**Vorlesung 2**

**Gegenkopplung**

Einige Komponenten: Spannungsquellen und Stromquellen, Masse und Versorgungsspannung

**\*\*\***

Gesteuerte Spannungsquellen und Stromquellen sind idealisierte Darstellungen von realen Verstärkern.

Wir unterscheiden zwischen Spannungsverstärker (V-V), Stromverstärker (I-I), Transimpedanzverstärker (I-V), Transkonduktanzverstärker (V-I).

Die stromgesteuerten Verstärker messen den Strom und haben idealerweise eine kleine Eingangsimpedanz – sie werden wie Amperemeter eingesetzt.

Die spannungsgesteuerten Verstärker haben eine große Eingangsimpedanz ähnlich wie Voltmeter.

**\*\*\* AC DC**

Die Spannungen und Strome haben oft einen Mittelwert (DC-Teil) ungleich Null. Dieser Mittelwert ist für längere Zeiten stabil. Darüber hinaus haben die meisten elektrischen Größen auch ein zeitvariables AC Teil (Kleinsignal).

Als Beispiel nehmen wir das Signal vOUT = Vout + A sin(omega t)

vOUT ist Großsignal

Vout ist DC Teil

A sin(omega t) ist Kleinsignal (AC Teil)

**\*\*\* Klein- und Großsignalmodelle**

Elektronische Schaltungen sind fast immer nichtlinear – die Kennlinien sind nichtlinear und auch die Kapazitäten.

Es ist schwer nichtlineare differenzielle Gleichungen zu lösen.

Deshalb wird die Analyse von Schaltungen auf DC und AC Analyse unterteilt:

Wir rechnen zuerst die DC -Spannungen in einer Schaltung. Dafür verwenden wir die nichtlinearen Modele von Komponenten, allerdings, ohne Kapazitäten und Induktivitäten. (C wird entfernt, L kurzgeschlossen)

Dann werden die Kennlinien und die Kapazitäten/Induktivitäten in der Umgebung von DC Werten linearisiert (bzw. berechnet). Auf diese Weise werden die Kleinsignalmodelle hergeleitet.

Wir vernachlässigen dabei alle DC Spannungen und Strömen und rechnen ausschließlich die Kleinsignale. In einer Kleinsignal-Schaltung werden alle DC Spannungsquellen ausgeschaltet und alle permanenten Stromquellen entfernt.

Diese Trennung auf AC und DC Analyse ist heutzutage nicht immer notwendig – die Simulatoren kommen mit den nichtlinearen Gleichungen gut zurecht. Für die Paper/Bleistift Analyse ist sie sehr hilfreich.

**\*\*\* Verstärker**

Fangen wir mit einer Grundschaltung an – dem Verstärker.

Folie Verstärker 1:

In seiner einfachsten Variante hat der Verstärker einen Eingang und einen Ausgang (Single-Ended Verstärker). Die negative Versorgungsspannung ist an Masse (GND) angeschlossen, die positive Versorgungsspannung nennen wir VDD.

Folie Verstärker 2:

Ein Verstärker kann durch seine DC Kennlinie vout = vin beschrieben werden. Um die Analyse zu vereinfachen wird folgendes berücksichtigt: Zout ~ 0 und Zin ~ unendlich.

Die Folie zeigt eine typische Kennlinie eines Verstärkers. Die Verstärkung ist nur in einem schmalen Bereich hoch (und negativ). Nennen wir es „aktiver Bereich“. Für höhere bzw. niedrigere Spannungen sättigt der Verstärker.

Folie Verstärker 3-5:

Ist solch ein Bauteil allein nützlich? Als Verstärker eher nicht. Schließen wir z.B. eine Signalquelle an Eingang. Der Ausgang wird wahrscheinlich für alle Eingangssignale konstant ~ VDD sein. Nur wenn die Signalquelle an eine DC Spannung angeschlossen wird und die DC Spannung exakt gewählt wird, dass sie der Verstärker-Schwelle entspricht, wird am Ausgang ein Signal erzeugt. (Folie V. 4)

Die Ausgangssignale würden wahrscheinlich verzerrt sein und eher wie ein Taktsignal aussehen.

In Wirklichkeit würden die Ausgangssignale nach einer Weile wegen Temperaturänderung verschwinden. (Folie V. 5)

**\*\*\* Rückkopplung**

Eine wichtige Technik, die aus den nichtidealen aktiven Komponenten gute lineare Verstärker macht ist die Gegenkopplung. Die Gegenkopplung ermöglicht das Design präziser Verstärker und Oszillatoren. Diese Technik wurde vom Harold Black erfunden.

**\*\*\* Invertierender Verstärker 1**

Zwei einfacher Schaltungen mit Gegenkopplung sind der invertierende und der nichtinvertierende Verstärker.

Der invertierende Verstärker ist besonders einfach da er mit einem Single-Ended Verstärker realisiert werden kann. Folien „Invertierender Verstärker“ zeigt den Verstärker.

Solch ein Verstärker wird oft diskret gebaut.

**\*\*\* Invertierender Verstärker 2**

Im Chipdesign wird am meistens eine leicht veränderte Variante benutzt.

Wir verwenden eine langsame und starke resistive (ohmsche) Gegenkopplung für die DC Spannungen und eine schnellere und schwächere kapazitive Rückkopplung für die AC Signale. Solch ein Verstärker verstärkt die langsamen Signale nicht – die DC Gegenkopplung dient nur zur Stabilisierung des Arbeitspunkts. Die AC Signale werden dagegen verstärkt.

Die Schaltung besteht aus einem Widerstand Rfb und zwei Kondensatoren Cin und Cfb – die AC Signalquelle ist an Cin angeschlossen.

DC und AC Analyse wird getrennt gemacht.

**\*\*\* Invertierender Verstärker DC**

Der Arbeitspunkt soll gefunden werden. Alle Kondensatoren werden entfernt.

Die Schaltung besteht aus dem Verstärker – der aktiven Komponente – und der Gegenkopplung (dem Widerstand). Beachten wir, dass der Verstärker eine unendliche Eingangsimpedanz hat. Da kein Strom durch Rfb fließt, haben wir Vout = Vin.

**\*\*\* Invertierender Verstärker DC 2**

Wir zeichnen im gleichen Graph die Kennlinie des Verstärkers und die Kennlinie der Gegenkopplung. Die Linien schneiden sich in einem Punkt. Das ist der Arbeitspunkt.

Es soll noch überprüft werden ob die Rückkopplung positiv oder negativ ist. Es gilt in der Regel: – wenn es nur einen Schnittpunkt gibt, ist die Rückkopplung negativ. Positive Rückkopplungen führen zu mehreren Schnittpunkten –mehreren stabilen Arbeitspunkten. Ein Beispiel einer Schaltung mit positiver Rückkopplung ist die RAM Zelle (I. V. DC 3).

**\*\*\* Invertierender Verstärker DC 4**

Aus der Folie sieht man, dass der Arbeitspunkt im aktiven Bereich (im Bereich mit hoher Verstärkung) liegt. Das ermöglicht uns die Signale zu verstärken.

Es kann auch passieren, dass der Arbeitspunkt außerhalb des aktiven Bereiches liegt, wenn die Rückkopplung falsch dimensioniert ist. Beispiel – Rfb groß und Rin klein. Folie Inv. Verst. DC 5 zeigt diese Situation.

**\*\*\* Invertierender Verstärker AC**

Kleinsignalanalyse:

Im ersten Schritt wird die Kennlinie des Verstärkers linearsiert (Folie Inv. V. AC 1 und 2):

vout = - A vin

Der Verstärker ist ein Spanungsverstärker.

Vollständigkeitshalber wird der Ausgangswiderstand berücksichtigt.

Alle konstanten Spannungsquellen werden ausgeschaltet – auch VDD.

**\*\*\* Invertierender Verstärker AC 3 - 6**

Folgende Annahme wird gemacht: Rfb ist sehr groß. Das heißt, die Impedanz des Kondensators Cfb (1/Omega Cfb) ist für fast alle interessanten Frequenzen kleiner als Rfb. Da Cfb und Rfb eine Parallelschaltung bilden, können wir Rfb vernachlässigen.

Die vereinfachte Kleinsignalschaltung ist in Folie Inv. Verst. AC 6 gezeigt.

**\*\*\* Invertierender Verstärker RK**

Man kann erkennen dass die Rückkopplung negativ ist. Folie Inv. Verst. RK verdeutlicht es.

**\*\*\* Invertierender Verstärker RK Art**

Man kann auch erkennen, dass die Rückkopplung die Spannung am Ausgang des Verstärkers abgreift und die Ausgangsspannung in einen feedback-Strom umwandelt. Der feedback-Strom wird auf vom Signalstrom subtrahiert. Das ist eine „Spannung-Strom“-Gegenkopplung. Das Passive Netz am Eingang nennen wir Addierer – es addiert das Eingangs- und das Rückkopplungssignal.

Berechnen wir die Verstärkung vout / vsig…

**\*\*\* Invertierender Verstärker Kontenanalyse 1 und 2**

Erste Möglichkeit:

Eine Berechnung von Strömen und Spannungen nach dem Knotenpotentialverfahren.

Die Gleichungen sing relativ einfach zu schreiben. Im elektrischen Netzwerk haben wir nur zwei unabhängige Potentiale. Es gibt zwar noch einen anderen Knoten (Folie Kontenanalyse 2 – „x“) – dessen Spannung ist aber von vin linearabhängig.

Es ist immer relativ schwer solche Gleichungen auf Papier zu lösen. Die langen Ausdrücke entstehen, welche erst ganz zum Schluss gekürzt werden können. Es wäre noch deutlich schwieriger, wenn Rfb, Rin und andere Komponenten berücksichtigt werden.

**\*\*\* Analyse von Schaltungen mit RK 1**

Wir verwenden deshalb ein alternatives Verfahren für die Berechnung von Schaltungen mit Rückkopplung:

Die folgende Formel gilt:

A\_fb = A\_in A\_ol + FF/(1 – beta A)

A\_fb ist die Verstärkung mit Rückkopplung (Kreisverstärkung).

**\*\*\* Analyse von Schaltungen mit RK 2**

Für die Berechnung von Faktoren A\_in… soll die Rückkopplungsschleife in einem passenden Punkt unterbrochen werden, normalerweise am Eingang des Verstärkers.

**\*\*\* Ain – Definition…**

A\_in ist die Verstärkung im Addierer. (Wird gemessen von der Signalquelle (Haupteingang) zum Eingang des Verstärkers – Folie „Ain – Definition“.

A\_ol ist die Leerlaufverstärkung – Open Loop Gain. (Wird gemessen vom Verstärkereingang zum Hauptausgang – Folie Leerlaufverstärkung)

FF ist Feed-Forward (Vorwärtsregelung) es beschreibt die Signalverbreitung vom Haupteingang zum Hauptausgang durch das Rückkopplungsnetzwerk, wenn der Verstärker ausgeschaltet ist – Folie Feed-Forward. FF ist normalerweise vernachlässigbar.

BetaA ist die Schleifenverstärkung (Regelkreisverstärkung).

Es ist die Verstärkung vom Eingang des Verstärkers bis zur Stelle vor dem Schnittpunkt – Folie Schleifenverstärkung. Im Falle einer Gegenkopplung ist betaA negativ (genauer: DC Teil von betaA ist negativ).

Es gilt auch betaA = beta \* A\_ol wo beta die Gegenkopplung vom Haupausgang zum Verstärkereingang ist – Folie Rückkopplung.

Rechnen wir jetzt die einzelnen Terme.

Wir verwenden vier vereinfachte Schaltpläne.

**\*\*\* Ain – Berechnung**

Rechnen wir zuerst A\_in.

Ain ist als vin/vsignal definiert.

Folgendes ist wichtig: bei der A\_in Berechnung muss der Hauptausgang kurzgeschlossen werden. (In unserem Fall ist der Ausgang eine Spannung. Falls der Ausgang ein Strom wäre, müssten wir die Ausgangsleitung unterbrechen.)

Die Schaltung wird einfacher – es ist ein Spannungsteiler (Folie Ain Ber. 2). Es gilt vin = zfb/(zin + zfb) vsignal oder A\_in = zfb/(zin + zfb).

**\*\*\* Leerlaufverstärkung – Berechnung**

Rechnen wir A\_ol (Folie 42). A\_ol wird als vout / vin\* definiert. Zwischen vin\* und vout befindet sich der Verstärker mit einem Spannungsteiler am Ausgang (Folie LL. Ber. 2).

Unter Annahme Rout = 0, gilt Aout = - A. Sonst es ist Aout = -A (zin + zfb) / (zin + zfb + zout).

Die „Stärke“ der Methode ist es, dass es bereits am Anfang möglich ist die Faktoren zu vereinfachen. Die Formel für Spannungsteiler wird oft benutzt.

**\*\*\* Feed forward – Berechnung**

Rechnen wir FF. Für diese Rechnung wird der Verstärker ausgeschaltet. Das wird gemacht indem wir die Eingangsspannung vin\* kurzgeschlossen wird. Die Schaltung vereinfacht sich, wie in Folie FF Ber. 2 zu sehen ist. FF wird wie folgend definiert: vout/vsignal. Wir rechnen FF = zout/(zin + zfb + zout). Für Rout ~ 0 gilt auch FF ~ 0.

**\*\*\* Schleifenverstärkung – Berechnung**

Zum Schluss wird die Schleifenverstärkung berechnet: BetaA wird als vin / vin\* definiert. Das Ergebnis ist: betaA = - A zin / (zin + zfb + zout) (Schleif. Ber. 2). Unter Annahme zout = 0 gilt: BetaA = - A zin / zin + zfb.

**\*\*\* Verstärkung mit Rückkopplung**

Die Verstärkung mit Rückkopplung ist:

A\_fb = - A zfb / (zin + zfb) / 1 + A zin / (zin + zfb)

Oder

A\_fb = - A Cin / (Cin + Cfb) / 1 + A Cfb / (Cin + Cfb)

Annahmen: Rout = 0 => FF = 0

Diskussion

**\*\*\* Desensibilisierung**

Eine übliche Annahme ist |betaA| >> 1. Das gilt wenn der aktive Verstärker selbst große Verstärkung hat. In dem Fall gilt:

A\_fb = Ain Aol / betaA (Ain/beta) oder in unserem Fall

A\_fb = - Cin/Cfb

Es ist interessant (und praktisch), dass die Verstärkung A\_fb von A nicht abhängt. Die „Leerlaufverstärkung“ A ist schwer zu kontrollieren und temperaturinstabil. Die passiven Komponenten und insbesondere die Kondensatoren haben stabile und bekannte Eigenschaften. Da A\_fb nur von Kapazitäten abhängt, kann man eine gute Genauigkeit und Stabilität erwarten. Man redet von einer Desensibilisierung der Verstärkung. Noch besser, man kann die beiden Kondensatoren auf die gleiche Art realisieren z.B. als Metall-Metall Kondensatoren in Form von Fingern und auf diese Weise die Genauigkeit noch weiter erhöhen. Auflösung von besser als 10 Bits (Genauigkeit 1/1024) ist auf diese Weise möglich.

Die Verstärkung mit RK ist um betaA im Vergleich zum Wert ohne RK reduziert. Die Verstärkung wird „geopfert“ um das Netzwerk zu stabilisieren.

**\*\*\* Virtuelle Masse**

Die Spannung am Eingang des Verstärkers ist praktisch 0 – das folgt aus den Formeln vin = vout / A = - vsig Cin/(Cfb A). Das heißt, am Eingang des Rückgekoppelten Verstärkers haben wir keine (AC-) Spannung. Der Eingang ist eine virtuelle Masse. Anders gesagt: in gut gebauten Systemen mit Gegenkopplung ist der Fehlerterm ~ 0.

**\*\*\* Virtuelle Masse 3**

Die Annahme vin = 0 von vornerein (Folie Virtuelle Masse 3) würde uns erlauben die Schaltungsanalyse weiter zu vereinfachen. Es ist einfach vout = - Zfb/Zin vsig direkt zu rechnen wenn man vin = 0 annimmt. Die Spannungen bilden eine Art „Hebelarm“. Allerdings, im Fall einer vereinfachten Analyse (Annahme vin = 0) wüssten wir nicht welche Bedingung A erfüllen soll, bzw. wie groß muss es sein.

**\*\*\* Dimensionierung von A**

Betrachten wir noch einmal die Bedingung betaA >> 1, d.h. A Cfb / (Cin + Cfb) >> 1. Nehmen wir an, dass wir auch mit Rückkopplung eine relativ hohe Verstärkung möchten, zum Beispiel A\_fb = 10. Das erreichen wir mit: Cin = 10\*Cfb. Die Bedingung betaA >> 1 kann man als A Cfb/Cin = A/Afb >> 1 umschreiben. Aus der Formel für Afb kann man folgende Bedingung herleiten: Falls wir eine bestimmte Verstärkung mit Gegenkopplung möchten (z.B. A\_fb = 10), muss die aktive Verstärkung mindestens um 1-2 Größenordnungen hoher sein (z.B. A = 1000). Die Größe von A hängt von der gewünschten Auflösung ab: Z.B. wenn A ~ 10 Afb, Afb ist etwa 10% niedriger als gewünscht. A ~ 100 Afb, Afb ist um 1% niedriger, usw.

Wir haben ein Tradeoff zwischen der Genauigkeit (beta A groß) und der Verstärkung (beta klein).

**\*\*\* Gegenkopplung und Zeitkonstante**

Wir haben bist jetzt einige Eigenschaften der RK kennen erwähnt – RK dämpft die Verstärkung, macht die Verstärkung stabiler, RK erzeugt eine virtuelle Masse am Eingang des Verstärkers.

Auch im AC Bereich, beeinflusst RK die Signaleigenschaften. Rückkopplung verändert die Zeitkonstanten – sie kann einen Kondensator in eine Spule „umwandeln“ und die Schaltung zu Schwingungen bringen.

Betrachten wir den Fall wenn die Verstärkung A eine Zeitkonstante hat (Folie Zeitkonstante 1): A wird im komplexen Domain wie folgend beschrieben:

A = Adc / (1 + s T)

T ist die Zeitkonstante.

Die Antwort des Verstärkers auf einen Impuls (Stufenantwort) sieht wie folgend aus Abbild. Die Anstiegszeit ist etwa 3 \* T.

**\*\*\* Gegenkopplung und Zeitkonstante 2**

Die Verstärkung mit RK wird mit folgender Gleichung beschrieben:

Afb = c1 A / (1 + c2 A), c1 und c2 sind die Konstanten die von Kapazitäten abhängen.

Setzen wir A = Adc / (1 + s T) in die Formel für Afb ein:

Afb = c1 A / (1 + s T) / (1 + c2 A / (1 + s T))

Wenn wir es umschreiben, bekommen wir:

Afb = Afb0 (1 / 1 + s t/1+betaA)

Vfb0 ist die „DC“ Verstärkung (Verstärkung für langsame Signale): Afb0 = c1 Adc / 1 + c2 Adc

Die Zeitkonstante ist um 1+ bata A kleiner geworden. In vorherigen Folien haben wir gesehen, dass die Verstärkung ebenfalls um den gleichen Faktor kleiner geworden ist (im Vergleich zum Wert ohne Rückkopplung).

**\*\*\* Gain-Bandwidth Produkt 1**

Das bedeutet: RK verkleinert die Verstärkung und macht den Verstärker schneller.

Erinnern uns das die Bandbrite eines Systems zum 1/T proportional ist. Genau genommen, die Bandbreite ist B = 1/(T \* 2Pi).

Das Produkt Verstärkung \* Bandbreite (Gain-Bandwidth (GBW) - Produkt) ist konstant.

Beispiel: ein Verstärker hat die GBW-Produkt von 100Mhz/2Pi ohne RK. Wie schnell ist ein Buffer (ein Verstärker mit Verstärkung 1) der wir aus diesem Verstärker mittels RK gebaut wird? Antwort: der Buffer hat die Zeitkonstante 10ns.

Man kann die Vergrößerung von Bandbreite als eine Art Desensibilisierung von Verstärkung verstehen. Wir versehen die Desensibilisierung üblicherweise so – Temperatur verändert A und RK wirkt „dagegen“ und hält Afb konstant. Eine Änderung von A kann auch durch Frequenz verursacht werden. Auch in dem Fall hält die Gegenkopplung Afb relativ konstant bis beta A auf etwa 1 fällt. Erst dann fällt Afb unter dem Wert 1/beta deutlich.