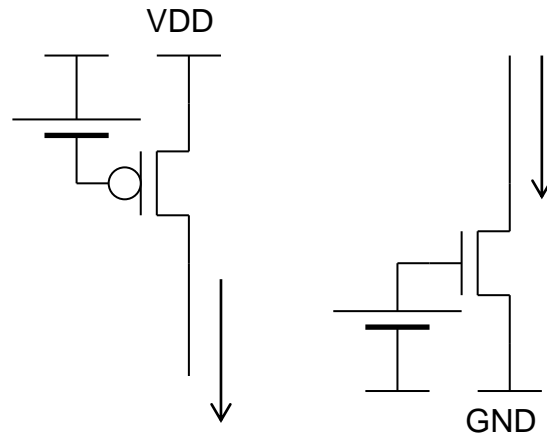


Abbildung 11 PMOS und NMOS Varianten der Stromquelle

Die Source von PMOS Quelle ist normalerweise an die positive Versorgungsspannung (VDD) angeschlossen, , links.

### Stromspiegel

Konstantstromquellen sind wichtige Bauteile. Anwendungen sind: Bias- oder Last-Elemente, D/A Wandler.

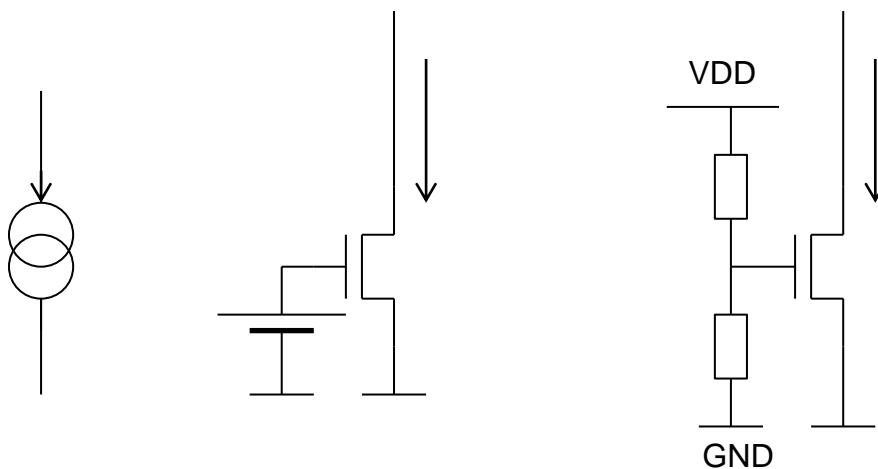


Abbildung 12: Erzeugung von Eingangsspannung für eine Stromquelle.

Wie wird die geeignete Gate-Source Spannung für diese Stromquelle am besten erzeugt? Designziele: der Strom unabhängig von Prozessvariationen und von Versorgungsspannung sein und er soll temperaturstabil sein. Die einfachste Möglichkeit wäre es einen Spannungsteiler zu verwenden, wie Abbildung 12 rechts zeigt. Nachteil:  $V_{gs}$  wäre von der Versorgungsspannung und den R-Werten abhängig.

Beachten wir dass,  $g_m$ ,  $V_{th}$ ,  $W$ ,  $L$ ,  $\mu$ ,  $C_{ox}$  die Größen sind die auf verschiedene Wesen variieren: vom Chip zu Chip, von Bauteil zum Bauteil und als Funktion der Temperatur. Auch wenn  $V_{gs}$  konstant wäre, wäre der Drain-Strom temperaturinstabil da er von Transistorparametern abhängig ist. Abbildung 12 erläutert die Temperaturabhängigkeit der Schwellenspannung.



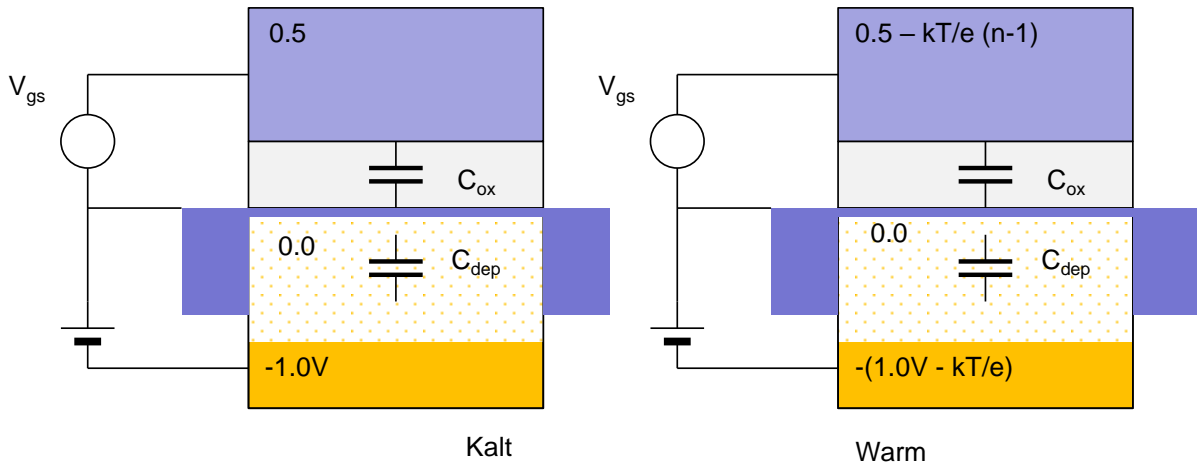


Abbildung 13: Temperaturabhängigkeit der Schwellenspannung

Eine bessere Möglichkeit ist es eine Schaltung zu bauen (oder kaufen) die einen temperaturstabilen Referenzstrom erzeugt. Dieser Strom kann bei Bedarf kopiert werden (Abbildung 14, Abbildung 15) und mehrfach verwendet.

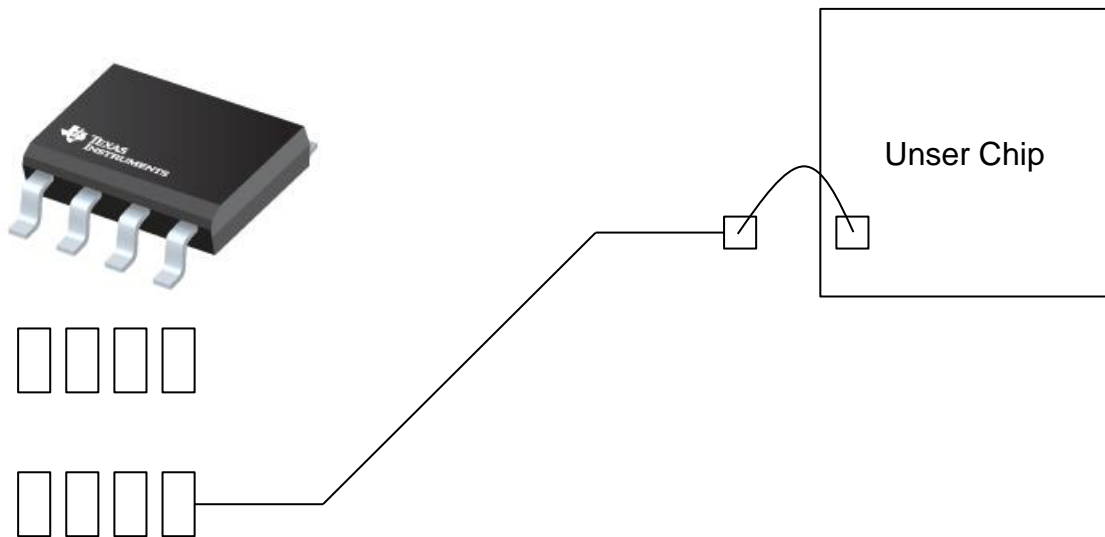


Abbildung 14: Referenzstromquelle

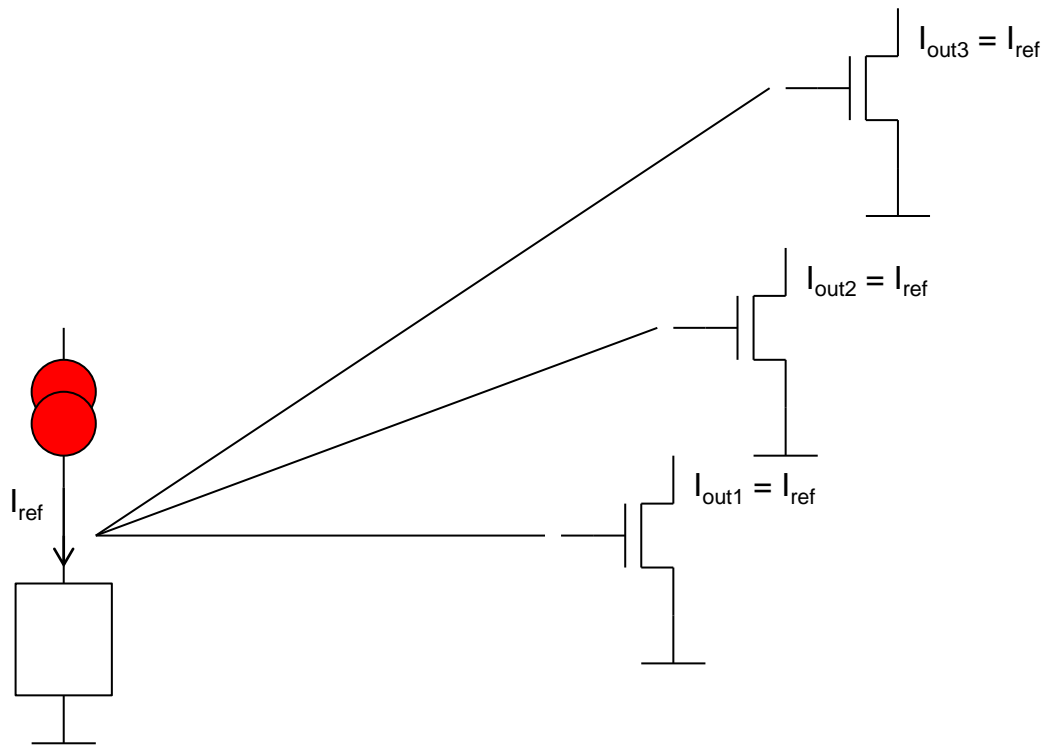


Abbildung 15: Referenzstrom wird kopiert

Erinnern wir uns, dass eine MOSFET-Stromquelle aus  $V_{gs}$  Spannung einen Strom erzeugt: Es gilt in allgemeiner Form:  $I_{ds} = f(V_{gs})$

Wir brauchen also eine Schaltung, die aus dem Referenzstrom ( $I_{ref}$ ) eine passende  $V_{gs}$  Spannung erzeugt, so dass  $I_{ds} = I_{ref}$  ist. Dementsprechend:  $V_{gs} = f^{-1}(I_{ref})$ . Ein MOSFET Diode hat genau solche Kennlinie (Abbildung 16).

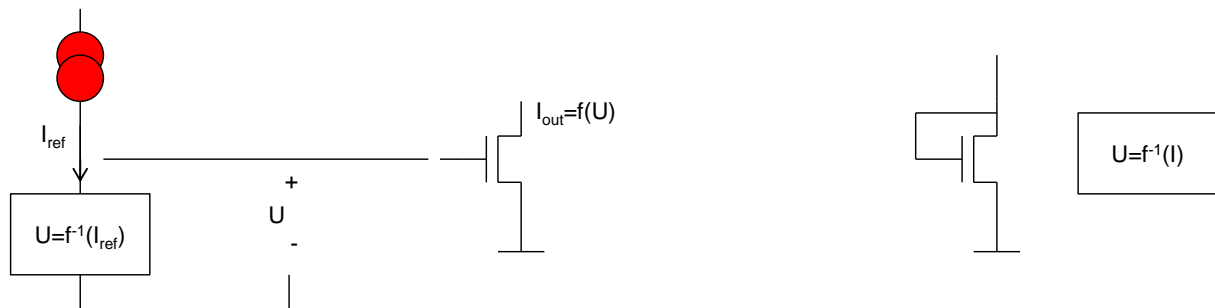


Abbildung 16: Eine MOSFET Diode wird im Stromspiegel verwendet um den Eingangsstrom in Spannung umzuwandeln

Ein Stromspiegel ist die Kombination von einer MOSFET Diode und einer Stromquelle

Für Diode (Transistor  $T_{dio}$ ) gilt:

$$I_{in} = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W_{dio}}{L_{dio}} (V_{gs} - V_{th})^2$$

Für die Stromquelle  $T_{out}$ :

$$I_{\text{out}} = \frac{1}{2} \mu C_{\text{ox}} \frac{W_{\text{out}}}{L_{\text{out}}} (V_{\text{gs}} - V_{\text{th}})^2$$

Daraus folgt:

$$I_{\text{out}} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_{\text{out}}}{\left(\frac{W}{L}\right)_{\text{dio}}} I_{\text{ref}} \quad (1)$$

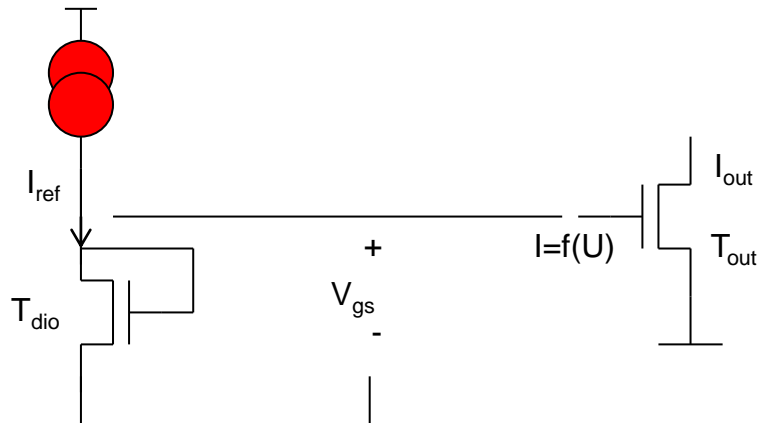


Abbildung 17: Stromspiegel

Das Verhältnis von W/L-s von Stromquelle und Diode nennen wir „n“.

$$I_{\text{out}} = n I_{\text{ref}} \quad (2)$$

Wenn die Transistoren identische Dimensionen haben, sind auch die Ströme gleich. (Wir vernachlässigen hier die Ausgangswiderstände  $R_{\text{ds}}$ )

Wenn wir möchten dass der Faktor n ganzzahlig und genau ist, realisieren wir die Stromquelle als Parallelschaltung von mehreren Transistoren.

Beispiel: Stromverstärkung von 2. Problem: Wenn ein Transistor mit  $W = 1 \mu\text{m}$  designed ist, hat er in Wirklichkeit um eine Konstante „dW“ kleinere Gate-Breite. Das ist in Abbildung 18 und Abbildung 19 gezeigt. Z.B. für  $dW = 100 \text{ nm}$ , hat der Transistor mit dem Designwert  $W = 1 \mu\text{m}$  die effektive Weite  $W_{\text{eff}} = 0.9 \mu\text{m}$ . Dementsprechend hat ein Transistor mit dem Designwert  $W = 2 \mu\text{m}$ , in Wirklichkeit  $W_{\text{eff}} = 1.9 \mu\text{m}$ . Das Verhältnis von effektiven Breiten ist dann nicht 2.

Lösung: wir benutzen als Stromquelle zwei Transistoren mit  $W = 1 \mu\text{m}$  und  $L = 1 \mu\text{m}$  und schließen deren Source, Gate und Drain kurz als einen Transistor mit  $W = 2 \mu\text{m}$  und  $L = 1 \mu\text{m}$  (Abbildung 20).

Es gilt dann gilt relativ genau  $I_{\text{out}} = 2 \times I_{\text{in}}$ .

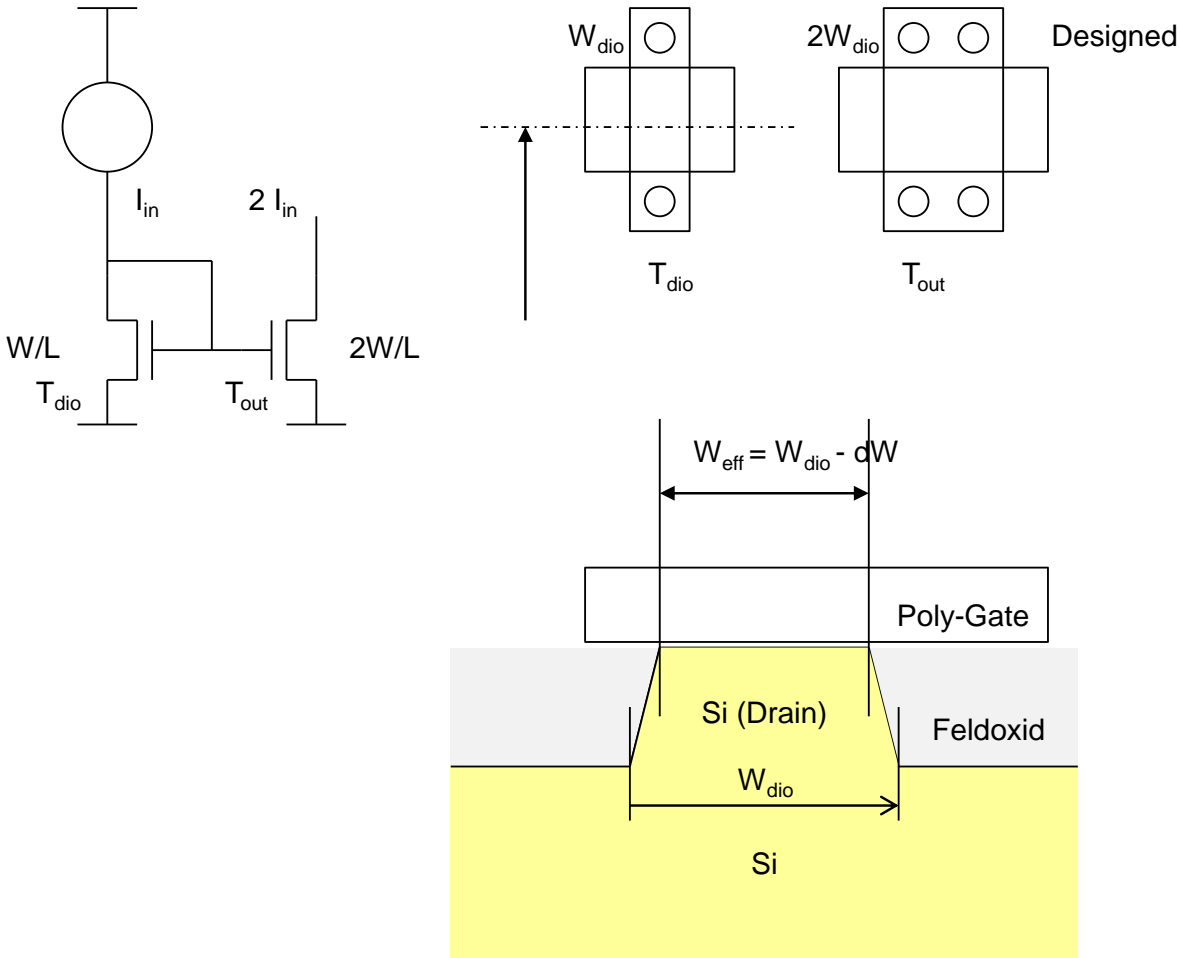


Abbildung 18: Genauigkeit eine Stromspegels mit  $n = 2$ . Systematischer Fehler

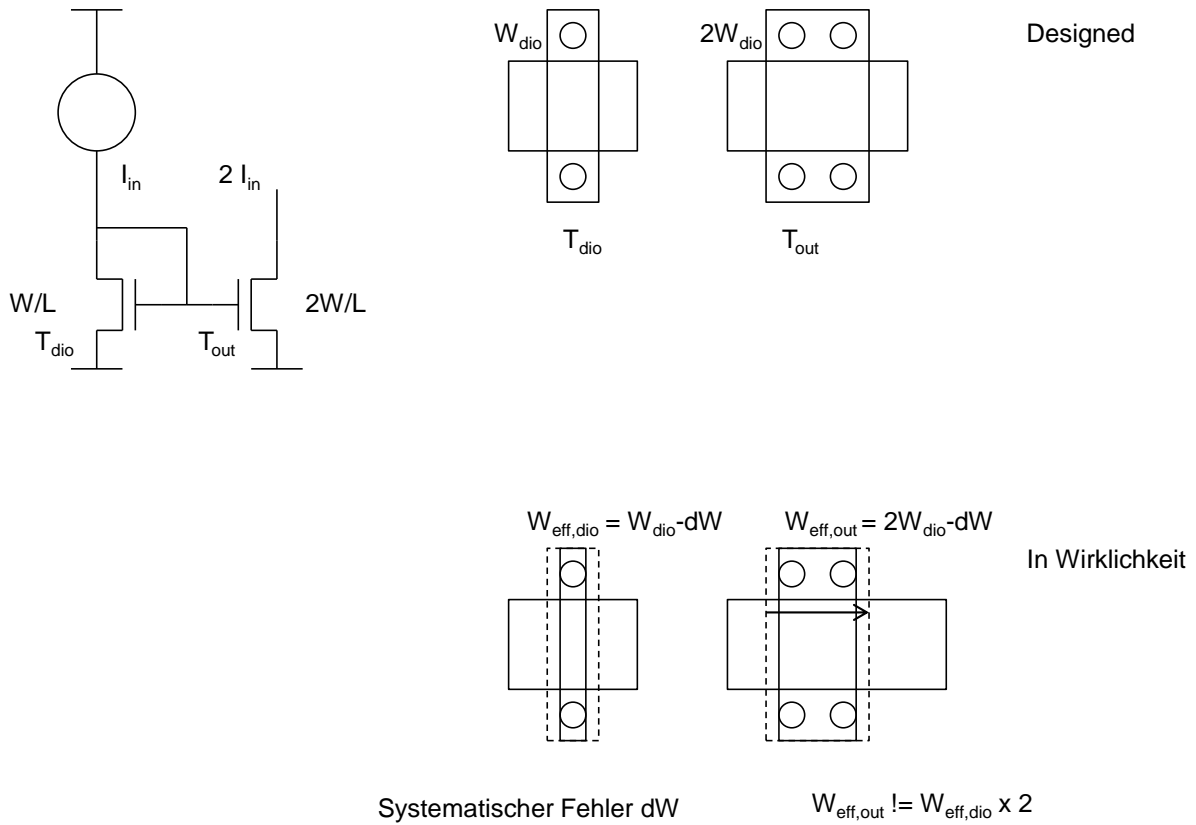


Abbildung 19: Genauigkeit eine Stromspiegels mit  $n = 2$ . Ausgangstransistor ist zweimal breiter

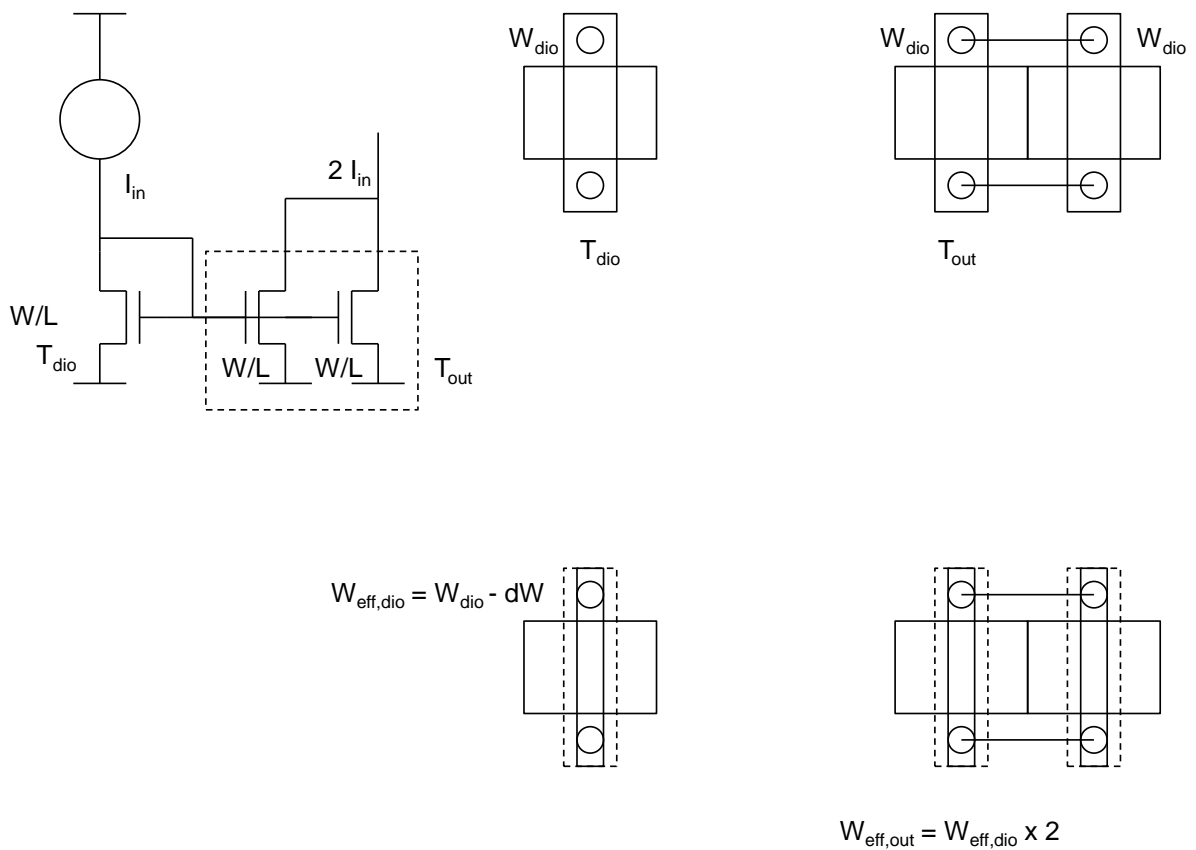


Abbildung 20: Genauigkeit eine Stromspiegels mit  $n = 2$ . Ausgangstransistor hat zwei Gates

Ein Stromspiegel ist mehr als eine Möglichkeit die Referenzströme zu verteilen. Statt  $I_{ref}$  können wir auch einen Signalstrom  $I_{in}$  verwenden. In dem Fall handelt sich um einen aktiven Stromspiegel. Wichtig ist, dass beide Transistoren in Sättigung arbeiten. Sonst ist der Ausgangsstrom nicht mit (1) beschrieben.

Diode ist immer in Sättigung, die Stromquelle  $T_{out}$  ist in Sättigung nur für ausreichende  $V_{ds}$  Spannung:  $V_{ds} > V_{dssat}$ .

Oft ist das Größenverhältnis von Diode und Stromquelle 1:n oder n:1. So erreicht man eine Stromverstärkung bzw. eine Stromteilung.

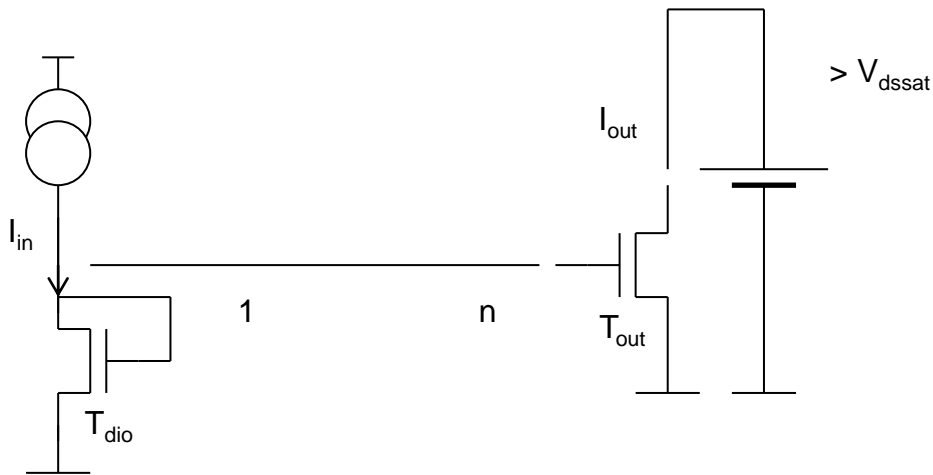


Abbildung 21: Stromspiegel als Stromverstärker

Die Kleinsignalschaltung bekommen wir wenn wir die Kleinsignalmodelle von Transistoren verwenden. Abbildung 22, Abbildung 23, Abbildung 24 und Abbildung 25 illustrieren die vorgehensweise.

Man kann folgende AC-Übertragungsfunktion des Stromspiegels herleiten:

$$\frac{i_{out}(s)}{i_{in}(s)} = \frac{n}{1+(n+1)\frac{C_{gs,dio}}{g_{m,dio}}} \quad (3)$$

Es gilt:  $n = g_{m,out}/g_{m,dio}$  und  $n = C_{gs,out}/C_{gs,dio}$ .

Beachten wir folgendes:

Die Stromverstärkung ist n. Der Stromspiegel verhält sich wie ein Tiefpass. Die Zeitkonstante ist  $(n+1) C_{gs,dio}/g_{m,dio}$ . Die Schaltung ist also „langsamer“ wenn die Stromverstärkung größer ist.

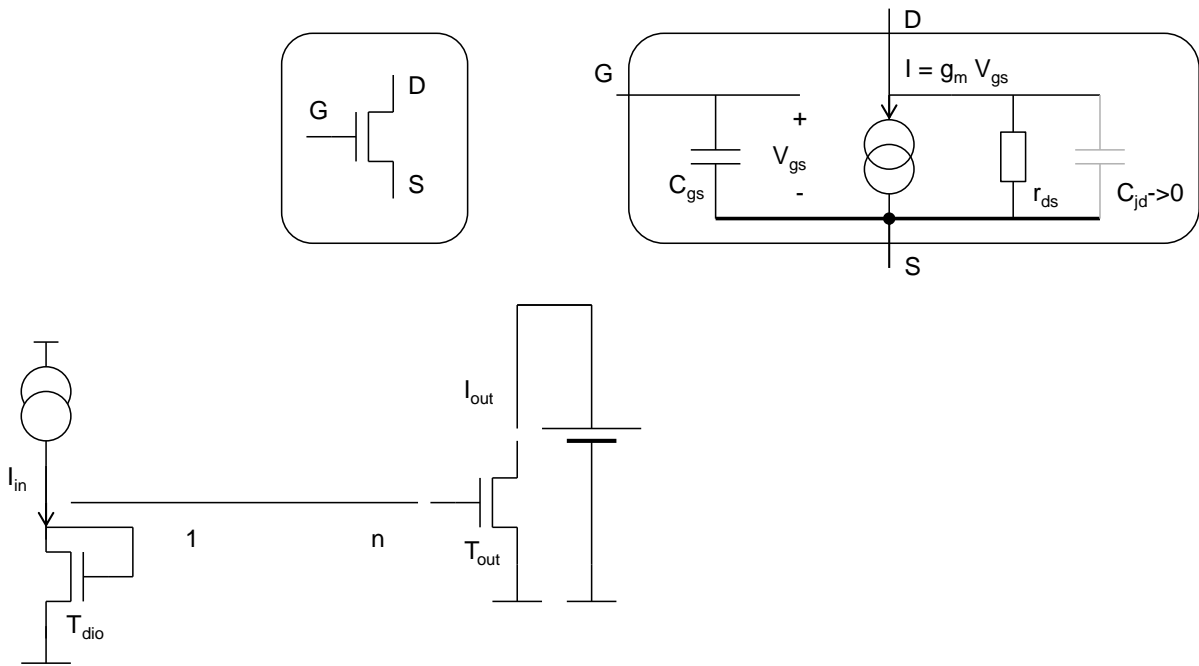


Abbildung 22: Kleinsignalmodell des Stromspiegels (1)

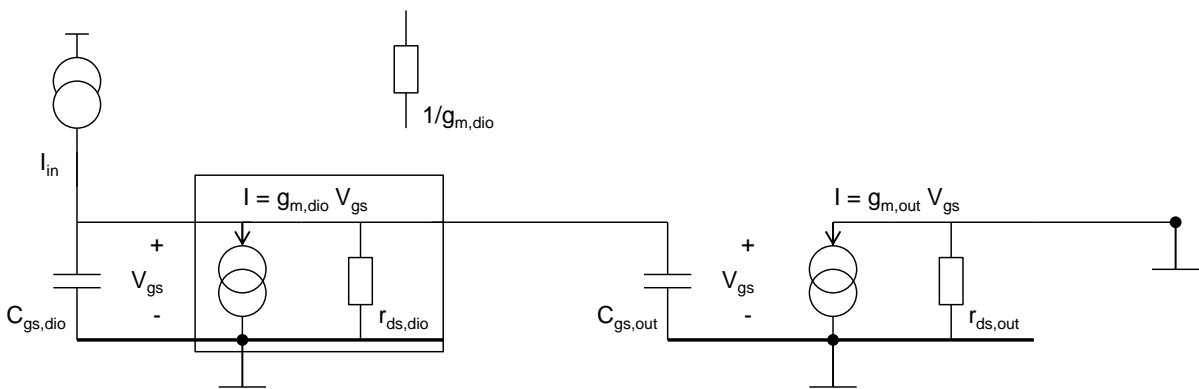


Abbildung 23: Kleinsignalmodell des Stromspiegels (2)

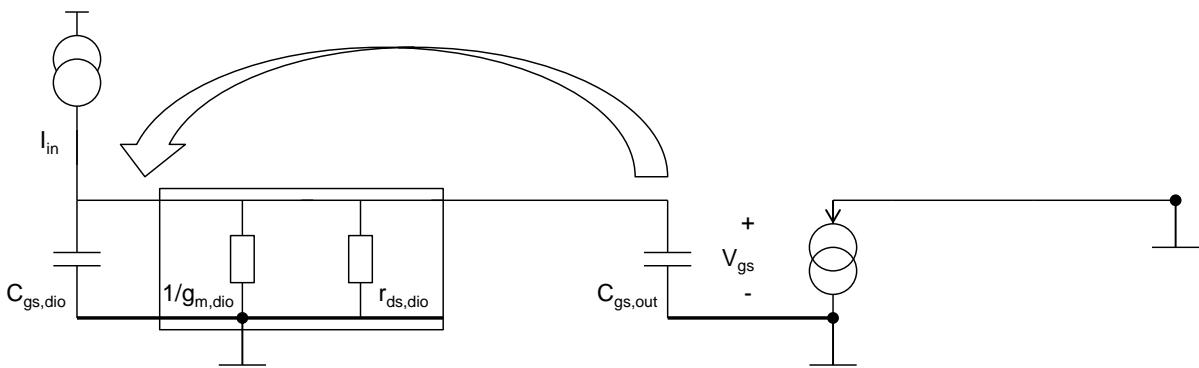


Abbildung 24: Kleinsignalmodell des Stromspiegels (3)

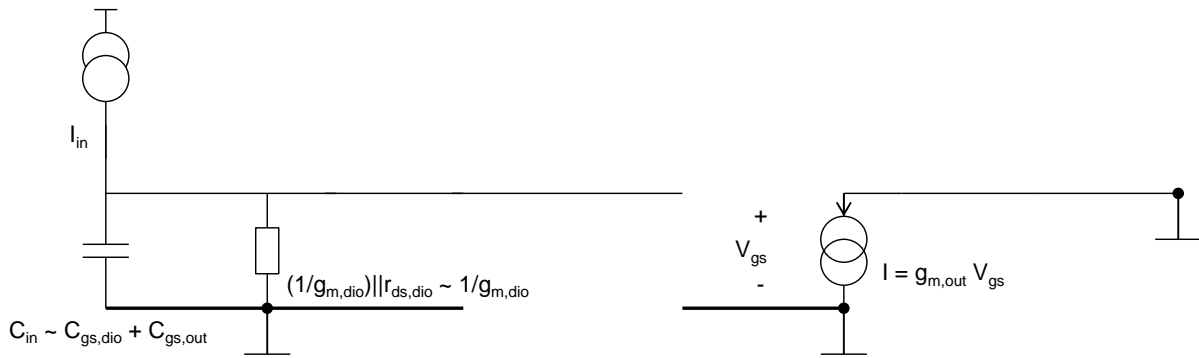


Abbildung 25: Kleinsignalmodell des Stromspiegels (4)

Wir haben gezeigt (1) und (2), dass die Stromverstärkung  $n = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_{out}}{\left(\frac{W}{L}\right)_{dio}}$  ist.

Das Kleinsignalmodell führt zum Ergebnis (3)  $n = \frac{g_{m,out}}{g_{m,dio}}$ .

Sind die n gleich? Ja, weil das folgende gilt:

$$I = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_{th})^2 \text{ und } g_m = dI/dV_{gs} = \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_{th}).$$

Da  $V_{gs} - V_{th}$  für  $T_{dio}$  und  $T_{out}$  gleich sind, gilt  $g_{m,out} / g_{m,dio} = (W/L)_{out} / (W/L)_{dio}$ .

Ein Anwendungsbeispiel für Stromspiegel.

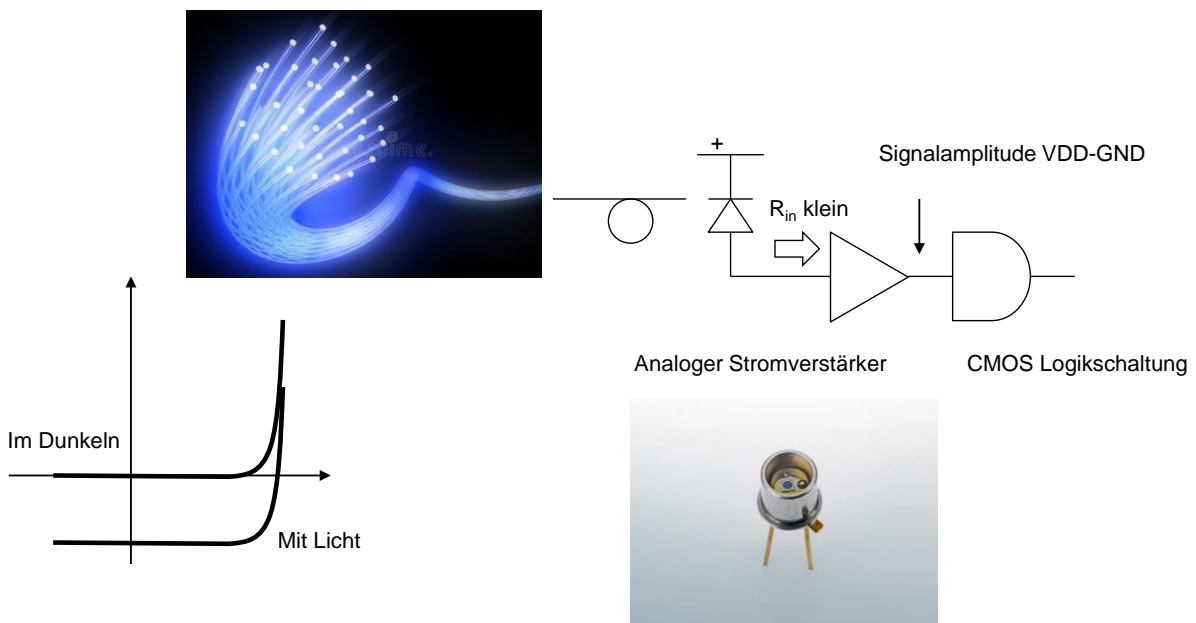


Abbildung 26: Schneller Stromverstärker basierend auf einem Stromspiegel

Stromspiegel sind schnelle Stromverstärker. Ein Beispiel für die Verwendung eines Stromspiegels als Verstärker sehen wir in Abbildung 26. Ein Signal wird über Glasfaser



übertragen, eine Fotodiode misst das Licht und erzeugt den Fotostrom. Der Strom muss in eine Spannung umgewandelt werden, deren Amplitude groß genug ist, so dass die digitalen Schaltungen sie als logische 1 oder 0 „verstehen“.

Die wichtige Eigenschaft eines Stromverstärkers ist ein kleiner Eingangswiderstand. Warum? Wenn der Widerstand groß ist, entsteht am Eingang eine große Zeitkonstante, was die Schaltung langsamer macht.

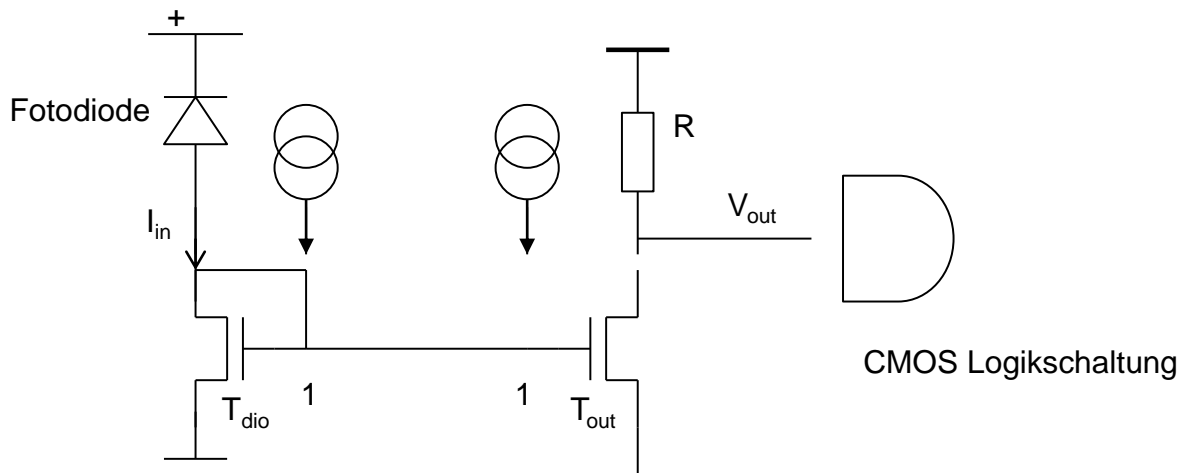


Abbildung 27: Schneller Stromverstärker basierend auf einem Stromspiegel - Schaltplan

Abbildung 27 zeigt den Schaltplan des Stromverstärkers. Fotodiode befindet sich am Eingang des Stromspiegels, der Ausgang ist an Widerstand R angeschlossen. Die Spannungsverstärkung entsteht am Ausgang: Spannungsverstärkung =  $R \times I_{out}$ .

Die Zeitkonstante der Schaltung ist  $C_{in} R_{in}$  ( $C_{in} = C_{fotodiode} + 2 \times C_{gs}$ ). Für schnelle Signalübertragung brauchen wir  $R_{in} \sim 100 \Omega$ , damit die Zeitkonstante klein und die Bandbreite hoch ist.

Es gilt:  $R_{in} = 1/g_{m,dio}$

Daraus folgt dass die Transkonduktanz  $g_{m,dio}$  ausreichend hoch sein muss (z. B) 10 mS.

Das wird mit weiteren Biasstromquellen erreicht (gezeigt in Abbildung 27), welche die Ströme von VDD „nach unten“ erzeugen und  $T_{dio}$  und  $T_{out}$  „biasen“. Nur dann haben die Transistoren große  $g_m$  auch wenn die Fotodiode keinen Strom erzeugt.

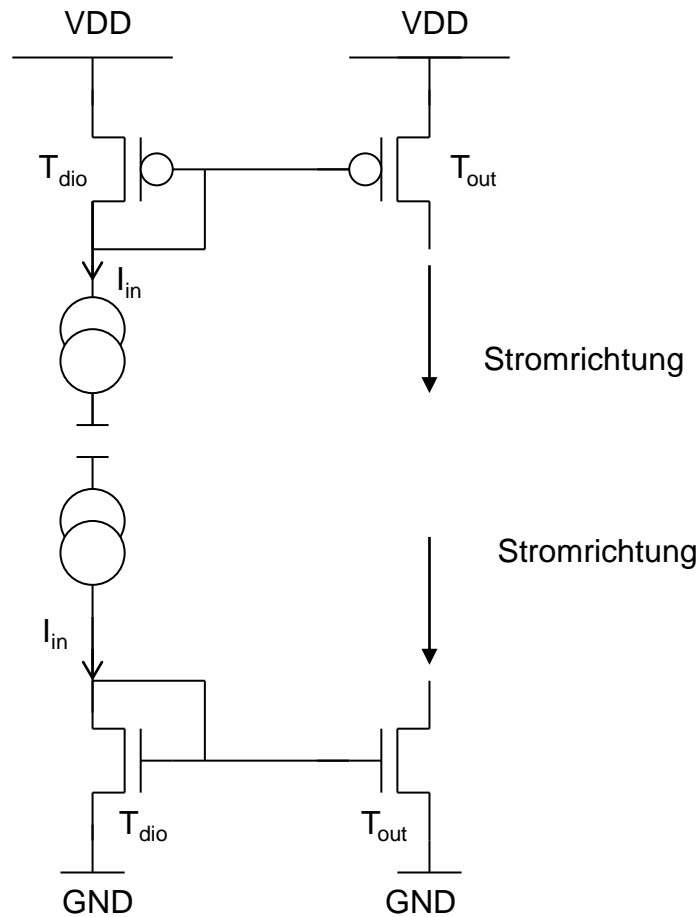


Abbildung 28: PMOS und NMOS Variante des Stromspiegels

Abbildung 28 zeigt die PMOS und NMOS Varianten des Stromspiegels. Wir erkennen folgende Unterschiede:

PMOS Stromspiegel: Source an  $VDD$  (positive Spannungsversorgung) angeschlossen, Strom fließt „nach außen“

NMOS Stromspiegel: Source an  $GND$  angeschlossen, Stromrichtung nach innen

Dank verschiedenen Stromrichtungen können PMOS und NMOS Stromspiegel kombiniert (kaskadiert) werden um größere Verstärkung zu erreichen. Das zeigt Abbildung 29.

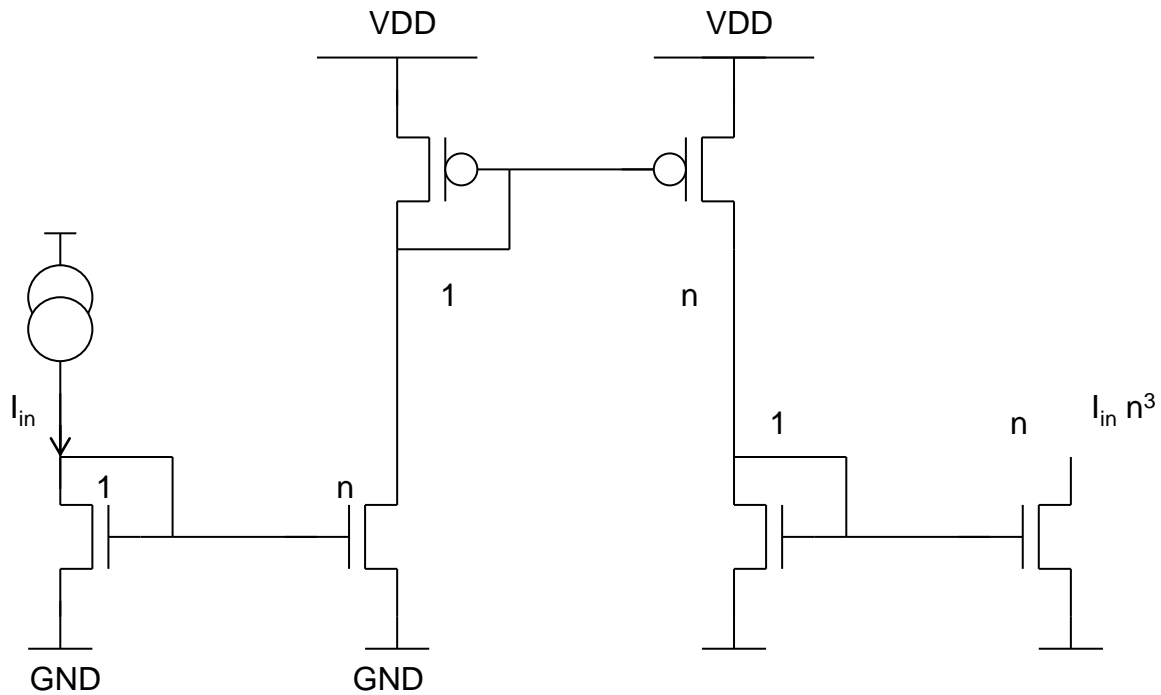


Abbildung 29: Kaskade von Stromspiegeln

Diskutieren wir kurz den Einfluss von  $R_{ds}$  auf die Übertragungsfunktion.

Die Widerstände  $R_{ds,dio}$  und  $R_{ds,out}$  führen zum Fehler beim Strom-Kopieren und der Strom-Multiplikation wenn  $V_{ds,out}$  ungleich  $V_{ds,dio}$  ist (Abbildung 30).

Wenn die Drain-Source Spannungen von Transistoren  $T_{dio}$  und  $T_{out}$  ungleich sind, stehen  $I_{in}$  und  $I_{out}$  nicht im gleichen Verhältnis wie die W/L-s der Transistoren da Teile der Ströme durch  $R_{ds}$  fließen.

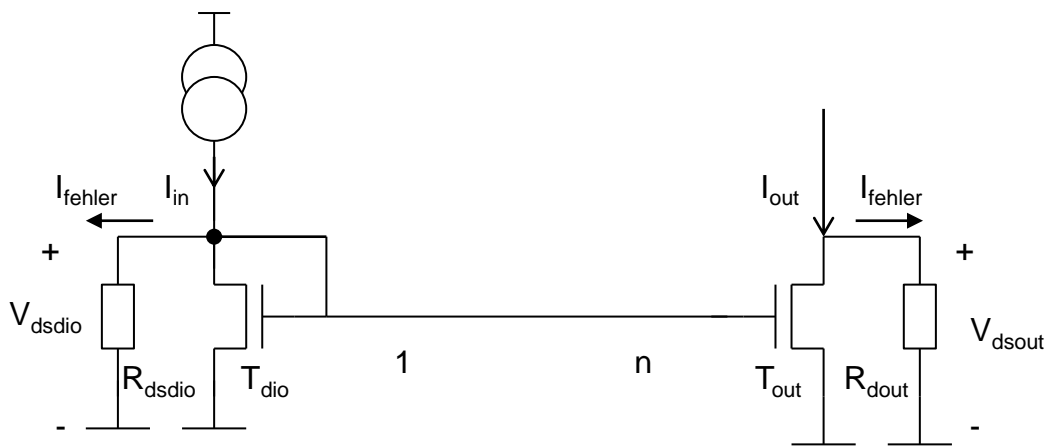


Abbildung 30: Einfluss von  $R_{ds}$  Widerständen aus  $I_{out}$

Wie kann man einen Stromspiegel verbessern? Erinnern wir uns, dass  $R_{ds}$  größer wird wenn die Transistoren verlängert werden. Lange Transistoren sind normalerweise für Stromspiegel und für Stromquellen geeignet.

Es gibt hier ein Problem: Wenn wir  $L$  verlängern, steigt bei einem konstanten Strom auch  $V_{gs}$  und dementsprechend auch  $V_{dssat}$ . Die Bedingung  $V_{out} > V_{dssat}$  ist „schwieriger“ zu erfüllen und wir haben den Bereich für die Ausgangsspannung eingeschränkt, Abbildung 31. Es gibt Kompromisse zwischen der Verstärkung, der Geschwindigkeit, der Linearität (Abwesenheit von signalabhängigen Fehlern), und dem möglichen Signalbereich.

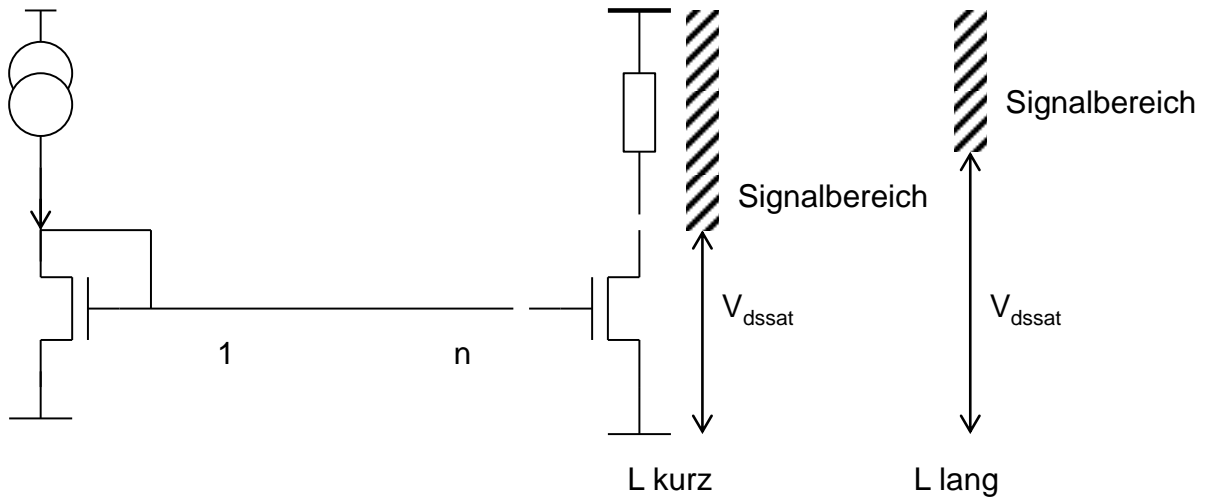


Abbildung 31: Dynamikbereich (Spannungs-Signalbereich) am Ausgang des Stromspiegels