

OPV Gegenkopplung bei Operationsverstärkern

Korrekturen zu dieser Versuchsanleitung finden Sie im Internet unter:
www.ertl.eitum.de/lehre/prakt1/

Hinweis

Die mit **+** gekennzeichneten Fragen müssen während der häuslichen Vorbereitung bearbeitet werden. Die schriftlichen Lösungen sind vor Versuchsbeginn dem Betreuer vorzulegen und werden dann mit diesem besprochen.

Mit **■** sind die im Praktikum zu lösenden schriftlichen Auswertungen gekennzeichnet.

1. Grundlagen

In der Messtechnik sind häufig die zu messenden Spannungen und Ströme sehr klein und müssen für eine Weiterverarbeitung verstärkt werden. Zudem darf das Meßobjekt möglichst wenig belastet werden, um die Rückwirkung auf die Meßgröße gering zu halten. Diese sind eine Reihe weiterer Aufgaben erfüllen elektronische Meßverstärker, die meist mit gegengekoppelten Operationsverstärkern aufgebaut sind.

In der Anwendung ist zwischen dynamischen und statischen Meßfehlern zu unterscheiden. Der Praktikumsversuch beschränkt sich aus Zeitgründen auf niedrige Frequenzbereiche mit Fragen nach statischen Nullpunktfehlern, nach statischen Kennlinien, usw.

1.1 Gegenkopplung GK

1.1.1 Prinzip der GK

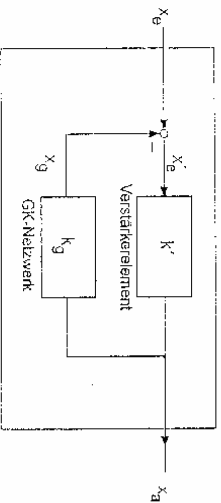


Bild OPV-1: Prinzip der Gegenkopplung

Bild OPV-1 zeigt das Signallaufbild eines gegengekoppelten Verstärkers mit der Eingangsgröße x_e und der Ausgangsgröße x_a . Als Verstärkerelement („offener Verstärker“) wird ein Signalverstärker mit möglichst hoher Übersetzung $k = x'_e/x_e$ benötigt, der im Versuch mit einem Operationsverstärker realisiert wird. Das Gegenkopplungsnetzwerk hat die Übersetzung $k_g = x_g/x_a$. Die interessierende Übersetzung k des gegengekoppelten Verstärkers mit der Ausgangsgröße x_a und der Eingangsgröße x_e ist allgemein definiert als $k = dx_a/dx_e$ und vereinfacht sich bei einem linearen GK-Netzwerk zu $k = x'_e/x_e$.

Mit $x_a = k \cdot x'_e$, $x_g = k_g x_a$ und $x'_e = x_e - x_g$ berechnet sich die Übersetzung k zu:

$$k = \frac{x_a}{x_e} = \frac{x_a}{x'_e + k_g x_a} = \frac{1}{\frac{x'_e}{x_a} + k_g}$$

Im allgemeinen ist k' eine komplexe frequenzabhängige Größe. Im Versuch wird vereinfachend von reellen k' -Werten ausgegangen.

Für sehr hohe reelle Werte von k' ergibt sich die wichtige Näherung:

$$k = \frac{x_a}{x_e} \approx \frac{1}{k_g}$$

Daraus leiten sich für $k' \gg 1$ folgende Vorteile des GK-Prinzips ab:

Die Übersetzung k des gegengekoppelten Verstärkers wird unabhängig von der Übersetzung k' des Verstärkerelementes (Operationsverstärker).

Die Übersetzung k wird allein durch das GK-Netzwerk bestimmt. Mit dem gleichen Verstärkerelement (Operationsverstärker) lassen sich deshalb verschiedene Verstärkertypen (Spannungs-, Stromverstärker, Integrierer, usw.) realisieren.

Die Übersetzung k ist durch Variieren von k_g einstellbar; ihre Stabilität hängt nur von der Stabilität des GK-Netzwerkes ab. Bei einem GK-Netzwerk aus Widerständen als ist diese Voraussetzung beispielsweise leicht zu erfüllen.

Die Ausgangsgröße x_a ist eingepreßt, d.h. lastunabhängig.

Erkauft werden diese günstigen Eigenschaften mit dem Nachteil, daß die nutzbare Übersetzung mit $k \ll k'$ deutlich niedriger liegt als beim offenen Verstärker.

1.1.2 Einfluß von Störgrößen bei GK

Auf einen gegengekoppelten Verstärker können 2 Arten von Störgrößen wirken additive Störgrößen z_e, z'_e und multiplikative Störgrößen z_m .

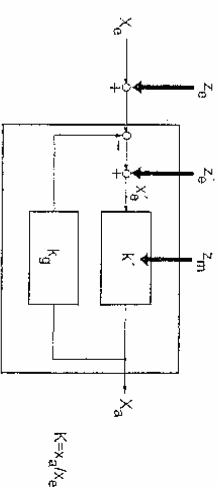


Bild OPV-2: Störgrößen bei einem gegengekoppelten Verstärker

additive Störgrößen: Von außen wirken als Störgrößen z_e beispielsweise induktive Einstrahlungen oder Thermospannungen; interne Störgrößen z'_e sind insbesondere die Nullpunktfehler des Verstärkerelementes. Diese Störgrößen addieren sich am Eingang zum Nutzsinal x_e und führen am Ausgang zusätzlich zum Nutzteileil kx_g zu einem additiven Störanteil von $x_{a,St}$, der zu einer Verschiebung der Kennlinie führt:

$x_a = k \cdot x_g + x_{aos} = k \cdot x_g + k \cdot x_{aos}$ (Bild OPV-3). Am Ausgang tritt also ein additiver Nullpunktfehler auf, der bei einem gegengekoppelten Verstärker üblicherweise auf den Eingang bezogen wird und dann als *auf den Eingang bezogener Nullpunktfehler* x_{aos} bezeichnet wird. Diese Nullpunktfehler (bei Operationsverstärkern sind dies die Offsetfehler) bereiten besonders bei kleinen Meßsignalen x_g im Bereich von x_{aos} große Probleme, die auch nicht durch das GK-Prinzip beherrschbar sind.

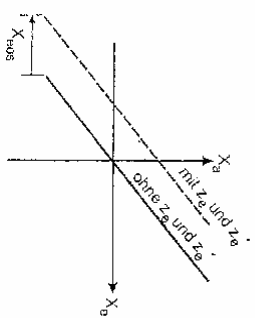


Bild OPV-3: Additive Störgrößen bei GK

multiplikative Störgrößen: Derartige Störungen z_m treten in Form von k' -Änderungen auf. Sie können bei hohen k' -Werten durch die GK gut beherrscht werden.

1.1.3 Grundschaltungen gegengekoppelter Verstärker

Wird das GK-Prinzip auf die elektrische Größen Strom und Spannung angewendet, so ergeben sich jeweils 2 Kombinationsmöglichkeiten am Eingang wie am Ausgang des Verstärkers und somit insgesamt 4 Verstärkertypen:

- Verstärker für Spannung auf Spannung \Rightarrow *u/u*-Verstärker
- Verstärker für Spannung auf Strom \Rightarrow *u/i*-Verstärker
- Verstärker für Strom auf Spannung \Rightarrow *i/u*-Verstärker
- Verstärker für Strom auf Strom \Rightarrow *i/i*-Verstärker

Die Übersicht gibt Aufschluß über die mit GK erzielbaren Eingangs- und Ausgangswiderstände von Meßverstärkern. Diese erfüllen die Forderung nach einer hochohmigen Spannungsmessung („u“-Eingang) bzw. nach einer niederohmigen Strommessung („i“-Eingang). Ebenso erfüllt wird die Forderung nach einem niederohmigen Spannungsausgang (typisch für eine ideale Spannungsquelle) mit eingepreägter Ausgangsspannung bzw. nach einem hochohmigen Stromausgang (typisch für eine ideale Stromquelle) mit eingepreägtem Ausgangsstrom.

Widerstände bei GK-Art				
	u/u	u/i	i/u	i/i
eingangsseitig	hoch: $R_g \gg R'_g$	hoch: $R_i \gg R'_i$	niedrig: $R_i \gg R'_i$	niedrig: $R_g \ll R'_g$
ausgangsseitig	niedrig: $R_i \ll R'_i$	niedrig: $R_g \ll R'_g$	hoch: $R_i \gg R'_i$	hoch: $R_g \gg R'_g$

R_g, R_i : Eingangs- bzw. Ausgangswiderstand des gegengekoppelten Verstärkers
 R'_g, R'_i : Eingangs- bzw. Ausgangswiderstand des offenen Verstärkers

Die schaltungstechnische Realisierung dieser 4 Grundschaltungen wird relativ einfach, wenn man als Verstärkerelement einen sog. Operationsverstärker einsetzt.

1.2 Operationsverstärker OV

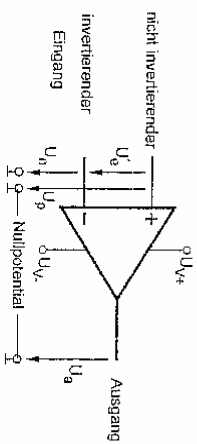


Bild OPV-4: Schaltensymbol eines OV

Das Schaltsymbol eines OV (Bild OPV-4) zeigt einen Differenzverstärker mit zwei Eingängen und einem Ausgang. Die beiden angedeuteten Anschlüsse der positiven und negativen Versorgungsspannung (im Versuch typisch ± 15 V) werden beim OV-Symbol üblicherweise nicht gezeichnet. Alle Spannungen eines OV beziehen sich auf das sog. **Nullpotential**, das dem beiden Versorgungsspannungen entspricht.

1.2.1 Idealisierter nullpunktfehlerfreier OV

Bild OPV-5 zeigt ein stark einfaches Ersatzschaltbild eines nullpunktfehlerfreien OV mit den Ersatzkenngrößen R_g, R_i, R'_g und $K = u_a / u_e$.

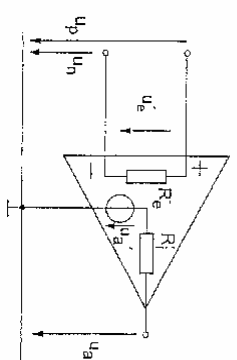


Bild OPV-5: Idealer OV

Die Ausgangsspannung u_a ist im **linearen Bereich** proportional der Eingangsspannungsdifferenz u_e . Die Kennlinie geht durch den Nullpunkt. Dies bedeutet schaltungstechnisch, daß bei einem nullpunktfehlerfreien OV, bei dem beide Eingänge auf gleichem Potential ($u_e = 0$ V) liegen, auch die Ausgangsspannung zu $u_a = 0$ V wird. Im linearen Bereich nimmt die **offene Verstärkung** k' typische Werte zwischen 10^4 (80dB) und 10^6 (120 dB) an. Die Forderung des GK-Prinzips nach $k \gg 1$ ist hier also erfüllt. Im nichtlinearen **Sättigungsbereich** strebt u_a dem konstanten Wert der Sättigungsspannung zu, der etwa 2 V unter der Versorgungsspannung liegt. Hier ist die Forderung nach $k \gg 1$ nicht mehr erfüllt. Verstärkerschaltungen sind so auszulegen, daß der OV im linearen Bereich arbeitet!

Die Übertragungskennlinie eines offenen OV hat folgenden Verlauf:

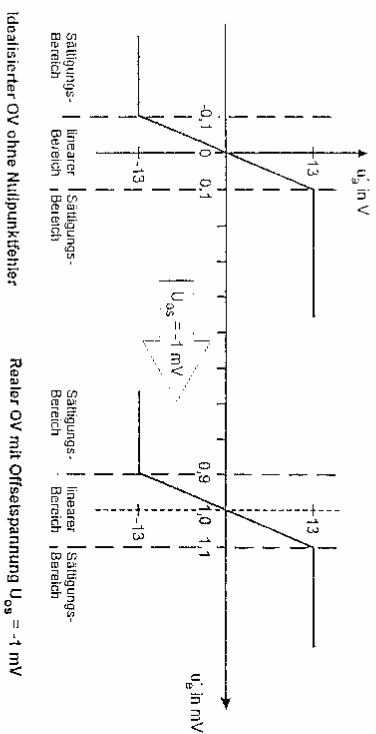


Bild OPV-6: Kennlinie eines OV

Bei einer Versorgungsspannung von ± 15 V beträgt die Sättigungsspannung etwa ± 13 V, sodaß bei einem Wert $k' = 10^5$ bereits $\pm 0,13$ mV genügen, um den OV voll auszusteuern.

1.2.2 Idealer OV

Für viele Anwendungsfälle, so auch im Praktikum genügt es, einen idealen OV zu Grunde zu legen mit folgenden Daten:

- Spannungsverstärkung $k' \rightarrow \infty$ d.h. $u_e' \rightarrow 0$, frequenzunabhängig
- Eingangswiderstand $R_g' \rightarrow \infty$ d.h. $I_{g'} \rightarrow 0$ und $I_p \rightarrow 0$ also $I_e' \rightarrow 0$.
- Ausgangswiderstand $R_a' \rightarrow 0$
- Keine Nullpunktfehler siehe 1.2.3

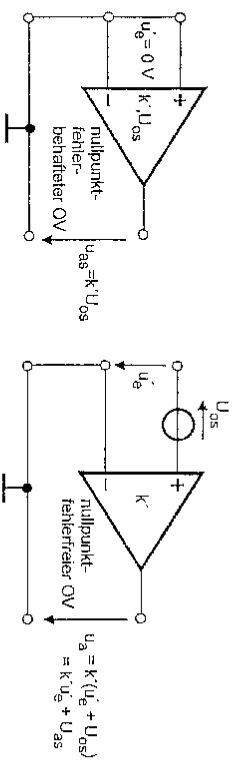
1.2.3 Realer OV ($k' \rightarrow \infty, R_g' \rightarrow \infty$) mit Nullpunktfehlern

Der reale OV weist gleichzeitig einen Spannungs- und einen Stromnullpunktfehler auf, die üblicherweise auf den OV-Eingang bezogen als sog. **Offsetfehler** in den Datenblättern zu finden sind. Diese beiden Fehlerarten werden hier vereinfacht als voneinander unabhängig betrachtet und können so durch die entsprechenden Ersatzschaltbilder Bild OV-7b und OV-8b dargestellt werden. Durch lineare Superposition dieser Einzelfehler läßt sich dann der Gesamtnullpunktfehler einer Schaltung ermitteln.

• Spannungsnullpunktfehler (Offsetspannung U_{os})

Werden bei einem nullpunktfehlerbehafteten OV beide Eingänge auf das gleiche Potential gelegt (Bild OPV-7a; $u_e = 0$ V), so tritt trotzdem am OV-Ausgang eine von Null verschiedene Spannung auf. Ursache sind vor allem Unsymmetrien der Parameter der OV-Eingangsverstärkerstufe. Der Spannungsnullpunktfehler wird durch die sog. Eingangsoffsetspannung U_{os} berücksichtigt. In ihrer Wirkung entspricht sie einer Eingangsspannung $u_e = -U_{os}$, die

am OV-Ausgang zu $u_a \approx 0$ V führt. Damit ist der reale OV mit Spannungsnullpunktfehler durch einen idealen nullpunktfehlerfreien OV mit der Offsetspannung U_{os} als zusätzliche Eingangsspannungsquelle darstellbar (Bild OV-7b).



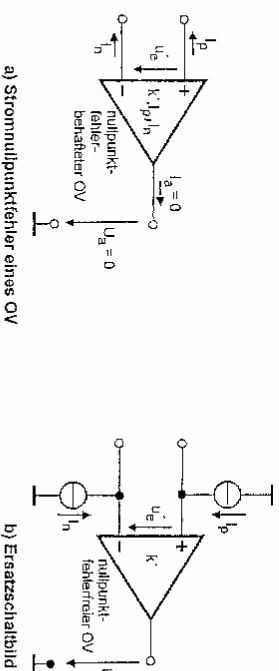
a) Spannungsnullpunktfehler eines OV

b) Ersatzschaltbild eines nullpunktfehlerbehafteten OV

Bild OPV-7: Realer OV mit Spannungsnullpunktfehler (Offsetspannung)

• Stromnullpunktfehler (Offsetstrom I_{os} , Ruhestrom I_b)

Beim realen Operationsverstärker fließen endliche Eingangsströme I_e und I_p , die zur Arbeitspunktinstellung der Eingangstransistoren des OV nötig sind.



a) Stromnullpunktfehler eines OV

b) Ersatzschaltbild

Bild OPV-8: Realer OV mit Stromnullpunktfehler

Die Richtung und die Größenordnung von I_e und I_p hängen wesentlich von der verwendeten Herstellungstechnologie der OV ab. Bei bipolaren OV liegen diese Ströme im nA-Bereich bei FET-OV im pA-Bereich. Fertigungstechnische Unsymmetrien führen bei OV zudem noch zu ungleichen Eingangsströme $I_e \neq I_p$. In den Datenblättern sind anstatt der beiden Eingangsströme I_e und I_p üblicherweise die folgende Größen angegeben:

Eingangsruhestrom I_b (Bias-current):

$$I_b = \frac{1}{2} (I_p + I_e)$$

Eingangsoffsetstrom I_{os} (Offset-current):

$$I_{os} = |I_p - I_e|$$

1.3 Gegenkopplungsschaltungen mit Operationsverstärkern

Im Praktikumsversuch wird das GK-Prinzip mit Operationsverstärkern realisiert. Die folgenden Berechnungen beziehen sich auf ein ideale OV mit $k \rightarrow \infty$, $R_e \rightarrow \infty$ und $R_a \rightarrow 0$ gleichbedeutend mit $u_e \rightarrow 0$ und $i_e \rightarrow 0$.

Damit ergibt sich entsprechend Abschnitt 1.1 und 1.2 die folgende Situation:

Als Verstärkerelement wird ein OV verwendet. Dieser erfüllt als ein Spannungsverstärker mit einer hohen (Spannungs-) Verstärkung K die Forderungen des GK-Prinzips nach einem $k \rightarrow \infty$; Schwankungen von k gehen als multiplikative Störgrößen ein und können damit wegen $k \gg 1$ vernachlässigt werden. Nullpunktfehler (U_{0st} , I_{0st}) des OV sind additive Störgrößen und verursachen bei der Verstärkung kleiner Gleichspannungen und kleiner Gleichströme Probleme.

Zum besseren Verständnis der GK-Schaltungen wird nachfolgend jeweils der prinzipielle Aufbau mit einer Darstellung des OV als Vierpol betrachtet und dann das in der Schaltungstechnik übliche Schaltbild in Dreipoldarstellung (ohne Nullpunktschluß) gegenübergestellt.

1.3.1 uU-Verstärker

Beim uU-Verstärker handelt es sich um einen sehr häufig eingesetzten Spannungsverstärkertyp.

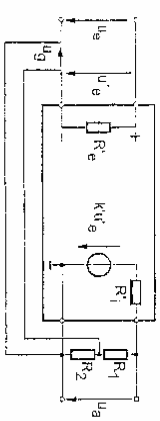


Bild OPV-9: Prinzip des uU-Verstärkers

für den idealen OV gilt mit $u_e = 0$ und $i_e = 0$:

Übersetzung k_U : aus $u_a = u_g = u_e \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ folgt:

$$k_U = \frac{u_a}{u_e} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

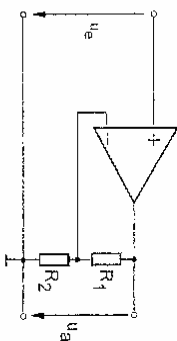
Ein-/Ausgangswiderstände: $R_o = \frac{u_e}{i_e} \rightarrow \infty$; $R_i = \frac{u_a}{i_a} \rightarrow 0$

Zusammenfassung

Der uU-Verstärker stellt einen linearen Spannungsverstärker mit hohem Eingangswiderstand und niedrigem Ausgangswiderstand dar. Er verhält sich damit wie eine gesteuerte Spannungsquelle, deren Ausgangsspannung weitgehend lastunabhängig, d.h. eingepreßt, ist.

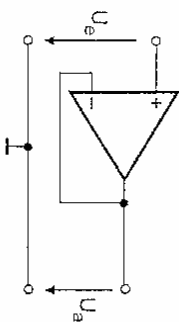
Anwendungsbeispiele

Allgemein zur Wirkungsweisen (hochwertigen) Erfassung von Spannungen, speziell zur Verstärkung hochwertiger, spannungsliefernder Sensoren, wie z.B. Induktionsdurchflußmessung, pH-Wert-Sonden.



Schaltbild des uU-Verstärkers

Spezialfall: **Impedanzwandler** oder sog. **Spannungsfolger** ($R_1 = 0 \Omega$; R_2 nicht vorhanden), z.B. zur "Impedanzwandlung" bei Sensoren und Referenzelementen, deren Spannungspegel zwar ausreichend ist, deren hoher Innenwiderstand aber Meßfehler durch nicht rückwirkungsfreie Spannungsmessung verursacht.



$$k_U = \frac{u_a}{u_e} = 1$$

Bild OPV-10: Spannungsfolger

Die Widerstände R_e bzw. R_i nehmen die extremsten Werte aller im Praktikum betrachteter GK-Schaltungen an mit R_e im 100 M Ω - und R_i im 100 $\mu\Omega$ -Bereich

1.3.2 uI-Verstärker

Dieser Verstärker formt eine Spannung u_e in einen Strom i_a um.

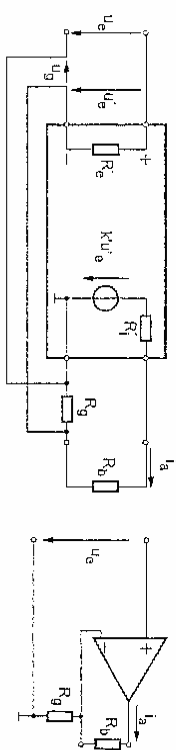


Bild OPV-11: Prinzip des uI-Verstärkers

für den idealen OV gilt mit $u_e = 0$ und $i_e = 0$:

Übersetzung k_g : aus $u_a = i_a R_g$ folgt:

$$k_g = \frac{i_a}{u_e} = \frac{1}{R_g}$$

Ein-/Ausgangswiderstände: $R_e = \frac{u_e}{i_e} \rightarrow \infty$; $R_i = \frac{u_a}{i_a} \rightarrow \infty$

Zusammenfassung

Der uI-Verstärker stellt einen linearen Spannungs-/Stromformer dar, dessen Ausgang sich wie eine Stromquelle verhält, d.h. eingepreßt und vom Lastwiderstand R_b unabhängiger Ausgangsstrom. Die Übersetzung ist durch einen einzigen (niederwertigen) Widerstand einstellbar. Zu beachten ist, daß sich Ein- und Ausgang des Verstärkers nicht auf das gleiche (Null-) Potential beziehen.

Anwendungsbeispiele

In der Prozeßmeßtechnik sind häufig am Meßort Sensortemperaturen zu erfassen und über Zuleitungen in einer entfernten Prozeßleitkarte anzuzeigen. Durch den Einsatz von Verstärkern mit Stromausgang (typ. 0 ... 20 mA, 4 ... 20 mA) bleiben unterschiedliche oder sich ändernde Zuleitungswiderstände ohne Einfluß.

1.3.3 I/I-Verstärker

Dieser Verstärkertyp kann allgemein zur Verstärkung von Strömen z.B. bei stromliefernden Sensoren verwendet werden.

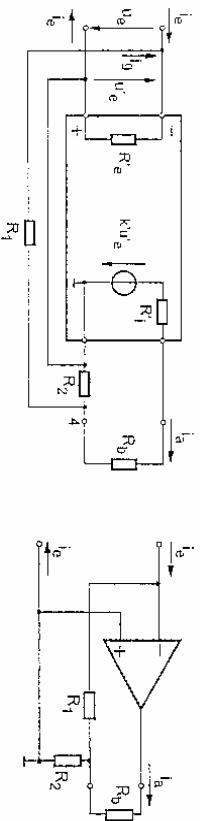


Bild OPV-12: Prinzip des I/I-Verstärkers

Schaltbild

für den idealen OY gilt mit $u_e' = 0$ und $i_e' = 0$:

Übersetzung K: aus $i_a R_2 = i_g R_2 = i_g R_1$ mit $i_g = -i_e$ folgt:

$$k = \frac{i_a}{i_e} = - \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

Ein-/Ausgangswiderstände: $R_{e0} = \frac{u_e}{i_e} \rightarrow 0$; $R_{a0} = \frac{u_a}{i_a} \rightarrow \infty$

Anwendungsbeispiele

Allgemein zur Verstärkung von Strömen. Vorteilhaft ist, daß sich der Ein- und der Ausgang auf das gleiche (Null-) Potential beziehen. Da am Eingang des gegengekoppelten Verstärkers nur die sehr geringe Differenzeingangsspannung u_e des OY im μV -Bereich auftritt, eignet sich diese Schaltung zur nahezu leistungslosen Strommessung. Analog zum u/I-Verstärker kommen solche Anwendungsfälle in Betracht, bei denen ein eingepreigter Ausgangsstrom gefordert wird.

1.3.4 I/u-Verstärker

Dieser sehr häufig eingesetzte Verstärkertyp wird in der "reinen" Form mit nur einem Rückkopplungswiderstand als I/u-Verstärker eingesetzt.

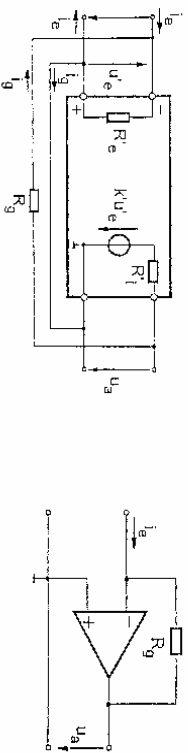


Bild OPV-13: Prinzip des I/u-Verstärkers

Schaltbild

Für einen idealen OY gilt mit $u_e' = 0$ und $i_e' = 0$:

Übersetzung K: aus $i_g = -i_e$ und $u_a = i_g R_g$ folgt:

$$k_R = \frac{u_a}{i_e} = -R_g$$

(Vorzeichen beachten!)

Ein-/Ausgangswiderstände: $R_{e0} = \frac{u_e}{i_e} \rightarrow 0$; $R_{a0} = \frac{u_a}{i_a} \rightarrow \infty$

Varianten des I/u-Verstärkers

In der technisch wichtigsten Variante wird der I/u-Verstärker als sog. Ladungsverstärker bei piezoelektrischen Kraftaufnehmern eingesetzt. Ansonsten wird er meist in der "erweiterten" Form mit einem zusätzlichen Bauelement im Eingangskreis verwendet. Varianten entstehen dabei durch die Verwendung von ohmschen und nichtohmschen Bauelementen wie Kondensatoren, Dioden, usw.

Typ	Bauelemente im Eingangskreis	Bauelemente in der Rückkopplung
I/u-Verstärker	-	R
Ladungsverstärker	-	C
Invertierer	R	R
Subtrahierer, Addierer	mehrere R	R
Integrierer	R	C (evtl. R parallel)
Differenzierer	C	R
Logarithmierer	R	D

(R bedeutet allg. ohmscher Widerstand, C Kondensator, D Diode)

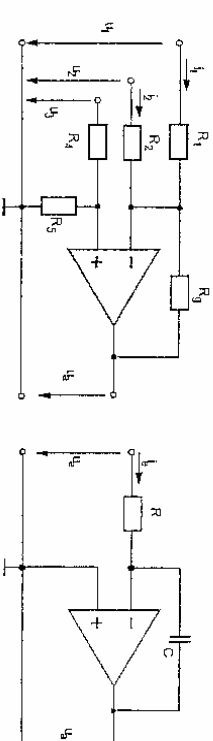


Bild OPV-14: Varianten des I/u-Verstärkers

• Ladungsverstärker (nur C)

Mit $i_g = -i_e$

$$u_a = - \frac{1}{C} \int_0^t i_e dt + u_a(t=0) = - \frac{Q}{C} + u_a(t=0)$$

Bei einem piezoelektrischen Sensor ist beispielsweise Q die beim Aufbringen einer Kraft F erzeugte Ladung und mit dem Piezomodul k gleich $u_a = -1/C \cdot k \cdot F$.

• Integrierer (R und C)

Mit $i_e = \frac{u_e}{R}$

$$u_a = - \frac{1}{RC} \int_0^t u_e dt + u_a(t=0)$$

- **Invertierer** (nur R_1, R_g vorhanden ($R_5 = 0 \Omega$)).

Übersetzung:
$$u_a = - \frac{R_g}{R_1} u_e$$

Eingangswiderstand:
$$R_e = \frac{u_1}{i_1} = R_1$$

- **addierender Subtrahierer**

$$u_a = - \left(\left(\frac{R_g}{R_1} u_1 + \frac{R_g}{R_2} u_2 \right) - \left(1 + \frac{R_g(R_1 + R_2)}{R_1 R_2} \right) \frac{R_5}{R_4 + R_5} u_3 \right)$$

1.3.5 Instrumentations-Verstärker (Instrumentation Amplifier)

Der oben beschriebene Subtrahierer hat den Nachteil relativ niedriger Eingangswiderstände, so daß Rückwirkungen auf die zu messende Spannung möglich sind. Abhilfe schafft hier der sog. **Instrumentations-Verstärker**. Dieser Verstärker besteht aus einem Subtrahierer, dem zwei u/u -Verstärker vorgeschaltet sind. Damit werden die Eingangswiderstände hochohmig, wie es für u/u -Verstärker typisch ist.

Als weiterer Vorteil gilt die sehr einfache Einstellung der Übersetzung k mit nur einem externen Widerstand R_G .

Instrumentationsverstärker sind integriert aufgebaut, wobei die internen Widerstände bereits auf dem Chip abgeglichen und neben der Spannungsversorgung nur der externe Widerstand R_G zur Einstellung der Übersetzung k erforderlich ist.

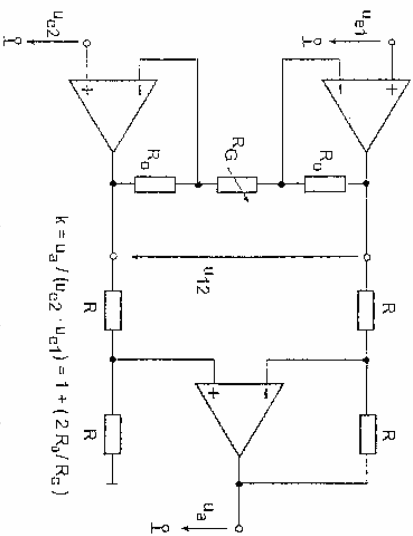


Bild OPV-15: Instrumentationsverstärker