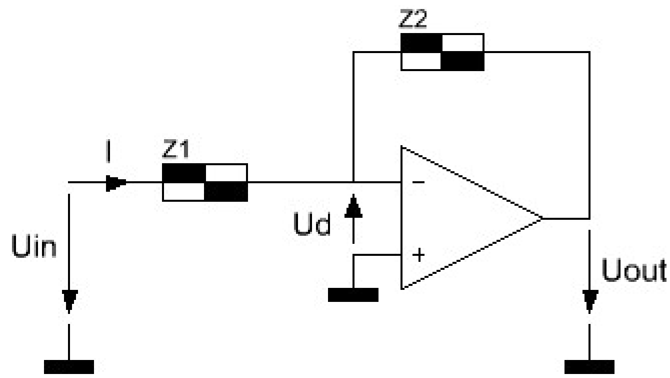
Funktionsweise von OPVs in Abhaengigkeit deren open-loop Verstaerkung



Ein OPV ist ein Verstaerker, der die differentielle Eingangsspannung Ud verstaerkt an Uout ausgibt. Der verstaerkungsfaktor ist in einem realen OPV endlich und wird in der „open-loop-gain“ Kurve im Datenblatt angegeben. Dabei handelt es sich um die Verstaerkung mit der der OPV das Signal Ud einer bestimmten Frequenz verstaerkt. Damit der OPV ein gewuenschtes Verstaerkungsverhalten aufweisen kann, wird er extern beschaltet. Dabei stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der Spannung Ud, Uout und dem Strom I ein, der abhaengig von Z1, Z2, Uin und Uout ist. Folgend soll nun die Uebertragungsfunktion der obigen Schaltung bestimmt werden.

Dabei handelt es sich um den allgemein bekannten invertierenden Verstaerker, dessen Ausgangsspannung gemeinhin als Uout=$-\frac{Z2}{Z1}Uin$ angegeben wird. Die Widerstaende Z1 und Z2 koennen dabei komplex sein, oder auch nicht. Im Folgenden sollen nur Amplituden von Groessen betrachtet werden, keine Phasen. Fuer komplexe Groessen werden dann also nur deren Betraege betrachtet. Nun soll die Ubertragungsfunktion in Abhaengigkeit vom open-loop-gain hergeleitet werden. Dafuer lassen sich folgende drei Formeln aufstellen:

Uout(ω)=V(ω)Ud(ω)

-> Ud(ω)=$\frac{Uout(\omega)}{V(\omega)}$ I.

Dabei ist V(ω) die open-loop-Verstaerkung des OPV bei einer bestimmten Frequenz ω. In dieser Formel stellt sich die Grundlegende Funktionsweise eines OPVs als Differenzverstaerker dar. Zur vereinfachung werden zukuenftig die ω’s weggelassen.

Durch die zusaetzliche Beschaltung lassen sich noch folgende Formeln angeben:

Ud+I*Z2+Uout=0 II.

Die Eingaenge des OPV sollen ideal hochohmig sein, sodass I sowohl durch Z1 als auch Z2 fliesst.

Uin-I*Z1+Ud=0

-> $I=\frac{Ud+Uin}{Z1}$ III.

Nun setzt man III. in II. ein und erhaelt:

$Ud+\frac{Z2}{Z1}(Uin+Ud)+Uout=0$ IIa.

Ud wird durch I. ersetzt:

$\frac{Uout}{V}+\frac{Z2}{Z1}(Uin+\frac{Uout}{V})+Uout=0$ IIb.

Wir formen weiter um, bis wir die Ubertragungsfunktion bekommen:

$$\frac{Uout}{V}+\frac{Z2}{Z1}Uin+\frac{1}{V}\frac{Z2}{Z1}Uout+Uout=0$$

$$Uout\left(\frac{1}{V}+\frac{1}{V}\frac{Z2}{Z1}+1\right)=-\frac{Z2}{Z1}Uin$$

$$Uout\left(\frac{Z1+Z2+VZ1}{VZ1}\right)=-\frac{Z2}{Z1}Uin$$

$$\frac{Uout}{Uin}=-\frac{Z2\cdot V\cdot Z1}{Z1(Z1+Z2+VZ1)}$$

$$\frac{Uout}{Uin}=-\frac{V\cdot Z2}{(V+1)Z1+Z2}$$

Geht man nun davon aus, dass V eine sehr grosse Zahl ist, dann ist der Unterschied zwischen V und V+1 vernachlaessigbar. Unter der gleichen Annahme kann man auch Z2 im Nenner weglassen. So erhaelt man in der Tat die allgemein bekannte und im Eingang erwaehnte Formel

$\frac{Uout}{Uin}=-\frac{Z2}{Z1}$, da sich die Verstaerkung V dann herauskuerzen laesst.

Die Auswirkung der open-loop-verstaerkung sollen in einem Beispiel gezeigt werden. Es soll ein Invertierer mit einer Verstaerkung von 1 gebaut werden. Nach den gewoehnlichen Formel wuerde man fuer Z1 und Z2 den gleichen Widerstandswert waehlen, z.B. 1kOhm. Im ersten Fall hat die Eingangsspannug eine Frequenz, bei der der OPV eine open-loop-Verstaerkung von 60dB haben soll, also
$V(\omega 1)=1000$. Im zweiten Fall hat der OPV bei $\omega 2$ nur 20dB Verstaerkung:
$V(\omega 2)=10$.

$$1: \frac{Uout}{Uin} = -\frac{1000 \cdot 1k}{1001 \cdot 1k + 1k} = -\frac{1000k}{1002k} = -0.998$$

Das ist nah genug am gewuenschten Wert von -1. Im zweiten Fall sieht das aber anders aus:

$$2: \frac{Uout}{Uin} = -\frac{10 \cdot 1k}{11 \cdot 1k + 1k} = -\frac{10k}{12k} = -0.8$$

Hier liegt die Ausgangsspannug schon 20% unter dem Sollwert, und das, obwohl der OPV noch eine open-loop-Verstaerkung von 20dB bei dieser Frequenz hat. Oder noch krasser. Ich war immer der Meinung: „Wenn ein OPV eine Unity-Gain-Frequenz von X hat, dann kann ich damit auch einen Invertierer mit Verstaerkung von 1 bauen, der auch bis X funktioniert.“ Unity-gain heisst, der OPV hat bei dieser Frequenz eine Verstaerkung von 1. Nach unserer Formel ergibt sich dann fuer die Ubertragungsfunktion:

$$3: \frac{Uout}{Uin} = -\frac{1 \cdot 1k}{2 \cdot 1k + 1k} = -\frac{1k}{3k} = -0.3$$

Wie sich herausstellt ist meine Annahme katastrophal falsch! Obige Beispiele lassen sich auch auf komplexe Widerstaende anwenden. Diese stellen ja nichts anderes als einen frequenzveraenderlihen Widerstand dar. Bei eine bestimmten Frequenz haben sie einen bestimmten Widerstand und Phase. Betrachtet man nur die Amplitude koennen auch deren Werte bei einer gegebenen Frequenz in die Formel eingesetzt werden.

Es wird nie moeglich sein, mit einem aktiven Filter die Grenzen eines OPVs auszureizen. Beim Schaltungsdesign muss man immer einige dB zwischen dem gewollten Frequenzgang und der open-loop-Verstaerkung einplanen. Siehe Bild.