Vorlesung 8

Folie 2

In den vorherigen Vorlesungen hatten wir die Verstärker mit einem Eingang und einem Ausgang.

Diese Verstärker nennen wir Single-Ended Verstärker.

Folie 3

Das Thema dieser Vorlesung sind die Differenzverstärker. Wie der Name sagt, verstärken sie die Differenz zwei Eingangssignale. Eine genauso wichtige Eigenschaft ist es: ein Differenzverstärker soll die Gleichtaktsignale nicht verstärken. Also wenn sich die zwei Eingangssignale um einen gleichen Beitrag erhöhen, sollte der Ausgang unverändert bleiben.

Anwendungen

Folie 5

Die erste Anwendung der Differenzverstärker ist die Messung von zwei Signalen relativ aufeinander, also Messungen von Signalen die nicht auf eine Masse bezogen sind.

Stellen wir uns vor, wir entwerfen einen Amperemeter. Wir haben eine Elektrische Schalung, einen Widerstandsnetzwerk und möchten die Ströme messen, die durch die Widerstände fließen. Es interessierten uns also nur die Spannungen zwischen den Widerstandselektroden und nicht die absoluten Potentiale bezogen auf eine Masse. Wir verwenden dafür den Differenzverstärker.

Folie 6

Weitere Anwendung der Differenzverstärker ist die differenzielle Signalbearbeitung. Die Idee ist hier dass ein Signal nicht als Spannung bezogen auf Masse durch eine Leitung übertragen wird (wir nennen dieses Signal asymmetrisch oder Single Ended), sondern als Potentialdifferenz zwischen zwei symmetrische Leitungen. Idealerweise haben die zwei Spannungen des Leitungspaares eine konstante Summe, also eine Phasendifferenz von 180 Grad.

Solche Signalübertragung hat einige Vorteile:

Folie 7

Die Amplitude des Differenzsignals ist zweimal höher als die Amplitude jeder Spannung des Leitungspaares einzeln betrachtet. Eine hohe Amplitude bedeutet auch einen hohen Signalrausch Verhältnis.

Folie 8

Stellen wir uns vor, wir entwerfen eine Schaltung in einer modernen Chiptechnologie. Die Versorgungsspannung ist nur etwa 1.0V. Ein Single-Ended Signal kann also höchstens eine Amplitude von 1V haben. Ein Differenzsignal dagegen, 2V. Also für einen gleichen Signalrausch Abstand können wir uns zweimal höheres Rauschen im Fall der Differenzsignale leisten.

Folie 9

Wenn die zwei Signale (Spannungen) einer Differenzleitung konstante Summe haben, erzeugen sie auf Entfernung keine Störungen.

Eine Störung beeinflusst ein Differenzsignal nur wenig. Das wird in Folie 9 illustriert. Stellen wir uns vor eine CMOS Leitung verläuft über einem differenziellen Leitungspaar. Beide Signale (Spannungen) des Leitungspaares werden durchs Übersprechen leicht gestört, die Störungen sind in Phase. Wenn der Empfänger nur die Differenz der Spannungen verstärkt, beeinflusst ihn solche Störung nicht, sie wird nicht verstärkt.

Folie 10

Der Differenzverstärker wird als eine grundlegende Elektronikkomponente – der Operationsverstärker benutzt. Mit dem Operationsverstärker lassen sich verschiedene Schaltungen mit der Rückkopplung realisieren, Verstärker, Filter, Oszillatoren.

Wir hatten zwei Beispiele der Rückkopplung – den invertierenden und nichtinvertierenden Verstärker.

Beachten wir, dass wir einen invertierenden Verstärker auch mit einem Single Ended Verstärker realisieren können, während man für einen nichtinvertierenden Verstärker einen Differenzverstärker braucht.

Folie 11

Eine weitere Anwendung ist der Komparator.

Folien 12 und 13

Der Differenzverstärker wird in digitalen Schaltungen verwendet. Beispiel sind die Empfänger und Treiber für die differentielle Datenübertragung. Der Vorteil dieser Übertragung ist es, dass die Potential-Differenz zweimal größere Amplitude hat als die zwei Signale (Spannungen) des Leitungspaars einzeln betrachtet. Deshalb kann man logische Pegel mit weniger Amplitude realisieren. Auf diesem Prinzip funktioniert Low Voltage Differential Signaling - LVDS.

Logische Bauteile, wie Gatter, oder Flipflops können ebenfalls basierend auf Differenzverstärker realisiert werden. Solche Logik verbraucht immer einen konstanten Strom, auch wenn sich digitale Niveaus ändern. Deshalb erzeugt sie keine Spannungsstörungen auf Versorgungsleitungen.

Folie 14

Klassifizierung

Man kann die Differenzverstärker nach dem Eingangs/Ausgangs-Typ (Single Ended, Differenziell) klassifizieren.

Ein Operationsverstärker hat z.B. den Differenzeingang (zwei Eingänge) und einen Single Ended Ausgang. Das Ausgangssignal ist auf Masse bezogen.

Es gibt auch Differenzverstärker mit dem Differenzausgang. Die zwei Spannungen des Differenzausgangs sind in Gegenphase, und ihre Summe konstant. Diese Verstärker nennt man auf Englisch „Fully Differential Amplifiers“ auf Deutsch symmetrische Differenzverstärker.

Folie 15

Die Anwendung dieser Verstärker ist die präzise analoge Signalbearbeitung. Solche Verstärker benutzt man z.B. in den getakteten Kapazitiven Verstärkern. (Switched Capacitor Amplifiers) Alle Gleichtaktstörungen z.B. die Ladungsinjektionen beim Öffnen von Schaltern werden unterdrückt.

Transistorrealisierung

Folie 17

Die Grundkomponente eines Differenzverstärkers ist das Differenzpaar.

Das Paar wird aus identischen Transistoren aufgebaut, die einen Bias-Strom teilen. Für Bias wird idealerweise eine Stromquelle benutzt oder ein großer Widerstand. Die Source-, bzw. Emitter-Kontakte des Transistorpaares werden normalerweise miteinander verbunden.

Der Stromanstieg in einem Transistor des Paares führt zum gleichen Stromabfall im anderen Transistor.

Folie 18

U-I Wandler

Um die Funktionsweise des Differenzpaares zu erklären, möchte ich zuerst eine einfachere Schaltung vorstellen.

Es ist ein U-I Wandler mit einem Widerstand zwischen dem Source-Kontakt und der Masse.

Der Source-Widerstand erzeugt eine Gegenkopplung. Die Gegenkopplung kann man im Bild rechts deutlicher sehen. Der Source Kontakt ist sowohl der Ausgang des Verstärkers (bzw. des Transistors), als auch sein Eingang. Sobald Source nicht geerdet ist, kommt es zu einer Signalübertragung vom Ausgang zum Eingang und zu einer Rückkopplung.

Folie 19

Wie beeinflusst die Gegenkopplung den U-I-Wandler?

Zum einen, sie vermindert die Verstärkung.

Zum anderen, sie vergrößert den Ausgangswiderstand.

Die Schleifenverstärkung der Schaltung ist

$$\text{Beta Aol} = -g_m * (R \parallel r_{ds}) \sim -g_m * R.$$

Diese kann man rechnen indem man die Rückkopplung an einer Stelle schneidet, eine Testquelle rechts vom Schnittpunkt einsetzt, und die Spannung links vom Punkt rechnet.

Die Verstärkung mit Rückkopplung ist die Verstärkung ohne Rückkopplung, in unserem Fall $A_{ol} = g_m$, dividiert durch den Faktor $1 + \text{beta Aol}$.

$$G = g_m / (1 + g_m * R)$$

Der Ausgangswiderstand mit Rückkopplung ist der Ausgangswiderstand ohne Rückkopplung ($r_{ds} + R$) multipliziert mit dem Faktor $1 + \text{beta Aol}$.

Den Widerstand ohne RK bekommt man indem man den Transistor ausschaltet (sein Gate und Source-Anschluss verbindet). Es ergibt sich

$R_{out} \sim r_{ds} \times g_m R$.

Folie 20

Symmetrischer Differenzverstärker

Einen symmetrischen Differenzverstärker bekommen wir sehr einfach indem wir zwei Single-Ended Verstärker verbinden und eine Stromquelle mit Innenwiderstand R oder einen Widerstand R als Bias verwenden.

Nehmen wir dafür den einfachsten Single-Ended Verstärker mit einem Eingangstransistor und einem Widerstand Rload.

Folie 21

Berechnen wir die Spannungsverstärkung der Schaltung für beide Ausgänge.

Da wir zwei Eingänge haben, könnten wir für jeden Eingang jeweils eine Verstärkung definieren. Diese hätten idealerweise den gleichen Betrag und verschiedene Vorzeichen.

Wir könnten das Prinzip der Superposition anwenden und die zwei Eingangsspannungsquellen einzeln betrachten. Wir schalten die Quelle 2 aus, indem wir sie durch einen Kurzschluss ersetzen, und rechnen die Ausgänge als Funktion der ersten Spannungsquelle. So bekommen wir die Verstärkungen A11 und A12.

Dann wiederholen wir den Vorgang für die zweite Quelle und berechnen A21 und A22.

Beachten wir, dass bei der Vorgehensweise die Schaltungen asymmetrisch werden.

Folie 22

Wir werden bei der Berechnung anders vorgehen. Man kann die zwei Eingangsspannungen auf ihr Mittelwert und Differenz mathematisch zerlegen.

Definieren wir die Differenz als $v_d = v_1 - v_2$. Definieren wir den Mittelwert als $v_{cm} = (v_1 + v_2)/2$. Es gilt $v_1 = v_{cm} + v_d/2$ und $v_2 = v_{cm} - v_d/2$.

Folie 23

Jetzt können wir die Spannungsquellen v_1 und v_2 im Schaltplan durch die Serien von v_{cm} und v_d Quellen ersetzen.

Warum machen wir so?

Wenn wir v_{cm} und v_d Quellen getrennt behandeln, behalten die Schaltungen eine Symmetrie. Diese kann man benutzen um die Schaltungsanalyse zu vereinfachen.

Folie 24

Fangen wir zuerst mit v_d Quellen an, wir behalten sie in der Schaltung und schalten die v_{cm} Anteile aus.

Wir schalten auch alle andere DC-Quellen aus (z.B. die Versorgungsspannung), da es sich um eine AC-Analyse handelt.

Die Schaltung ist symmetrisch und man kann eine Symmetrieachse definieren. Die Potentiale in den Knoten symmetrisch zu der Achse müssen den gleichen Betrag haben.

Die Vorzeichen sind unterschiedlich, weil die Eingangsquellen ebenfalls unterschiedliche Vorzeichen haben.

Die Potentiale an der Symmetrieachse müssen 0 sein. Null ist die einzige Zahl, welche die Bedingung $+0 = -0$ erfüllt.

(Beachten wir, dass es sich hier um eine AC-Analyse handelt. In der Großsignalschaltung sind die Potentiale an der Symmetrieachse nur konstant, aber nicht unbedingt null.)

Also die Source-Kontakte der Transistoren TA und TB sind geerdet. Die Transistoren verhalten sich als Common-Source Verstärkern.

Der Strom des Transistors T1 ist damit $g_m * v_d/2$.

Der Strom des Transistors T2 ist $-g_m * v_d/2$.

Die Spannung V_{out1} ist $-g_m R_{load} * v_d/2$ und die Spannung

$V_{out2} = g_m R_{load} * v_d/2$.

Folie 25

Wir definieren die Differenzverstärkung als

$$A_{diff} = (V_{out1} - V_{out2}) / (v_d) = -g_m * R_{load}$$

Folie 26

Berechnen wir jetzt die Common Mode- (CM-) Verstärkung (Gleichtaktverstärkung).

Wir schalten die v_d Quellen aus und betrachten nur v_{cm} .

Die Schaltung ist symmetrisch und die Spannungen an den Symmetriepunkten gleich.

Es ist wichtig folgendes zu bemerken: wegen der Symmetrie, fließen keine Ströme durch die Leitungen, die die Symmetrieachse schneiden.

Das erlaubt uns die Schaltung auf zwei Hälften zu zerlegen. Der Widerstand R bleibt in den Schaltungen. Er erzeugt eine Gegenkopplung wie bei dem U-I Wandler und die Drain-Ströme werden stark gedämpft.

Folie 27

$$i_1 \sim i_2 \sim v_{cm} * g_m / (1 + 2 R g_m)$$

Wir haben also eine CM-Unterdrückung (Gleichtaktunterdrückung).

Für die Spannungen am Ausgang gilt:

$$V_{out1} = -v_{cm} * g_m / (1 + 2 R_{gm})$$

und

$$V_{out2} = -v_{cm} * g_m / (1 + 2 R_{gm})$$

Wir definieren die Common-Mode Verstärkung als

$$A_{cm} = (V_{out1} - V_{out2}) / v_{cm}. \text{ Sie ist null wegen } V_{out1} = V_{out2}.$$

Folie 28

Es wird auch die Gleichtaktunterdrückung als A_{diff} / A_{cm} definiert.

Die Gleichtaktunterdrückung ist in unserem Fall praktisch unendlich und zwar aus zwei Gründen – wegen der Gegenkopplung von R und wegen der Tatsache dass wir einen Symmetrischen Verstärker haben, wo der Ausgang als Differenz $V_{out1} - V_{out2}$ definiert ist.

Folien 29-32

Wir haben im ersten Beispiel einen Differenzverstärker aus zwei einfachsten Single-Ended Verstärkern aufgebaut. Wir hätten auch komplexere Single-Ended Verstärker nehmen können. Üblicherweise nimmt man z.B. die Verstärker mit gefalteten Kaskoden. Folien 29-32 zeigen wie man beginnend vom Verstärker mit gefalteter Kaskode einen Differenzverstärker aufbaut.

Folie 33

Operationsverstärker

Wir werden jetzt den Differenzverstärker mit dem asymmetrischen Ausgang einführen, also einen Operationsverstärker.

Die Einfachste Möglichkeit wäre den symmetrischen Verstärker zu nehmen und nur einen Ausgang z.B. V_{out1} zu verwenden.

Wir schreiben die Formeln für Differenz- und Common Mode Verstärkung:

$$V_{diff} = V_{out1}/v_d = 1/2 * g_m * R_{load}$$

$$V_{cm} = V_{out1}/v_{cm} = -v_{cm} * g_m / (1 + 2 R g_m)$$

Die Gleichtaktunterdrückung ist:

$$V_{diff}/V_{cm} = 2 * (1 + 2 * R g_m).$$

Die Gleichaktunterdrückung ist relativ groß, aber nicht so gut wie im Fall vom symmetrischen Verstärker.

Die Differenzverstärkung ist um eine Hälfte kleiner.

Folie 34

Wenn wir die Schaltung durch einen aktiven Stromspiegel erweitern, erreichen wir ähnlich gute Eigenschaften wie beim Symmetrischen Verstärker.

Die neue Schaltung besteht aus einem Differenzpaar, hier mit einem Bias-Widerstand, und einem Stromspiegel.

Berechnen wir die Spannungsverstärkung.

Folie 35

Fangen wir zuerst mit v_d Quellen an, wir rechnen die Differenzverstärkung.

Die Schaltung ist fast symmetrisch aber es gibt ein Detail, das die Symmetrie stört. Es ist der Stromspiegel. An einer Seite haben wir die Diode an der anderen die Stromquelle. Der Widerstand vom Knoten 1 aufwärts ist klein: $1/g_m$. Wenn wir aber den Widerstand im Punkt 2 aufwärts messen, bekommen r_{ds} , einen großen Wert.

Folien 36-38

Um die Schaltung symmetrischer zu machen, verwenden wir einen Trick. Wir werden die Spannungsverstärkung nicht direkt rechnen, sondern den ganzen Differenzverstärker als eine reelle Stromquelle darstellen, also eine Thevenin Quelle.

Wir werden zuerst den Ausgangsstrom rechnen, indem wir den Ausgang erden (Folie 37).

Dann werden wir die Thevenin-Quelle (ihren Strom) ausschalten und den Innenwiderstand der Quelle bestimmen (Folie 38).

Die Spannungsverstärkung ist der Produkt $I \cdot R$.

Folie 39

Stromrechnung

Fangen wir mit der Stromrechnung an. Der Punkt 2 ist jetzt geerdet, sein Potential ist konstant und gleich 0.

Das Potential im Punkt 1 ändert sich nur wenig, da der Widerstand des Diode-Connected-Transistors T1 ($1/g_m$) klein ist.

Transistor T1 hat einen großen Ausgangswiderstand - eine kleine Spannungsänderung an seinem Drain beeinflusst ihn nicht.

Wir können also den Punkt 1 auch erden, ohne den Transistor T1 (seinen Strom) zu beeinflussen.

Folie 40

Wenn 1 und 2 geerdet sind, wird die Schaltung vollständig symmetrisch die AC-Spannungen an der Symmetrieachse sind 0.

Der Strom des Transistors T1 ist $g_m \times v_d/2$.

Der Strom des Transistors T2 ist $-g_m \times v_d/2$.

Folie 41

Der Stromspiegel spiegelt den Strom i_1 und leitet ihn in den Ausgang hinaus. Strom i_2 fließt vom Ausgang herein. Der Ausgangsstrom ist dann $i_1 - i_2$.

Schließlich, bekommen wir $i_{out} = g_m * v_d$.

Folie 42

Widerstandsrechnung

Rechnen wir jetzt den Ausgangswiderstand:

Die Theveninquelle schalten wir aus, indem wir die Eingangsquellen ausschalten.

Folie 43

Der Widerstand vom Ausgang aufwärts ist leicht zu rechnen, wir haben r_{dsM} .

(r_{dsM} ist der Widerstand des PMOS Transistors T_{M2} im Stromspiegel.)

Vom Ausgang nach unten sehen wir zunächst den Transistor T_2 . Dieser Transistor „sieht“ an seinem Source den Widerstand:

$$R_{eq} = (1/g_{m1}) \parallel R \sim 1/g_{m1}.$$

Es ist im Prinzip die gleiche Schaltung wie der U-I Wandler.

Als Ergebnis, bekommen wir für den Widerstand vom Ausgang nach unten

$R_{outdown} = (r_{ds2} + 1/g_{m1}) * g_{m2} * (1/g_{m1}) \sim 2 * r_{ds2}$. Die Rückkopplung hat den Widerstand dupliziert.

Folie 44

Der Strom der nach unten fließt (roter Pfeil) wird vom Stromspiegel empfangen, kopiert, so dass er auch vom Ausgang nach oben fließt. Wir müssen also den Widerstandswert Routdown halbieren, da sich sein Strom dupliziert.

Der Gesamtinnenwiderstand ist schließlich $r_{ds2} \parallel r_{dsM}$.

Die Differenzverstärkung ist dann: $g_m \times (r_{ds2} \parallel r_{dsM})$.

Diese Formel könnte man auch intuitiv vorhersagen, sie ist ähnlich wie im Fall eines Common Source Verstärkers.

Folien 45 - 48

Common Mode Verstärkung

Rechnen wir jetzt die Common Mode Verstärkung. Das wird deutlich einfacher sein.

Wir schalten die v_d Quellen aus und betrachten nur v_{cm} .

Den Ausgangswiderstand müssen wir nicht neu rechnen, nur den Strom.

Wie im Fall vom symmetrischen Verstärker gilt auch hier:

$$i_1 \sim i_2 \sim v_{cm} \times g_m / (1 + 2 R_{gm})$$

Der Stromspiegel hilft weiter. Der Ausgangsstrom ist $i_1 - i_2$, und da die Ströme i_1 und i_2 gleich sind, bekommen wir als Ergebnis 0.

Der Differenzverstärker mit dem Stromspiegel hat also eine sehr gute Gleichtaktunterdrückung.

Folien 49 - 52

Solcher Operationsverstärker wird in CMOS Schaltungen häufig benutzt.

Ein Nachteil ist seine limitierte Differenzverstärkung. $A = g_m \times (r_{ds2} \parallel r_{dsM})$.

r_{ds2} ist oft unzureichend groß. Der Transistor 2 muss gleichzeitig Verstärkung liefern, also g_m , aber auch einen großen r_{ds} haben.

Es ist unmöglich beides zu erreichen.

Eine Möglichkeit ist die Kaskode zu benutzen, wie im Fall von Single-Ended Verstärkern.

Wir haben in Folien 29-32 gesehen wie man, beginnend vom Verstärker mit gefalteter Kaskode, einen Differenzverstärker aufbauen kann. Folien 49-52 zeigen wie man einen entsprechenden Operationsverstärker entwirft.