**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 Gelichtaktsignale 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 Leitungspaars 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 Versorgungspannung ist nur etwa 1.0V. Ein Single-Ended Signal kann also höchstens eine Amplitude von 1V haben. Din 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 Leitungspaars 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 Leitungspaares 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 Eneded, Differenziell) klassifizieren.

Ein Operationsverstärker hat z.B. den Differenzeingang (zwei Eingänge) und einen Signle 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 größer Widerstand. Die Source-, bzw. Emitter-Kontakte des Transistorpaars 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 Differenzpaars 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

Beta Aol = - gm \* (R || rds) ~ - gm \* 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 Aol = gm, dividiert durch den Faktor 1+beta Aol.

G = gm/(1+gm \* R)

Der Ausgangswiderstand mit Rückkopplung ist der Ausgangswiderstand ohne Rückkopplung (rds + R) multipliziert mit dem Faktor 1+beta Aol.

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

Rout ~ rds x gm 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 Mittewert und Differenz mathematisch zerlegen.

Definieren wir die Differenz als vd=v1-v2. Definieren wir den Mittelwert als vcm=(v1+v1)/2. Es gilt v1 = vcm+vd/2 und v2 = vcm-vd/2.

**\*\*\***

**Folie 23**

Jetzt können wir die Spannungsquellen v1 und v2 im Schaltplan durch die Serien von vcm und vd Quellen ersetzen.

Warum machen wir so?

Wenn wir vcm und vd Quellen getrennt behandeln, behalten die Schaltungen eine Symmetrie. Diese kann man benutzen um die Schaltungsanalyse zu vereinfachen.

**\*\*\***

**Folie 24**

Fangen wir zuerst mit vd Quellen an, wir behalten sie in der Schaltung und schalten die vcm 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 gm \* vd/2.

Der Strom des Transistors T2 ist –gm \* vd/2.

Die Spannung Vout1 ist - gm Rload \* vd/2 und die Spannung

Vout2 = gm Rload \* vd/2.

**\*\*\***

**Folie 25**

Wir definieren die Differenzverstärkung als

Adiff = (Vout1-Vout1)/(vd) = - gm \* Rload

**\*\*\***

**Folie 26**

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

Wir schalten die vd Quellen aus und betrachten nur vcm.

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 Schalung auf zwei Hälfte 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**

Es gilt i1 ~ i2 ~ vcm \* gm/(1+2 R gm)

Wir haben also eine CM-Unterdrückung (Gleichtaktunterdrückung).

Für die Spannungen am Ausgang gilt:

Vout1 = - vcm \* gm/(1+2 Rgm)

und

Vout2 = - vcm \* gm/(1+2 Rgm)

Wir definieren die Common-Mode Verstärkung als

Acm = (Vout1-Vout2)/vcm. Sie ist null wegen Vout1 = Vout2.

**\*\*\***

**Folie 28**

Es wird auch die Gleichtaktunterdrückung als Adiff/Acm 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 Vout1 – Vout2 definiert ist.

**\*\*\***

**Folien 29-32**

Wir haben im ersten Bespiel einen Differenzverstärker aus zwei einfachsten Single-Ended Verstärkern aufgebaut. Wir hätten auch komplexere Single-Ended Verstärker nehmen können. Üblicherweise nimmt man z.B. die Verstärkern 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. Vout1 zu verwenden.

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

Vdiff = Vout1/vd = 1/2 \* gm \* Rload

Vcm = Vout1/vcm = - vcm \* gm/(1+2 R gm)

Die Gleichtaktunterdrückung ist:

Vdiff/Vcm = 2 \* (1 + 2\*R gm).

Die Gelichaktunterdrückung 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 vd 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/gm. Wenn wir aber den Widerstand im Punkt 2 aufwärts messen, bekommen rds, 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 \* 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/gm) 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 gm x vd/2.

Der Strom des Transistors T2 ist –gm x vd/2.

**\*\*\***

**Folie 41**

Der Stromspiegel spiegelt den Strom i1 und leitet ihn in den Ausgang hinaus. Strom i2 fließt vom Ausgang herein. Der Ausgangsstrom ist dann i1 – i2.

Schließlich, bekommen wir iout = gm \* vd.

**\*\*\***

**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 rdsM.

(RdsM ist der Widerstand des PMOS Transistors TM2 im Stromspiegel.)

Vom Ausgang nach unten sehen wir zunächst den Transistor T2. Dieser Transistor „sieht“ an seinem Source den Widerstand:

Req = (1/gm1) || R ~ 1/gm1.

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

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

Routdown = (Rds2 + 1/gm1) \* gm2 \* (1/gm1) ~ 2 x rds2. 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 rds2 || rdsM.

Die Differenzverstärkung ist dann: gm x (rds2 || rdsM).

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 vd Quellen aus und betrachten nur vcm.

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

Wie im Fall vom symmetrischen Verstärker gilt auch hier:

I1 ~ i2 ~ vcm x gm/(1+2 Rgm)

Der Stromspiegel hilft weiter. Der Ausgangsstrom ist i1 – i2, und da die Ströme i1 und i2 gleich sind, bekommen wir als Ergebnis 0.

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

**\*\*\***

**Folien 49 - 52**

 Solcher Operationsverstärker wird in CMOS Schaltungen häufig benutzt.

Ein Nachteil ist seine limitierte Differenzverstärkung. A= gm x (rds2 || rdsM).

Rds2 ist oft unzureichend groß. Der Transistor 2 muss gleichzeitig Verstärkung liefern, also gm, aber auch einen großen rds 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.