

ELEKTRONISCHE SCHALTUNGSTECHNIK LABOR

Institut für Elektronik, TU Graz

Operationsverstärker

Übungsinhalt:

- Dimensionierung und Aufbau von Operationsverstärkerschaltungen
- Messen an diesen Schaltungen

Vorausgesetzte Kenntnisse:

- Übungsunterlagen

Literatur:

- Vorlesung Grundsaltungen
- U. Tietze Ch. Schenk Halbleiter-Schaltungstechnik

OPERATIONSVERSTÄRKER (OV)

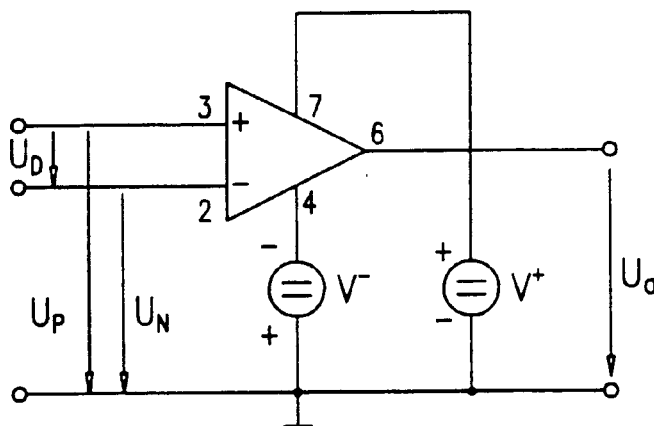
1. Einleitung

Operationsverstärker sind sehr wichtige Bauelemente der analogen Elektronik.

Früher wurden sie ausschließlich in Analogrechnern zur Durchführung mathematischer Operationen verwendet. Daher stammt ihr Name.

Heute sind sie in Form integrierter Mikroschaltungen als universell einsetzbare Verstärkerbauelemente weit verbreitet. Sie sind sehr preiswert und verdrängen mehr und mehr Verstärkerschaltungen, die mit einzelnen Schaltelementen aufgebaut sind.

1.1. Schaltsymbol des OV:



Anschlußbelegung ist die eines typischen Einfachoperationsverstärkers

$U_D = U_P - U_N$ Eingangsspannungsdifferenz

U_a Ausgangsspannung

$V^+ (V^-)$ positive (negative) Betriebsspannung (z.B. $\pm 15V$)

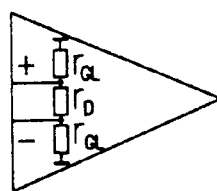
- o Differenzverstärkereingangsstufe daher zwei Eingänge
(+ nicht invertierender ; - invertierender Eingang)
- o Die Ausgangsspannung wird auf Masse bezogen, daher nur ein Ausgang.

1.2. Innerer Aufbau - wesentliche Eigenschaften

Ein OV ist ein mehrstufiger gleichspannungsgekoppelter Verstärker.

Die Eingangsstufe ist immer ein Differenzverstärker.

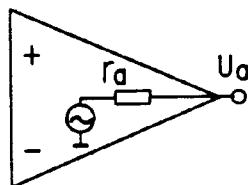
- o Es ist daher möglich nicht nur Wechselspannungen, sondern auch Gleichspannungen driftarm zu verstärken.
- o Weiters erhält man durch den Eingangsverstärker sehr hohe Eingangswiderstände:



$r_D \approx 10^6 \text{ bis } 10^{13} \Omega$ Differenzeingangswiderstand

$r_{GL} \approx 10^9 \text{ bis } 10^{14} \Omega$ Gleichakteingangswiderstand

Die Endstufe (z.B. Gegentakt-AB-Schaltung) dient als Ausgangspuffer.



Dadurch erreicht man niedrige Ausgangswiderstände r_a

(50Ω bis $1,5 \text{ k}\Omega$) des unbeschalteten OV's.

Durch den mehrstufigen Aufbau erzielt man eine sehr hohe Differenzverstärkung

$$(A_D = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_d}) \quad (A_D \text{ etwa } 10^5 - 10^7)$$

Wegen dieser hohen Differenzverstärkung (und anderer Eigenschaften des OV) kann die Wirkungsweise einer Operationsverstärkerschaltung

(Übertragungsfunktion $T(s) = \frac{U_a(s)}{U_e(s)}$) überwiegend durch die äußere Gegenkopplungsbeschaltung bestimmt werden.
(siehe 3.)

2. Wichtige Kenngrößen eines realen OV

2.1. Differenzverstärkung

$$A_D = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_D} = \frac{\Delta U_a}{\Delta (U_P - U_N)} \approx 10^5 - 10^7 \quad \text{Differenzverstärkung bzw. offene Verstärkung (Open Loop Gain)}$$

$$A_D [\text{dB}] = 20 \log A_D$$

Wegen dieser extrem hohen und außerdem exemplar- und temperaturabhängigen Differenzverstärkung ist es unmöglich ohne Gegenkopplung nur durch Anlegen einer U_D eine bestimmte U_a einzustellen !!!

Auch deshalb, weil dann die Eingangsoffsetspannung (siehe 2.3.) ebenfalls mit A_D verstärkt wird!

Es ist daher absolut sinnlos einen OV ohne Gegenkopplung als linearen Verstärker zu verwenden !!!

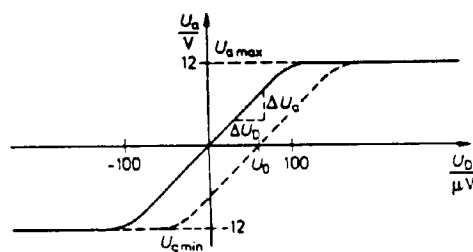
Bitte beachten Sie auch, daß U_D bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten darf (Datenblätter: Differential Input Voltage).

Obrigens gilt der zumindest näherungsweise lineare Zusammenhang

$$\Delta U_a = A_D \cdot \Delta U_D \quad \text{natürlich nicht für beliebig große } U_D:$$

(Woher sollen z.B. Ausgangsspannungen außerhalb des Versorgungsspannungsbereiches kommen?)

Ausgangsaussteuerbarkeit:



Ausgangsspannung als Funktion der Eingangsspannungsdifferenz. Gestrichelt eingezeichnet: ohne Offsetspannungsabgleich

Für $V^+ = +15\text{V}$; $V^- = -15\text{V}$

Wie weit die Ausgangsspannung U_a eines OV an seine Betriebsspannungen "herankommt" (Ausgangsaussteuerbarkeit bzw. Output Voltage Swing) hängt vom OV-Typ, dem Ausgangsstrom I_a und von der Temperatur ab.

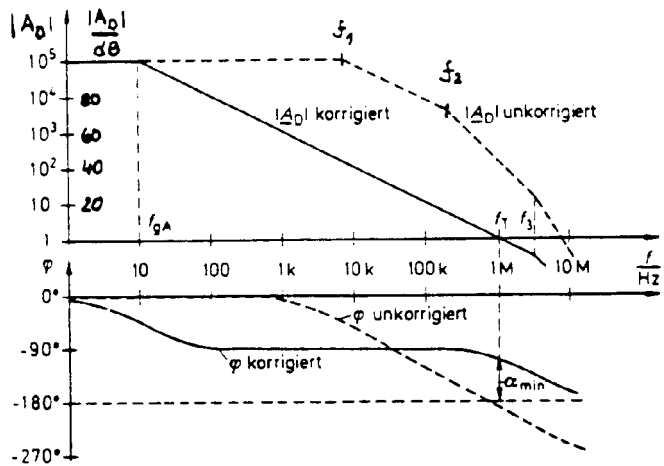
A_D ist aber nicht nur von U_a abhängig, sondern natürlich auch von der Frequenz.

Frequenzabhängigkeit der Differenzverstärkung

 $A_D(s)$

$$s = j\omega$$

$$\omega = 2\pi \cdot f$$



Bode-Diagramm der Differenzverstärkung bei Frequenzgangkorrektur
(Aufspaltung der Grenzfrequenzen)

Aufgrund der parasitären Kapazitäten und des mehrstufigen Aufbaus verhält sich ein Operationsverstärker ohne Korrektur-Kapazität wie ein Tiefpaß höherer Ordnung.

Eine derartige Übertragungsfunktion ist unbrauchbar, weil wir den OV ja gegenkoppeln wollen.

Wenn ein OV aber universell gegenkoppelbar sein soll, muß seine Phasenverschiebung im ganzen Bereich, in dem $|A_D(s)| > 1$ ist, kleiner als 120° sein.

Dann ergibt sich für jede ohm'sche Gegenkopplung eine Phasenreserve α von $180^\circ - 120^\circ = 60^\circ$ und damit stabiles Verhalten. (Frequenzlinienverfahren!)

Diese Bedingung läßt sich z.B. dadurch erfüllen, daß man den Frequenzgang der Differenzverstärkung so korrigiert, daß er im Bereich $|A_D| > 1$ wie ein Tiefpaß 1. Ordnung verläuft.

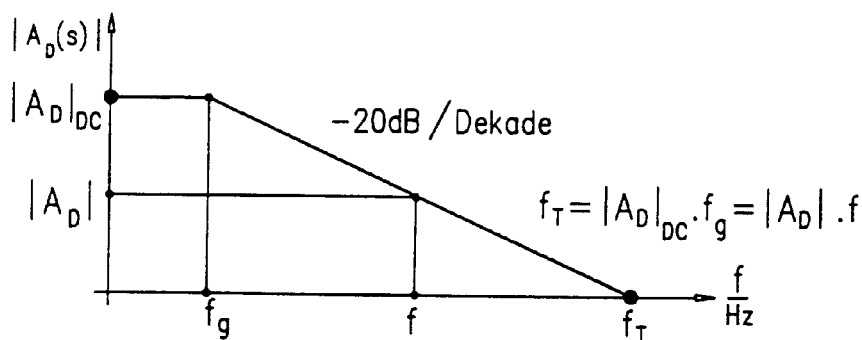
Dies erreicht man durch eine Korrekturkapazität, die entweder monolithisch integriert (universelle Frequenzgang-Korrektur) oder an entsprechende IC-PIN's extern angelötet wird (angepaßte Frequenzgang-Korrektur).

Diese Korrekturkapazität bewirkt neben der Verkleinerung von f_1 eine Vergrößerung von f_2 auf Werte oberhalb f_3 .

Das heißt, es kommt zu einer Aufspaltung der Grenzfrequenzen (Pol-Splitting).

Bitte beachten Sie, daß der so entstandene Frequenzgang des OV durch zwei Datenblattangaben eindeutig festgelegt ist:

- $|A_D|_{DC}$ Gleichspannungsverstärkung (dc voltage gain)
- f_T Transitfrequenz : $|A_D| = 1$ (Unity Gain Frequency)
wird auch Verstärkungs-Bandbreite Produkt
(Gain Bandwidth Product) genannt wegen:



2.2. Gleichtaktverstärkung; Gleichtaktunterdrückung

Legt man an den nichtinvertierenden (P) und an den invertierenden Eingang (N) des OV dieselbe Spannung, dann liegt ein spezieller Fall von Gleichtaktaussteuerung vor:

Da in diesem Fall $U_D = 0$ ist, müßte unter der Voraussetzung, daß die Eingangsoffsetspannung Null ist, auch $U_a = 0$ sein.

Dies ist aber leider nicht exakt der Fall.

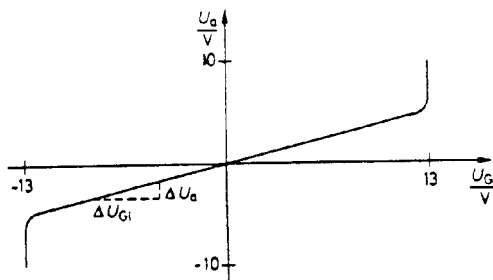
Denn jeder reale OV verstärkt auch Gleichtaktsignale!

Allgemein gilt:

$$U_{GL} = \frac{U_P + U_N}{2} \quad \text{Gleichtaktspannung (arithmetischer Mittelwert!)}$$

$$A_{GL} = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_{GL}} \quad \text{Gleichtaktverstärkung}$$

A_{GL} ist aber nur für kleine Gleichtaktspannungen konstant:



Ausgangsspannung als Funktion der Gleichtakt-Eingangsspannung

$$v^+, v^- : \pm 15V$$

Beachten Sie bitte,
daß die Gleichtakt-
spannung gewisse Grenz-
werte nicht über-
schreiten darf:

(Datenblätter:

Input Common-Mode

Voltage Range)

Berechnung des Einflusses einer Gleichtaktaussteuerung:

Solange der OV innerhalb seines linearen Arbeitsbereiches ist (Ausgangs-
aussteuerbarkeit !) gilt das Superpositionsgesetz.

Daher:

$$\Delta U_a = A_D \cdot \Delta U_D + A_{GL} \cdot \Delta U_{GL}$$

$$\text{mit } \Delta U_D = \Delta(U_P - U_N)$$

$$\Delta U_{GL} = \Delta\left(\frac{U_P + U_N}{2}\right)$$

Wichtige Kenngröße des OV:

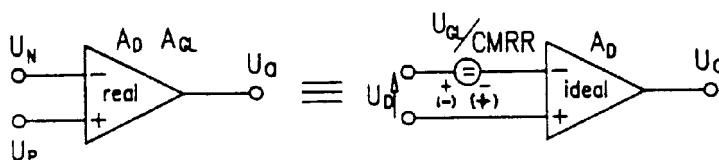
$$CMRR = \frac{A_D}{A_{GL}} \quad \text{Gleichtaktunterdrückung (Common-Mode Rejection Ratio)}$$

(etwa $10^5 - 10^6$ bei einem durchschnittlichen OV)

damit wird:

$$\Delta U_a = A_D \left(\Delta U_D + \frac{A_{GL}}{A_D} \cdot \Delta U_{GL} \right) = A_D \left(\Delta U_D + \frac{\Delta U_{GL}}{CMRR} \right)$$

Somit kann folgendes Ersatzschema für die Wirkung einer Gleichtaktaus-
steuerung gezeichnet werden:



$$U_D = U_P - U_N ; \quad U_{GL} = \frac{U_P + U_N}{2}$$

Obrigens lassen Sie sich nicht stören, wenn in manchen Büchern

$$U_D = \frac{U_P - U_N}{2} \quad \text{ist.}$$

Das ist aus rein mathematischen Gründen.

(Zugehöriges A_D ist dann doppelt so groß.)

2.3. Eingangsoffsetspannung (Input Offset Voltage) U_0

Beim realen OV ist $U_a \neq 0$, wenn $U_D = 0$ und $U_{GL} = 0$.

Man muß eine kleine Spannungsdifferenz (mV bis μ V je nach OV-Typ) an die Eingänge legen, um die Ausgangsspannung U_a auf Null zu bringen.

Diese Differenzspannung heißt Offsetspannung U_0 (Eingangsoffsetspannung). Sie ist exemplar-, temperatur- und zeitabhängig.

Wichtigste Ursache:

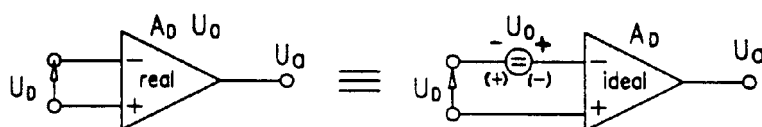
Die beiden Eingangstransistoren (Differenzverstärker) haben nicht exakt identische Eigenschaften.

Für gleiches I_C sind unterschiedliche U_{BE} nötig.
(Dotierungstiefe; Dotierungskonzentration ...)

Bei einigen OV-Typen (OP 27; LF 356 ...) kann man die Offsetspannung mit einem externen Potentiometer auf Null abgleichen.

Die Drift (Temperatur, Zeit) aber bleibt natürlich.

Ersatzschaltbild für die Wirkung von U_0 :



2.4. Eingangsströme des OV's:

Beim realen OV sind die Eingangsströme $\neq 0$ (μ A-pA je nach OV-Typ).

Ursache:

Damit der OV überhaupt funktionieren kann, benötigen die beiden bipolaren Eingangstransistoren des Differenzverstärkers im OV einen Basisstrom (I_N ; I_P).

Dieser Gleichstrom muß über die äußere Beschaltung in den OV fließen können!

Da OV's praktisch immer so betrieben werden, daß ihre Eingangsdifferenzspannung etwa Null wird (siehe 4.1.) und damit in den beiden Eingangstransistoren ungefähr derselbe Kollektorstrom fließt, ist folgende Definition sinnvoll:

$$I_B = \frac{I_P + I_N}{2} \dots\dots \text{Eingangsruestrom (Input Bias Current)}$$

$$I_O = |I_P - I_N| \dots\dots \text{Eingangsoffsetstrom}$$

Ändert man die Eingangsgleichtaktspannung um einen differentiell kleinen Wert, so ändert sich auch der Eingangsruestrom. Der Quotient der beiden Änderungen ist der Gleichakteingangswiderstand des OV's (siehe 1.2). Für den Differenzeingangswiderstand gilt analoges.

Ersatzschaltbild für die Wirkung von OV-Eingangsströmen:



2.5. Anstiegsgeschwindigkeit (Slew Rate)

Die Ausgangsspannung eines realen OV kann ihren Beitrag nicht beliebig schnell ändern. Die Anstiegsgeschwindigkeit ist begrenzt.

(0,1V/µs + 50V/µs je nach OV-Typ)

Das begrenzende Element ist die Korrekturkapazität C_K :

$$Q = C_K \cdot U = I \cdot t$$

$$U = \frac{Q}{C_K}$$

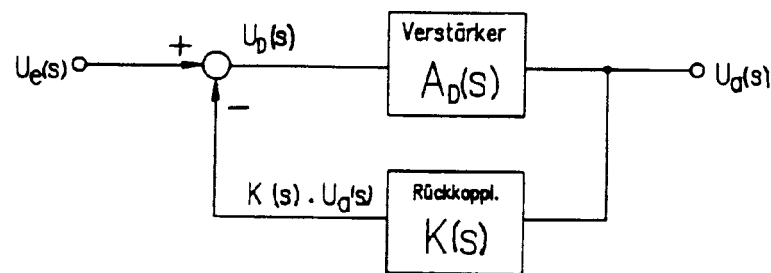
$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{C_K} \cdot \frac{dQ}{dt} = \frac{I}{C_K}$$

$$\left. \frac{du}{dt} \right|_{\max.} = \frac{I}{C_K} = \frac{I_{1 \max}}{C_K}$$

$I_{1 \max.}$ ist der maximale Strom, den der Eingangsdifferenzverstärker zur Umladung der Korrekturkapazität liefern kann.

3. Prinzip der Gegenkopplung:

Gehen wir zunächst von der üblichen Darstellung eines Regelkreises aus:



Stabilität dieses Regelkreises läßt sich mit Frequenzkennlinienverfahren (Regelungstechnik 1) überprüfen.

Die Übertragungsfunktion $T(s)$ des geschlossenen Regelkreises berechnet sich zu:

$$T(s) = \frac{U_a(s)}{U_e(s)}$$

$$U_a(s) = A_D(s) \cdot U_D(s) = A_D(s) \cdot [U_e(s) - k(s) \cdot U_a(s)]$$

$$U_a(s) \cdot [1 + k(s) \cdot A_D(s)] = A_D(s) \cdot U_e(s)$$

$$T(s) = \frac{U_a(s)}{U_e(s)} = \frac{A_D(s)}{1 + k(s) \cdot A_D(s)}$$

Jetzt kommt ein wesentlicher Schritt:

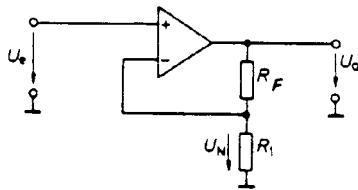
für $K(s) \cdot A_D(s) \gg 1$ wird $T(s)$:

$$T(s) = \frac{1}{k(s)}$$

Das heißt aber, daß für sehr große A_D (OV!) die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises nur durch das äußere Rückkopplungsnetzwerk und nicht durch den Verstärker bestimmt ist!

Als nächstes gilt es zu zeigen, daß mittels eines OV ein Regelkreis genau dieser Art sehr leicht zu realisieren ist:

z.B. Nicht invertierender Verstärker:



Nicht-invertierender Verstärker

$U_D = U_e - k \cdot U_a$; $U_a = A_D \cdot U_D$ wird vom OV ausgeführt;

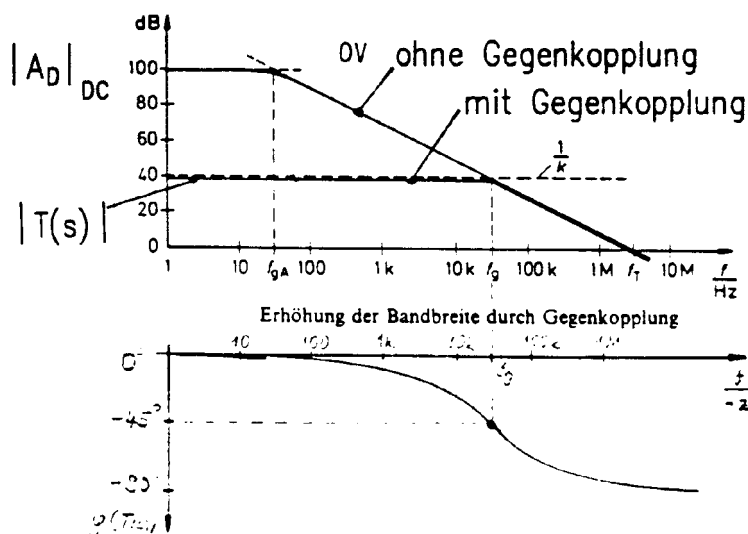
$$U_N = \frac{U_a}{R_F + R_1} \cdot R_1$$

$$K = \frac{U_N}{U_a} = \frac{R_1}{R_F + R_1}$$

$$T(s) = \frac{1}{K} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

Voraussetzung: $A_D \gg 1$!!

Damit erhält man folgende Übertragungsfunktion für einen realen nicht-invertierenden Verstärker (geschlossener Regelkreis!).



Für Frequenzen sehr viel kleiner als die Frequenz f_g bestimmt die Gegenkopplungsbeschaltung das Verhalten, dann der OV !

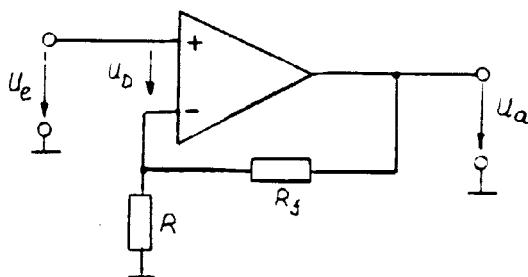
4. Regeln für einfache Berechnung von OV-Schaltungen

4.1. Knieregel

Ein OV mit Gegenkopplungsbeschaltung stellt innerhalb seines linearen Arbeitsbereiches (Ausgangsaussteuerbarkeit !) seine Ausgangsspannung U_a so ein, daß seine Eingangsspannungsdifferenz U_D gleich Null wird.

Gegenkopplung heißt bei OV-Schaltungen Rückführung der Ausgangsspannung über eine entsprechende Beschaltung zum invertierenden Eingang, sodaß einer Ausgangsspannungsänderung immer entgegengewirkt wird! - Die Schaltung also stabil ist.

Z.B. Nichtinvertierender Verstärker:



Knieregel:

$$U_e \stackrel{!}{=} U_a \cdot \frac{R}{R+R_f}$$

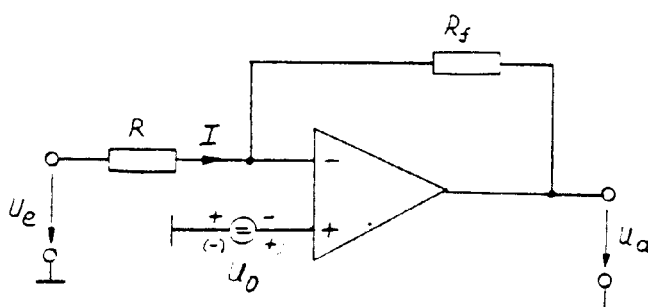
$$\Rightarrow U_a = U_e \left(1 + \frac{R_f}{R}\right)$$

4.2. Superpositionsgesetz

Innerhalb seiner Ausgangsaussteuerbarkeitsgrenzen kann man den OV als lineares Bauelement betrachten, d.h. es gilt das Superpositionsgesetz.

Daher kann man die Wirkung von z.B. Eingangsspannung U_e und Eingangsoffsetspannung U_0 auf den Ausgang getrennt berechnen (die andere Spannungsquelle jeweils kurzschließen) und dann addieren.

Z.B. Invertierender Verstärker:



1.) $U_e \rightarrow U_a$

$$I = \frac{U_e}{R}$$

$$U_a = -I \cdot R_f$$

$$U_a = -U_e \cdot \frac{R_f}{R}$$

2.) $U_0 \rightarrow U_a$ (wie nichtinvertierender Verstärker)

$$U_a = \pm U_0 \left(1 + \frac{R_f}{R}\right)$$

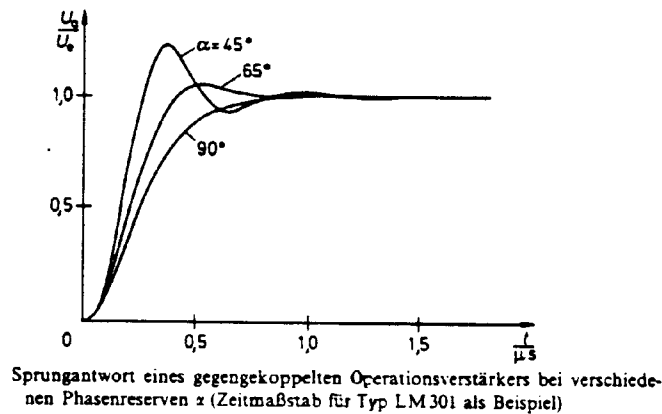
$$\text{Superposition: } U_a = -U_e \cdot \frac{R_f}{R} \pm U_0 \left(1 + \frac{R_f}{R}\right)$$

5. Stabilität von OV-Schaltungen:

Als Stabilitätskriterium kann das Frequenzkennlinienverfahren verwendet werden. (Stabilitätsuntersuchung anhand des Frequenzganges des offenen Regelkreises.) Darauf wird aber im Rahmen der Laborübung verzichtet.

5.1. Meßtechnische Überprüfung der Stabilität:

Die Sprungantwort einer gegengekoppelten OV-Schaltung ist ein Kriterium für die Phasenreserve und damit für die Stabilität:



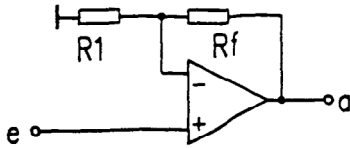
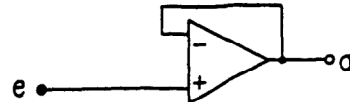
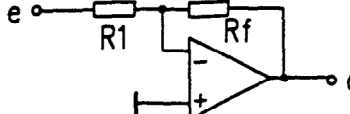
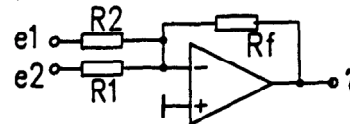
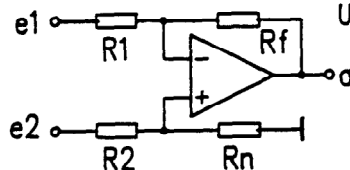
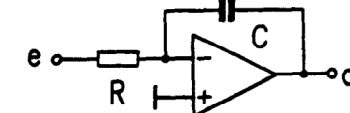
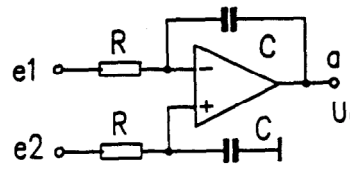
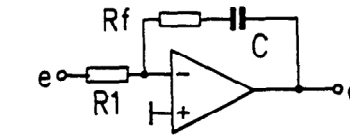
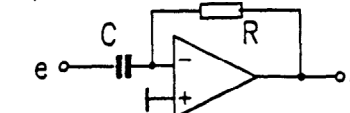
Prinzipiell könnte man auch die Rückkopplung aufschneiden und den Frequenzgang des offenen Regelkreises messen:

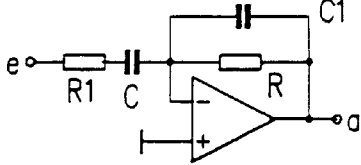
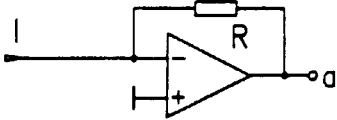
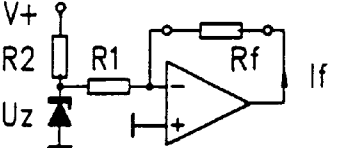
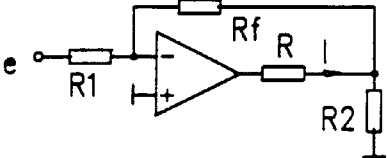
Dazu legt man an der Trennstelle eine sinusförmige Spannung an und mißt die am anderen Ende ankommende ebenfalls sinusförmige (Voraussetzung lineares System) Spannung.

Die Messung ist aber schwierig, weil es ja eine Messung mit OV ohne Gegenkopplung ist! (siehe 2.1.)

Einige wichtige OV-Schaltungen

(die mit * bezeichneten OV-Schaltungen sind Prüfungsstoff)

Nichtinvertierender Verstärker		$U_a = U_e(1 + R_f/R_1)$	*
Spannungsfolger (Impedanzwandler)		$U_a = U_e$	*
Invertierender Verstärker (P-Regler)		$U_a = -U_e(R_f/R_1)$	*
Addierer (Summierer)		$U_a = -R_f(U_{e1}/R_1 + U_{e2}/R_2)$	*
Subtrahierer (Differenzverstärker)		$U_a = -U_{e1}(R_f/R_1) + U_{e2}(R_n/(R_n + R_2))(1 + R_f/R_1)$ $R_1 = R_2; R_f = R_n:$ $U_a = R_f/R_1(U_{e2} - U_{e1})$	*
Invertierender Integrator (I-Regler)		$U_a = -\left(1/RC\right) \int_0^t U_e(t) dt + U_{a0}$	*
Differenzintegrator		$U_a = \left(1/RC\right) \int_0^t (U_{e2}(t) - U_{e1}(t)) dt + U_{a0}$	
Proportional-Integralverstärker (PI-Regler)		$U_a = -U_e(R_f/R_1) - \left(1/R_f C\right) \int U_e(t) dt + U_{a0}$	
Differentiator (Prinzip !!) -Stabilitätsprobleme-		$U_a = -RC \frac{dU_e}{dt}$	*

Differentiator (praktische Realisierung)		$R1.C > R.C1$ für $f \ll 1/(2\pi.R1.C)$: $U_a = -RC \frac{dU_e}{dt}$
I/U-Wandler		$U_a = -I.R$
Konstantstromquelle (Erdfreie Last (Rf)) U/I-Wandler + Uref		$I_f = U_z/R1$
U/I-Wandler (erdfreie Last (R))		$I = (U_e/R1)(1 + R_f/R2)$