**Vorlesung 6**

Das Thema dieser Vorlesung sind einige grundlegende Schaltungen

Die Schaltungen werden im Großsignal- und Kleinsignal- DC-,- und AC-Domain analysiert.

Folie 2

\*\*\*

Diode-Connected Mosfet.

MOSFET bei dem Drain und Gate kurz geschlossen sind nennen wir Diode-Connected Mosfet.

Nehmen wir an. wir haben eine Signal-Stromquelle an den Diode-Connected Mosfet angeschlossen.

Falls der Ids Strom zu klein ist um den Eingangsstrom aufzunehmen, fließt ein Teil des Eingangsstromes in die Gate Kapazität, Vgs steigt bis Ids = Isignal.

Diode-Connected MOSFET ist immer in Sättigung. Die Bedingung für Sättignung Vds > Vgs - Vth ist automatisch erfüllt wenn Drain und Source kurzgeschlossen sind.

Großsignalanalyse:

Diode-Connected Mosfet (DC-Mosfet) hat eine Dioden-Ähnliche Kennlinie.

Formel: I = ½ mu Cox W/L (V - Vth)^2

Folie 3

\*\*\*

Es gibt zwei Varianten vom DC-Mosfet:

Signalstrom kann entweder an Drain/Gate oder an Source angeschlossen werden

Rin/Rout:

Eingangswiderstand ist 1/gm

Zin/Zout:

Eingangskapazität ist Cgs ~ Cox \* 2/3 \*WL

Folie 4

\*\*\*

AC-Verhalten:

AC Kennlinie:

v(s)/i(s) = 1/gm /(1 + Cgs/gm)

Die Polestelle ist -Cgs/gm. Da Cgs klein und gm groß ist, ist die dominante Zeitkonstante T = Cgs/gm sehr klein, bzw. Bandbreite hoch.

Folie 5

\*\*\*

Folie 5 zeigt die Pmos- und Nmos-Varianten der Schaltung.

Folie 6

\*\*\*

Spannungsgesteuerte Stromquelle (U-I-Wandler)

Signalspannung ist am Gate.

Drain wird an Bias-Spannung angeschlossen um Sättigung des Transistors zu erreichen. (Bedingung Vds > Vdssat = Vgs - Vth)

Ausgangswiderstand ist rds. Ausgangskapazität ist cjd

Eingangskapazität ist Cgs.

Folie 7

\*\*\*

Konstante Stromquelle

Ein Konstante Stromquelle bekommen wir wenn wir zwischen Gate und Source eine konstante Spannungsquelle anschließen.

Folie 8

\*\*\*

Source von Nmos Stromquelle ist normalerweise an Masse (GND) oder eine negative Versorgungsspannung angeschlossen.

Beim Pmos, ist Source an positive Versorgungsspannung angeschlossen.

Beachten wir: nur ein Kontakt der Stromquelle hat „freies“ Potential, wir dürfen nur das Drain-Potential ändern ohne den Strom zu beeinflussen.

Nmos wirkt wie eine Stromsenke. Pmos Strom fließt aus VDD.

Folie 9

\*\*\*

Stromspiegel

Konstante Stromquellen sind wichtige Bauteile. Verwendung: Bias- oder Load-Elemente, DACs.

Wie wird die geeignete Gate-Source Spannung für eine konstante Stromquelle am besten erzeugt?

Ziel: der Strom soll temperaturstabil sein.

Die einfachste Möglichkeit wäre es einen Spannungsteiler zu verwenden, wie die Folie zeigt. Nachteil: Vgs wäre von der Versorgungsspannung und den R-Werten abhängig.

Beachten wir auch: auch wenn Vgs konstant wäre, wäre der Drain-Strom temperaturinstabil da er von Vth anhängt.

Folie 10

\*\*\*

Eine bessere Möglichkeit ist es eine Schaltung zu bauen die einen temperaturstabilen Referenzstrom erzeugt. Dieser Strom kann bei Bedarf kopiert werden.

Folie 11

\*\*\*

Erinnern wir uns, dass eine Mosfet-Stromquelle aus Vgs Spannung einen Strom erzeugt: Es gilt in allgemeiner Form: Ids = f(Vgs.)

Wir brauchen also eine Schaltung, die aus dem Referenzstrom (Iref) eine passende Vgs Spannung erzeugt, so dass Ids =Iref gilt. Dementsprechend: Vgs = f-1(Iref). Ein Diode-Connected-Mosfet hat genau solche Kennlinie.

Folie 12

\*\*\*

Für Diode-Connected Mosfet gilt:

Iin = ½ mu Cox W/L\_dio (Vgs - Vth)^2.

Für die Stromquelle Tout:

Iout = ½ mu Cox W/L\_out (Vgs - Vth)^2.

Daraus folgt:

Iout = W/L\_out / W/L\_dio Iref

Wenn die Transistoren identische Dimensionen haben, sind auch die Ströme gleich. (Wir vernachlässigen hier die Ausgangswiderstände Rds)

Ein Stromspiegel ist die Kombination vom Diode Connected Mosfet und einer Stromquelle.

Folie 13

\*\*\*

Ein Stromspiegel ist mehr als eine Möglichkeit die Referenzströme zu verteilen. Statt Iref können wir auch einen Signalstrom Iin verwenden. In dem Fall haben wir einen aktiven Stromspiegel.

Wichtig ist, dass beide Transistoren in Sättigung arbeiten.

Diode ist immer in Sättigung, die Stromquelle Tout ist in Sättigung nur für ausreichende Vds Spannung: Vds > Vdssat.

Oft ist das Größenverhältnis von Transistoren 1:n oder n:1. So erreicht man eine Stromverstärkung oder eine Stromteilung.

Die AC Kennlinie des Stromspiegels ist:

Iout/Iin = n/(1 + n+1 Cgs/gm)

Die Bandbreite ist für höhere Verstärkung niedriger.

Folie 14

\*\*\*

Rin ist 1/gm, Rout ist rds.

Stromspiegel sind schnelle Stromverstärker. Ein Beispiel für die Verwendung eines Stromspiegels als Verstärker sehen wir in der Folie 14. Eine Stromquelle befindet sich am Eingang des Spiegels, der Ausgang ist an Widerstand angeschlossen.

Folie 15

\*\*\*

Pmos Stromspiegel ist normalerweise mit Sourcen an VDD (positive Spannungsversorgung) angeschlossen

Nmos Sourcen sind normalerweise an GND angeschlossen

Folie 16

\*\*\*

Diskutieren wir den Einfluss von Rds auf die Übertragungsfunktion.

Die Widerstände Rds/Rout führen zum Fehler beim Strom-Kopieren und der Strom-Multiplikation wenn Vdsout ungleich Vdsin ist.

Wenn die Drain-Source Spannungen von Transistoren Tdio und Tout ungleich sind, stehen Iin und Iout nicht im gleichen Verhältnis wie die W/L-s der Transistoren da Teile der Ströme durch Rds fließen.

Folie 17

\*\*\*

Wie kann man einen Stromspiegel in Hinsicht auf dieses Problem verbessern? Erinnern wir uns, dass Rds besser wird (höher wird) wenn die Transistoren verlängert werden. Lange Transistoren sind für Stromspiegel geeignet.

Es gibt hier ein Problem: Wenn wir L verlängern, steigt bei einem konstanten Strom auch Vgs und dementsprechend auch Vdssat. Die Bedingung Vout > Vdssat ist „schwieriger“ zu erfüllen und wir haben den Bereich für die Ausgangsspannung eingeschränkt.

Es gibt Kompromisse zwischen der Verstärkung, der Geschwindigkeit, der Linearität (Abwesenheit von signalabhängigen Fehlern), und dem möglichen Signalbereich.

Folie 18

\*\*\*

Kaskode

Kaskode ist ein Impedanzwandler. In erster Näherung leitet eine Kaskode den Eingangsstrom (den Signalstrom) ohne Änderung durch (Iout = Iin).

Rin ist 1/gm. Rout ist groß.

Folie 18 und 19

\*\*\*

Wie groß ist rout?

Es ist grösser als rds, die genaue Herleitung (Folie 19) zeigt: Rout = gmcasc rdscasc \* rdssig

Kaskodeen wird in Verstärkern oft benutzt, s. Vorlesung 7.

Folie 20

\*\*\*

Kaskode hat eine ähnliche Funktion wie ein Stromspiegel: Es gibt einen Stromeingang, einen Stromausgang, rin ist klein, rout ist groß.

Hauptunterschied: eine Kaskode wechselt den Stromrichtung ein Stromspiegel nicht, wie die Folie zeigt.

Folie 21

\*\*\*

Gain Stage, Eingangsstufe

Die Eingangsstufe oder Verstärkerstufe bekommen wir am einfachsten wenn wir einen Widerstand Rload an ein U-I Wandler anschließen. Der Widerstand hat zwei Aufgaben – erstens den Tin zu biasen und einen richtigen DC Arbeitspunkt herzustellen, zweitens den Ausgangsstrom in eine Spannung umzuwandeln.

Bei den Verstärkern werden normalerweise getrennt Groß- und Kleinsignalanalyse durchgeführt.

Die Kleinsignalanalyse ist normalerweise einfacher. Deshalb machen wir die Kleinsignalanalyse auch in Kombination mit Kapazitäten (AC Analyse). Diese werden in der Großsignalanalyse vernachlässigt.

Die Großsignalanalyse können wir mathematisch (mit Hilfe von Gleichungen) oder graphisch (mit Hilfe von Kennlinien) machen.

Im Grunde, unterscheiden wir die Bereiche wo der Eingangstransistor Sperrt (A) (Vgs = Vin << Vth) (wir vernachlässigen die schwache Inversion), wo der Transistor in Sättigung ist (B) (Vds = Vout > Vgs – Vth = Vdssat) und den Bereich wo der Transistor im Trioden-Bereich ist (Vout < Vdssat). Nur im Bereich B ist die Verstärkung hoch.

Folie 22

\*\*\*

Für den Bereich B können wir die Kleinsignalschaltung herleiten und zeichnen. Die Verstärkung ist einfach zu rechnen:

A = vout/vin - -gm (rds || Rload).

Nehmen wir an, dass Rload von rds viel kleiner ist. Die Verstärkung wäre dann

A ~ - gm Rload.

Folie 23

\*\*\*

Um die Verstärkung zu maximieren brauchen wir höhe gm und Rload.

Der Nachteil des Verstärkers mit einem Widerstand ist es, dass man nicht sowohl gm als auch Rload vergrößern kann.

Betrachten wir die Kennlinien: Auf dem gleichen Plot sehen wir die Ids-Vds Kennlinie des Transistors und die entsprechende Kennlinie des Widerstands. Die Ausgangsspannung bestimmen wir als der Schnittpunkt von Transistor- und Widerstandskennlinien. Falls die Eingangsspannung steigt, bewegt sich die Transistorkennlinie nach oben und die Ausgangsspannung von der positiven Versorgung VDD nach links.

Wenn der Widerstand groß ist, ist seine Kennlinie nah an X-Achse. Der Transistorstrom ist immer klein. Ein kleiner Strom bedeutet auch kleine Transkonduktanz.

Wählen wir jetzt den Widerstand klein, dann steigt die Kennlinie schnell. Der Transistorstrom ist höher, sowie auch die Transkondunktanz. Allerdings, wegen dem kleinen R, ist auch die Verstärkung klein.

Der Widerstand hat keine geeignete Kennlinie.

Eine Kennlinie die relativ schnell steigt und dann im großen Bereich waagerecht verläuft wäre am besser. Wir brauchen also eine gespiegelte NMOS Kennlinie. P-Kanal Transistor (PMOS) hat genau solche Kennlinie.

Folie 24

\*\*\*

Einen bessren Spannungsverstärkermachen wir, indem wir den Widerstand durch eine PMOS Stromquelle ersetzen. Wir zeichnen auch die Bias-schaltung für die Stromquelle in Form vom Diode-Connected Transistor und einer Referenz-Quelle. *Der Widerstand wird durch einen Stromspiegel und eine Referenz ersetzt.*

Aus den Kennlinien vom Tin und Tload können wir eine Vout/Voin Kennlinie wie in Folie 24 erwarten. Die Verstärkung ist hoch nur im Bereich wo beide Transistoren Tin und Tout in Sättigung sind. Wir sehen dass der DC Strom in dem Bereich relativ hoch ist, wir können also auch einen höhe Transkonduktanz erwarten.

Folie 25

\*\*\*

Das Klansignalmodel der Schaltung, für beide Transistoren in Sättigung, sehen wir in Folie 25. Die Spannungsverstärkung ist:

A = –gm rdsin || rdsload.

Der Ausgangswiderstand ist Rout = rdsin || rdsload. Die Eingangskapzität ist Cgs = Cox \* LW \* 2/3.

Im Fall, dass wir eine externe Ausgangskapazität Cout haben, lautet die AC Kennlinie:

Vout(s)/ Vin (s) = –gm Rout/(1 + s Rout \* Cout)

Rout = rdsin || rdsload.

Folie 26

\*\*\*

Solch ein Verstärker wird fast immer nur mit Rückkopplung verwendet. Wir hatten in Vorlesung 2 das Ergebnis, dass die Zeitkonstante mit Rückkopplung etwa um betaA niedriger ist als ohne RK. Wenn wir annehmen:

Ain = 1 und Aol(s) = –gm Rout/(1 + s Rout \* Cout) bekommen wir für die Zeitkonstante mit Gegenkopplung:

Tfb = Rout \* Cout/ beta gm Rout = Cout/beta gm.

Die Zeitkonstante ist von Rout unabhängig.

Erinnern wir uns auch: Für eine gute Linearität, muss man Aol = gmRout maximieren. Nur dann ist Afb von Prozess- und temperaturabhängigen Parameter wir gm und rds unabhängig.

Folie 27

\*\*\*

Die Verstärkung ist offensichtlich nur in einem schmalen Eingangs-Signalbereich hoch. Der Verstärker braucht Gegenkopplung um zu gewährleisten, dass die Eingangsspannung immer richtig ist.

Besprechen wir eine solche Rückkopplung. Nehmen wir an, wir möchten die Verstärkung von 10. In der Übung 1 hatten wir die Rückkopplung mit Widerständen wie in Folie 27. Der Unterschied ist es, die Übung wurde mit idealen Komponenten gemacht - jetzt haben wir eine realistische nichtlineare Schaltung.

Wenn wir die gleiche Rückkopplung für den Spannungsverstärker verwenden – bekommen wir zumindest für AC Signale (Kleinsignalmodel) die identische Schaltung wie in der Übung (bis auf den Unterschied, dass der Verstärker eine Stromquelle ist, in der Übung war es eine Spannungsquelle)

Folie 28

\*\*\*

Wenn wir aber DC Analyse machen, sehen wir, dass solche auf Widerständen basierende Rückkopplung zum falschen Arbeitspunkt führen kann. Die Spannung am Ausgang ist oft zu hoch die die Kennlinien zeigen.

Warum?

*Unsere erste Annahme ist, dass beide Transistoren Tload und Tin in Sättigung sind. Verwenden wir, um die Analyse zu vereinfachen, ein einfaches Ids = f(Vgs) Model. Für Ids > 0 gilt: Vgs = 0.5V (=Vth).*

*Unter Annahme dass alle Transistoren in Sättigung sind, hätten wir: Vin = 0.5V. Vout ist dann 10\* Vth = 5V. Oft ist die Versorgungsspannung kleiner als 5V, also Tload wäre dann nicht in Sättigung.*

Eine DC Rückkopplung in der Form Vin = Vout wäre deutlich besser, in dem Fall wäre Vout nicht so stark von Vth abhängig.

Folie 29

\*\*\*

Die Schaltung von Folie 29 wird oft als Alternative zur Schaltung aus der Übung 1 verwendet. Wir nehmen an, dass der Widertand Rfb sehr groß ist. (Rfb ~ 1GOhm)

Folie 30

\*\*\*

Für AC Signale bleiben nur Cin und Cfb, weil Rfb sehr groß ist und dessen Strom ist im AC-Fall verschwindend ist. Es gelten ähnliche Formeln wie in der Übungsschaltung. Im Prinzip soll man Rin durch 1/i Omega Cin und Rfb durch 1/i Omega Cfb ersetzen. Für die Verstärkung Beta A >> 1 hatten wir Afb =-Rfb/Rin. Dementsprechend gilt: Afb = -Cin/Cfb. Man kann zeigen, dass die Stabilität der Schaltung mit Kondensatoren besser ist als im Fall von Widerständen.

Folie 31

\*\*\*

Für DC Signalen bleibt nur der Widerstand. Es gilt Vin = Vout. (Igs = 0!)