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 Ströme 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 $v_{OUT} = V_{out} + A \sin(\omega t)$

v_{OUT} ist Großsignal

V_{out} 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 Modelle 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 Ströme 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 Grundschialtung 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 $v_{out} = v_{in}$ beschrieben werden. Um die Analyse zu vereinfachen wird folgendes berücksichtigt: $Z_{out} \sim 0$ und $Z_{in} \sim \text{unendlich}$.

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 $\sim VDD$ 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 R_{fb} und zwei Kondensatoren C_{in} und C_{fb} – die AC Signalquelle ist an C_{in} 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 $V_{out} = V_{in}$.

***** 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 linearisiert (Folie Inv. V. AC 1 und 2):

$$v_{out} = -A v_{in}$$

Der Verstärker ist ein Spannungsverstärker.

Vollständigkeitshalber wird der Ausgangswiderstand berücksichtigt.

Alle konstanten Spannungsquellen werden ausgeschaltet – auch VDD.

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

Folgende Annahme wird gemacht: R_{fb} ist sehr groß. Das heißt, die Impedanz des Kondensators C_{fb} ($1/\Omega C_{fb}$) ist für fast alle interessanten Frequenzen kleiner als R_{fb} . Da C_{fb} und R_{fb} eine Parallelschaltung bilden, können wir R_{fb} 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 v_{out} / v_{sig} ...

***** Invertierender Verstärker Knotenanalyse 1 und 2**

Erste Möglichkeit:

Eine Berechnung von Strömen und Spannungen nach dem Knotenpotentialverfahren.

Die Gleichungen sind relativ einfach zu schreiben. Im elektrischen Netzwerk haben wir nur zwei unabhängige Potentiale. Es gibt zwar noch einen anderen Knoten (Folie Knotenanalyse 2 – „x“) – dessen Spannung ist aber von v_{in} 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 R_{fb} , R_{in} 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.

*** A_{in} - Definition...

A_{in} ist die Verstärkung im Addierer. (Wird gemessen von der Signalquelle (Haupteingang) zum Eingang des Verstärkers - Folie „ A_{in} - 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.

βA 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 βA negativ (genauer: DC Teil von βA ist negativ).

Es gilt auch $\beta A = \beta * A_{ol}$ wo β die Gegenkopplung vom Hauptausgang zum Verstärkereingang ist - Folie Rückkopplung.

Rechnen wir jetzt die einzelnen Terme.

Wir verwenden vier vereinfachte Schaltpläne.

*** Ain - Berechnung

Rechnen wir zuerst A_{in} .

A_{in} ist als v_{in}/v_{signal} 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 $v_{in} = z_{fb}/(z_{in} + z_{fb}) v_{signal}$ oder $A_{in} = z_{fb}/(z_{in} + z_{fb})$.

*** Leerlaufverstärkung - Berechnung

Rechnen wir A_{ol} (Folie 42). A_{ol} wird als v_{out} / v_{in}^* definiert. Zwischen v_{in}^* und v_{out} befindet sich der Verstärker mit einem Spannungsteiler am Ausgang (Folie LL. Ber. 2).

Unter Annahme $R_{out} = 0$, gilt $A_{out} = -A$. Sonst es ist $A_{out} = -A (z_{in} + z_{fb}) / (z_{in} + z_{fb} + z_{out})$.

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 v_{in}^* kurzgeschlossen wird. Die Schaltung vereinfacht sich, wie in Folie FF Ber. 2 zu sehen ist. FF wird wie folgend definiert: v_{out}/v_{signal} . Wir rechnen $FF = z_{out}/(z_{in} + z_{fb} + z_{out})$. Für $R_{out} \sim 0$ gilt auch $FF \sim 0$.

*** Schleifenverstärkung - Berechnung

Zum Schluss wird die Schleifenverstärkung berechnet: βA wird als v_{in} / v_{in}^* definiert. Das Ergebnis ist: $\beta A = -A z_{in} / (z_{in} + z_{fb} + z_{out})$ (Schleif. Ber. 2).

Unter Annahme $z_{out} = 0$ gilt: $\beta A = -A z_{in} / z_{in} + z_{fb}$.

*** Verstärkung mit Rückkopplung

Die Verstärkung mit Rückkopplung ist:

$$A_{fb} = - A_{zfb} / (z_{in} + z_{fb}) / 1 + A_{zin} / (z_{in} + z_{fb})$$

Oder

$$A_{fb} = - A_{Cin} / (C_{in} + C_{fb}) / 1 + A_{Cfb} / (C_{in} + C_{fb})$$

Annahmen: $R_{out} = 0 \Rightarrow FF = 0$

Diskussion

*** Desensibilisierung

Eine übliche Annahme ist $|\beta A| \gg 1$. Das gilt wenn der aktive Verstärker selbst große Verstärkung hat. In dem Fall gilt:

$$A_{fb} = A_{in} A_{ol} / \beta A \quad (A_{in}/\beta A) \text{ oder in unserem Fall}$$

$$A_{fb} = - C_{in}/C_{fb}$$

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

*** Dimensionierung von A

Betrachten wir noch einmal die Bedingung $\beta A \gg 1$, d.h. $A C_{fb} / (C_{in} + C_{fb}) \gg 1$. Nehmen wir an, dass wir auch mit Rückkopplung eine relativ hohe Verstärkung möchten, zum Beispiel $A_{fb} = 10$. Das erreichen wir mit: $C_{in} = 10 * C_{fb}$. Die Bedingung $\beta A \gg 1$ kann man als $A C_{fb}/C_{in} = A/A_{fb} \gg 1$ umschreiben. Aus der Formel für A_{fb} 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 höher sein (z.B. $A = 1000$). Die Größe von A hängt von der gewünschten Auflösung ab: Z.B. wenn $A \sim 10 A_{fb}$, A_{fb} ist etwa 10% niedriger als gewünscht. $A \sim 100 A_{fb}$, A_{fb} ist um 1% niedriger, usw.

Wir haben ein Tradeoff zwischen der Genauigkeit (βA groß) und der Verstärkung (β klein).

*** Gegenkopplung und Zeitkonstante

Wir haben bis 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:

$$A = A_{dc} / (1 + s T)$$

T ist die Zeitkonstante.

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

*** Gegenkopplung und Zeitkonstante 2

Die Verstärkung mit RK wird mit folgender Gleichung beschrieben:

$A_{fb} = c_1 A / (1 + c_2 A)$, c_1 und c_2 sind die Konstanten die von Kapazitäten abhängen.

Setzen wir $A = A_{dc} / (1 + s T)$ in die Formel für A_{fb} ein:

$$A_{fb} = c_1 A / (1 + s T) / (1 + c_2 A / (1 + s T))$$

Wenn wir es umschreiben, bekommen wir:

$$A_{fb} = A_{fb0} (1 / (1 + s T / (1 + \beta A)))$$

A_{fb0} ist die „DC“ Verstärkung (Verstärkung für langsame Signale): $A_{fb0} = c_1 A_{dc} / (1 + c_2 A_{dc})$

Die Zeitkonstante ist um $1 + \beta A$ 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 Bandbreite eines Systems zum $1/T$ proportional ist. Genau genommen, die Bandbreite ist $B = 1/(T \cdot 2\pi)$.

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

Beispiel: ein Verstärker hat die GBW-Produkt von $100\text{MHz}/2\pi$ 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 verstehen die Desensibilisierung üblicherweise so – Temperatur verändert A und RK wirkt „dagegen“ und hält A_{fb} konstant. Eine Änderung von A kann auch durch Frequenz verursacht werden. Auch in dem Fall hält die Gegenkopplung A_{fb} relativ konstant bis βA auf etwa 1 fällt. Erst dann fällt A_{fb} unter dem Wert $1/\beta$ deutlich.