

Operationsverstärker

Eine kurze Einführung ohne Formeln und Mathe

Begriffe, Verwendung

Operationsverstärker, Rechenverstärker, Operational Amplifier, Opamp, OP, OV, OPV

Der Operationsverstärker - oder Opamp - ist **das Bauteil** für die Signalverarbeitung auf der analogen Seite eines Systems. Dieser IC-Verstärkerbaustein hat diskrete (mit Einzel-Transistoren aufgebaute) Schaltungen verdrängt, ausser in Spezialgebieten der Hochfrequenz- und Leistungselektronik.

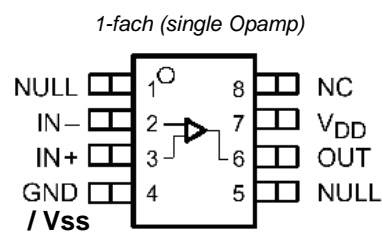
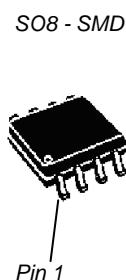
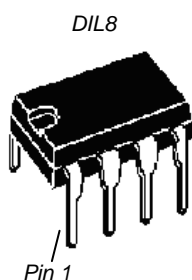
Opamps und Spezialausführungen davon werden auch im Bereich der Digitaltechnik eingesetzt: als Komparatoren für die Signalaufbereitung, für A/D-Wandler und als Schnittstellentreiber.

Entstehung, Grundidee

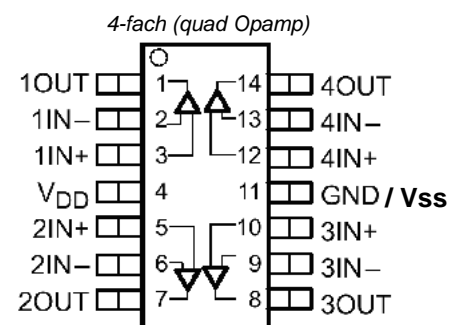
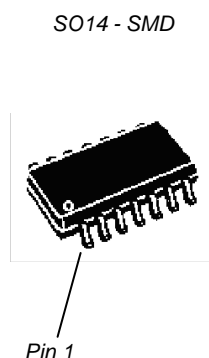
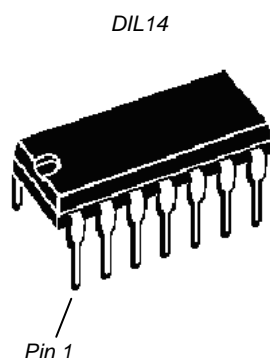
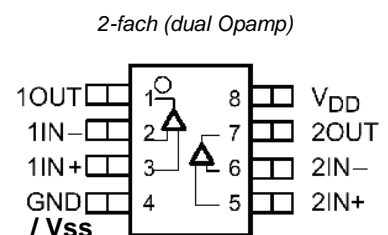
Damit sich Anwendungen in der analogen Signalerfassung und -verarbeitung kostengünstig und einfach entwickeln und fertigen lassen, wird ein universell einsetzbares Verstärker-Bauteil benötigt. Aus diesen Forderungen entstand ca. 1965 der erste Opamp (LM709) bei der US-Firma Fairchild.

- Der Opamp ist ein aktives Verstärker-Bauteil, das aus über 20 Transistoren besteht, die auf einem Chip integriert sind. Auf dem selben Chip können auch mehrere Verstärker integriert sein.
- Der integrierte Opamp lässt sich mit wenigen externen Bauelementen (passive, vor allem Widerstände) beschalten und konfigurieren. Das Verhalten der fertigen Schaltung wird vorwiegend von dieser äusseren Beschaltung bestimmt und unterliegt kaum noch den Mängeln und Exemplarstreuungen des eigentlichen Opamp-Bauteils.

Gehäuse und Pinout (Anschlussbelegung) von Standard-Opamps

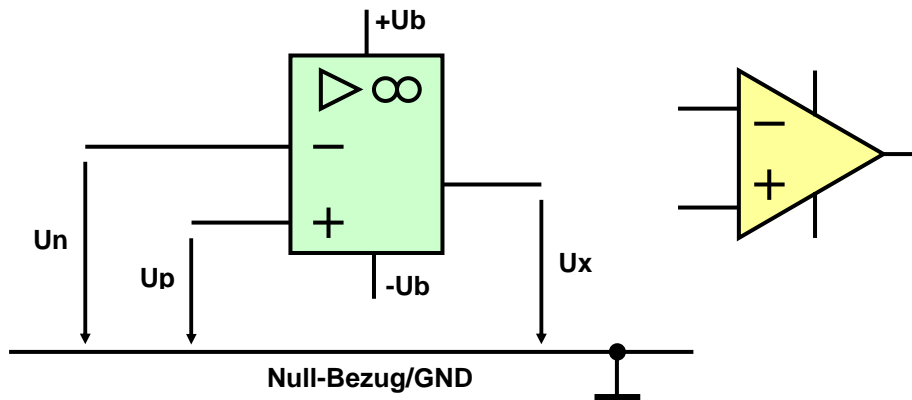


NULL = Offset-Trimmung



Gehäuseformen und Standard-Pinouts von Opamps

Die Anschlüsse und Spannungen am Opamp



Symbole und Spannungen am Opamp
links: IEC-konformes, rechts: älteres Symbol (welches häufig verwendet wird)

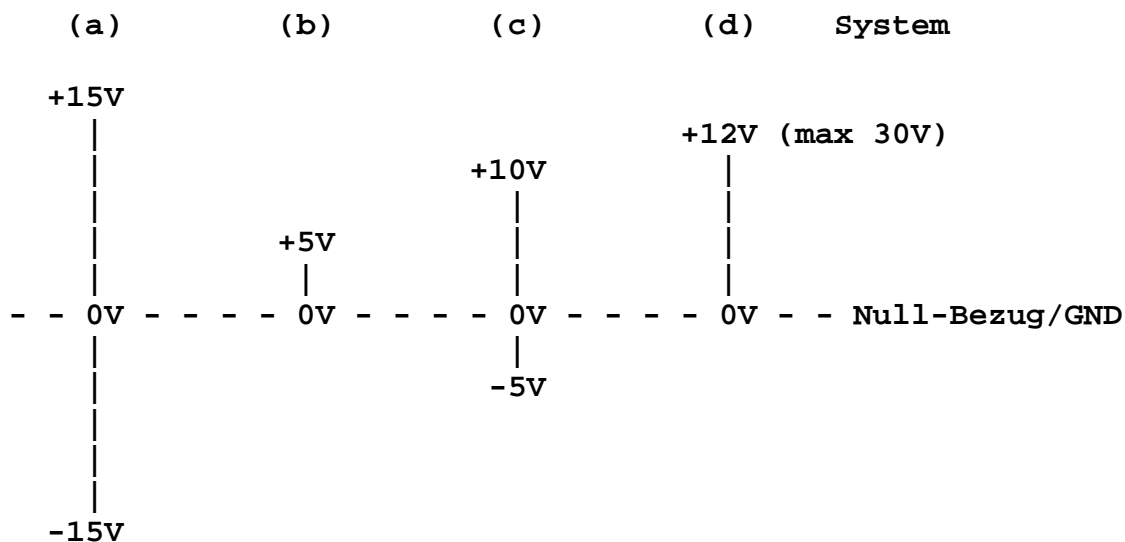
Vdd	+ Ub	positive Speisespannung, z.B. +15V
GND/Vss	- Ub	negative Speisung (oder GND für Einfach-Speisung), z.B. -15V
IN+	Up	Spannung am +Eingang (nicht invertierend)
IN-	Un	Spannung am -Eingang (invertierend)
OUT	Ux	Ausgangsspannung des Opamps (bleibt innerhalb +/- Ub)

Null-Bezug/GND (GND = Ground) ist die Bezugs-Spannung oder Masse, auf welche alle in der Opamp-Schaltung vorliegenden Spannungswerte bezogen sind. Meistens ist dies auch der Ruhepegel am Ausgang des beschalteten Opamps.

Speisungssysteme für Opamp-Schaltungen

Signale (meistens in Form von Spannungswerten) die von Opamps verarbeitet werden, sollten innerhalb des vorgegebenen Speisungsbereichs der Opamp-Schaltung liegen. Grundsätzlich dürfen für Opamp-Versorgungen beliebige Speisungsanordnungen angewendet werden, sofern die Grenzdaten der Bauteile und der Anwendung berücksichtigt werden. Der Opamp kann aber - bezüglich des Null-Bezugs - positive *und* negative Spannungswerte (Gleich- und Wechselspannungen) nur verarbeiten und ausgeben, wenn die Speisung bipolar aufgebaut ist, wie in den folgenden Beispielen (a) oder (c).

Hier sind 4 Beispiele von Speisungssystemen für Opamp-Schaltungen:



Opamp OHNE äussere Beschaltung (Open Loop, Leerlauf)

Falls der Opamp ausser der Speisung keine Beschaltung erhält ("offen" bleibt), spricht man von seinem "Open Loop-Verhalten". Dieses Verhalten unterscheidet sich grundsätzlich von jenem im beschalteten Zustand. Das Open Loop-Verhalten wird in der Praxis nicht genutzt (Ausnahmen: für theoretische Betrachtungen und beim Einsatz des Opamp als Komparator).

Arbeitsweise des Opamp-Bausteins

Der Opamp besitzt zwei Signal-Eingänge, den nicht invertierenden **+Eingang** mit Signal U_p und den invertierenden **-Eingang** mit Signal U_n . Die Differenz-Eingangsspannung ($U_p - U_n$) wird sehr hoch verstärkt, d.h., kleinste Differenzen ($U_p - U_n$) im μV -Bereich bewirken eine Vollaussteuerung des Opamp-Ausgangs. Die "Richtung" der Aussteuerung wird vom Vorzeichen ($U_p - U_n$) bestimmt.

Falls $U_p > U_n \rightarrow$ Ausgang U_x erfährt eine positive Aussteuerung

Falls $U_p < U_n \rightarrow$ Ausgang U_x erfährt eine negative Aussteuerung

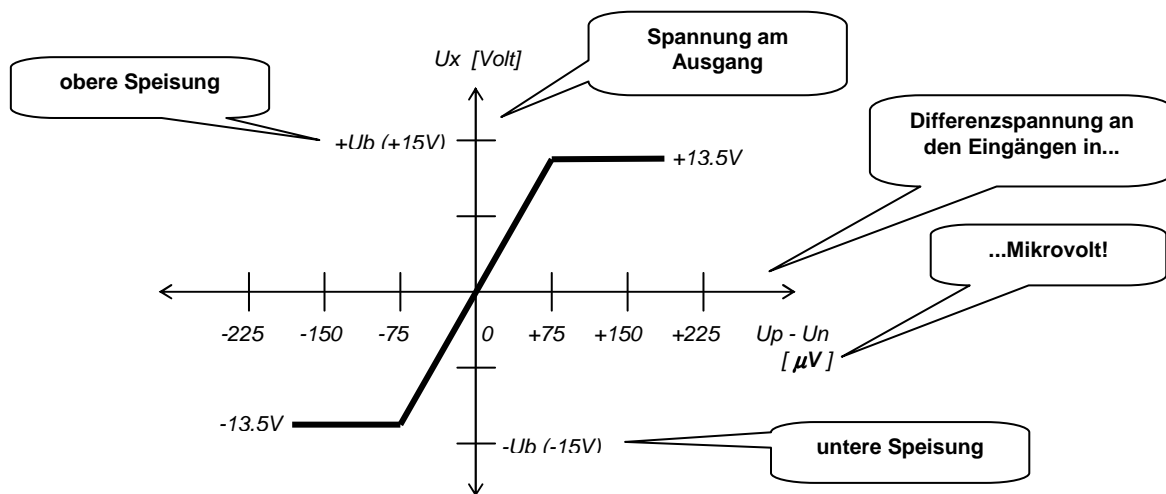
V_o , Leerlauf-Verstärkung (Open Loop Gain)

V_o Leerlaufverstärkung des Opamp-Bausteins

$U_p - U_n$ Differenz der Eingangsspannungen

$$U_x = V_o * (U_p - U_n) \quad \text{Ausgangsspannung} = \text{Verstärkung der Eing.-Differenzspannung}$$

Die **Differenz** der zwei Eingangsspannungen ($U_p - U_n$) wird mit Faktor V_o verstärkt. Typische Werte von V_o eines Opamp-Bausteins liegen zwischen 10'000 bis 1'000'000.



Verstärkungskennlinie des Opamp LM741 ohne Beschaltung

Die zwei **Eingänge des Opamps** sind sehr hochohmig ausgelegt und führen darum nur sehr kleine Ströme (Bereich nA bis μA), so dass die umgebende Schaltung kaum belastet oder beeinflusst wird. Für eine Betrachtung der Schaltungsfunktion kann daher der Einfluss der Eingänge auf die Funktion meistens vernachlässigt werden. \rightarrow Idealisierung, siehe Goldene Regeln unten!

Noch kleinere Eingangsströme (im Bereich pA bis nA) bieten Opamps mit **FET-Eingängen**.

Beispiele: LF356 (Bi-JFET), TL072 (Bi-JFET, 2-fach), CA3140 (CMOS-Eingänge), LMC660 (CMOS).

Der **Ausgang des Opamps** verhält sich wie eine bipolare Spannungsquelle. Er kann Spannungen im Bereich der angelegten Speisung ausgeben und dabei Strom liefern ("Plus-Strom", Source-Current, Quelle) oder Strom "einsaugen" ("Minus-Strom", Sink-Current, Senke). Der maximale Ausgangsstrom ist bei den üblichen Opamp-Typen auf Werte zwischen $\pm 5 \text{ mA}$ bis $\pm 20 \text{ mA}$ begrenzt. Der Ausgang ist bei den meisten Bausteinen dauerkurzschlussfest.

Die **Slew Rate** (in $\text{V}/\mu\text{sec}$) beschreibt, welche Spannung der Ausgang während einer μsec durchlaufen kann (typische Werte: 0,1 - $10 \text{ V}/\mu\text{sec}$, siehe Datenblatt des Bausteins).

Opamp MIT äusserer Beschaltung

Widerstandswerte beim beschalteten Opamp:

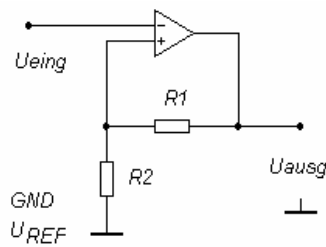
Sie sollten in der Praxis im **Bereich von ca. 5kOhm bis 1MOhm** liegen, damit Eingangsströme (obwohl sehr klein) und max. Ausgangsstrom nur einen geringen Einfluss auf die Schaltungsfunktion ausüben.

Der Opamp lässt sich digital oder analog einsetzen und beschalten:

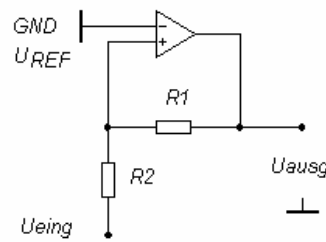
Digital

Komparator (Vergleicher) ohne Mitkopplung
oder

Schmitt Trigger mit Mitkopplung = Rückführung auf +Eing.



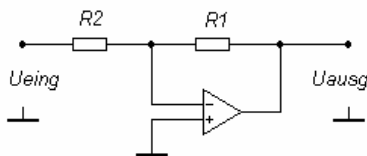
1 Schmitt Trigger, invertierend



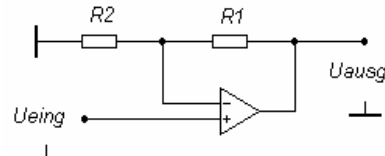
2 Schmitt Trigger, nicht invertierend

Analog

linearer (Rechen-) Verstärker mit Gegenkopplung = Rückführung auf -Eing.



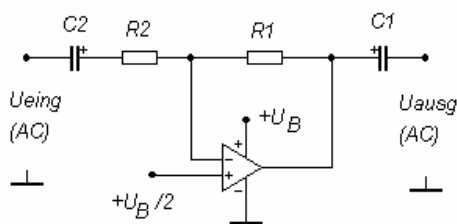
3 Verstärker, invertierend
Spg.-Verstärkung $V = -U_{ausg} / U_{eing} = -R1 / R2$



4 Verstärker, nicht invertierend
Spg.-Verstärkung $V = U_{ausg} / U_{eing} = (R1 / R2) + 1$

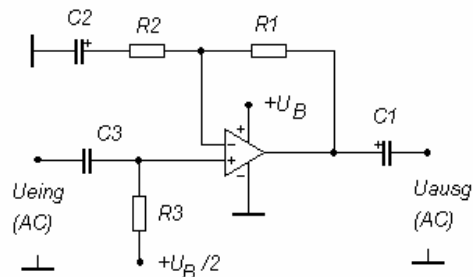
Analog: AC-Verstärker mit Einfach-Speisung (Single Supply)

Alle DC-Ruhepotentiale an Ein- und Ausgängen müssen auf $U_B/2$ liegen. AC-Signale über Koppel-Cs auf die DC-Spannungen überlagern. Die Verstärkung für AC- und DC-Anteile sind verschieden.



5 AC-Verstärker mit Einfach-Speisung, invertierend

DC-Verstärkung $V_{dc} = 1$ (da $R2$ wegen $C2$ nicht wirksam ist)
AC-Verstärkung $V_{ac} = -U_{ausg} / U_{eing} = -R1 / R2$



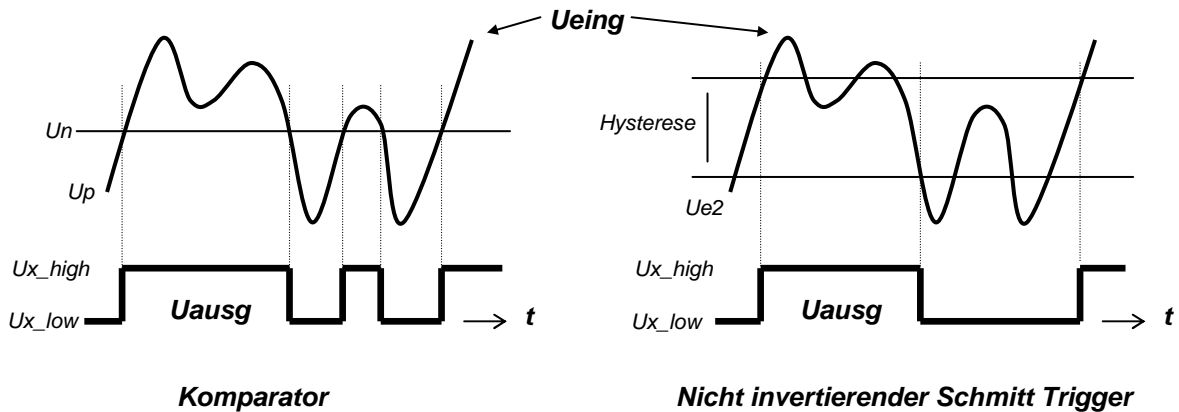
6 AC-Verstärker mit Einfach-Speisung, nicht invertierend

DC-Verstärkung $V_{dc} = 1$ (da $R2$ wegen $C2$ nicht wirksam ist)
AC-Verstärkung $V_{ac} = U_{ausg} / U_{eing} = (R1 / R2) + 1$

**Digitale Anwendung:
Opamp als Komparator, Mitkopplung beim Schmitt Trigger**

Impulsschaltungen, Analog/Digital-Wandler, Spannungsvergleicher oder Grenzwert-Schalter benötigen häufig Komparatoren (Vergleicher), deren Ausgangssignale an digitale Systeme weitergeleitet werden. Hier kann ein Opamp als Komparator oder ein dafür spezialisierter Komparator-Baustein (wie z.B. LM311, LM393, LM339) eingesetzt werden.

Der Opamp-Komparator arbeitet im übersteuerten Zustand (Open Loop-Verhalten). Der Ausgang U_x springt - entsprechend der Differenz ($U_p - U_n$) - mit der **maximalen Slew Rate** (Flankensteilheit) des Opamps zwischen U_{x_low} und U_{x_high} hin und her.



Vergleich: Spannungs-/Zeitverhalten beim Komparator und Schmitt Trigger

Oft wird ein Komparator benötigt, der eine Differenz zwischen den Schaltpunkten U_{x_high} und U_{x_low} (genannt **Hysterese**) aufweist, z.B. für Impulsschaltungen, Signalaufbereitung etc. Dies wird schaltungstechnisch durch eine **Mitkopplung** erreicht. Der Komparator mit Mitkopplung und daraus entstehender Hysterese wird **Schmitt Trigger** genannt.

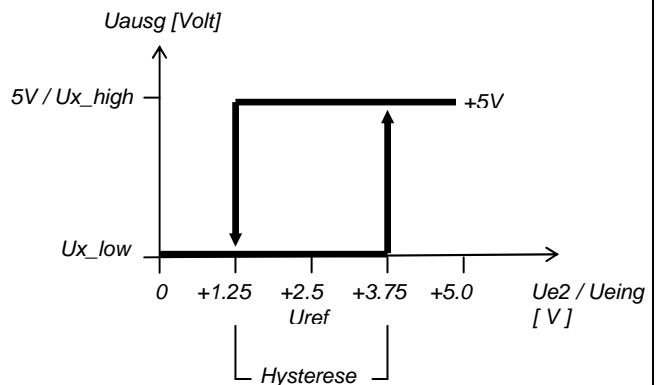
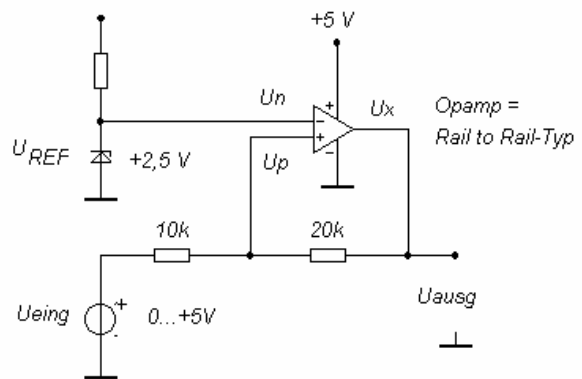
Mitkopplung, Schmitt Trigger

Beispiel
Nicht invertierender Schmitt Trigger mit U_{eing} variabel zwischen 0...5V und $U_{REF} = +2,5V$. Der Ausgang des Opamp besitzt Rail to Rail-Verhalten.

Opamp mit Rail to Rail-Ausgang: Ein Opamp- oder Komparator-Typ, dessen Ausgang sich zwischen den Speisungsgrenzen bewegen kann, im Beispiel zwischen $U_{x_low} = 0$ und $U_{x_high} = +5V$.

Mitkopplung: eine Teilspannung von U_{ausg} (bestimmt durch den Spannungsteiler 20k/10k) wird nach U_p zurückgeführt. Damit wird U_p von U_x "mitgezogen" und die Low- und High-Schaltpunkte verschieben sich: **Hysterese**. Daraus ergibt sich die **Uebertragungskennlinie** des nicht invertierenden Schmitt Triggers gemäss Bild nebenan.

Symbol für Schmitt Trigger-Verhalten in Schemas und Datenblättern:



Lineare (analoge) Anwendung: Opamp mit Gegenkopplung (Closed Loop)

Eine lineare Anwendung des Opamps (z.B. als Verstärker) zeichnet sich dadurch aus, dass der Ausgang **nicht übersteuert wird**. Mit einem "Schaltungstrick" muss darum U_x daran gehindert werden, an die Speisungsgrenzen zu gelangen. Der "Trick" um dies - und anderes - zu erreichen heisst "Gegenkopplung".

Goldene Regeln für die Analyse von GEGENGEKOPPELTEN Opamp-Schaltungen

Gegenkopplung, hohes V_o und hochohmige Eingänge des Opamps bewirken folgendes:

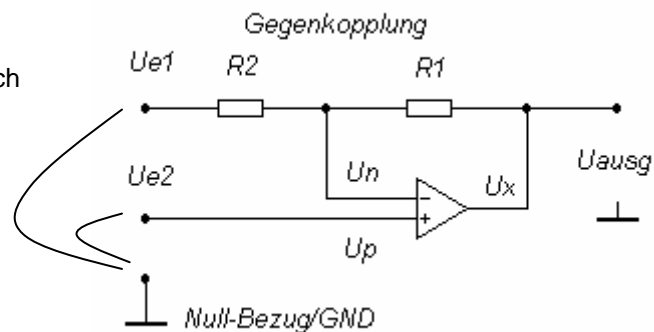
- 1) **($U_p - U_n$) geht gegen Null**, da der Ausgang in der Lage ist, die beiden Eingänge U_p und U_n mit Hilfe der Gegenkopplung auf annähernd gleichem Potenzial zu halten.
- 2) Die zwei **Eingänge des Opamps** führen vernachlässigbar kleine Ströme, d.h. sie beeinflussen die umgebende Schaltung nicht (Ausnahme: bei sehr hochohmiger Schaltungs-Umgebung).
- 3) Der **Ausgang des Opamps** verhält sich wie eine sehr niederohmige Spannungsquelle ($R_i < 1\text{Ohm}$).

→ **Das Verhalten der Gesamtschaltung ist nur von der äusseren Beschaltung abhängig.**

Die Gegenkopplung, ein Regelkreis

Eine Teilspannung von U_{ausg} (bestimmt durch den Spannungsteiler R_1/R_2) wird nach U_n zurückgeführt.

- Nicht invertierender Verstärker
 $U_{e1} = \text{Null/GND}$, $U_{e2} = U_{\text{eing}}$
- Invertierender Verstärker
 $U_{e2} = \text{Null/GND}$, $U_{e1} = U_{\text{eing}}$



Warum verhindert die Gegenkopplung eine Übersteuerung des Opamp-Ausgangs?
Wie kommen die Goldenen Regeln zustande?

Eine gegengekoppelte Schaltung agiert als **Regelkreis**. U_p ist die vorgegebene Führungsgrösse und bleibt im erlaubten Speisungsbereich ohne zu übersteuern (dies wird vorausgesetzt!). Der Ausgang U_x (geregelter Grösse) führt U_n (Istwert) über die Gegenkopplung der Führungsgrösse U_p nach. Eine allfällige Abweichung $((U_p - U_n) \cdot V_o)$ wird den Ausgang U_x "gegensteuern", da U_n invertierend auf den Ausgang wirkt. Somit liegen **U_p und U_n annähernd auf gleichen Potenzialen**, → **($U_p - U_n$) geht gegen Null**. Die erste "Goldene Regel" ist erfüllt.

Die zweite "Goldene Regel" wird durch die Bauweise des Opamps erfüllt (hochohmige Eingänge).

Die erste "Goldene Regel" gilt auch bei wechselnder Belastung des Ausgangs U_x oder bei unstabiler Speisespannung (Störgrössen), → der **Ausgang verhält sich wie eine sehr niederohmige geregelte Spannungsquelle** ($R_i < 1\text{ Ohm}$), sofern der max. Ausgangsstrom nicht überschritten und der Eingang nicht übersteuert wird. Dies erfüllt die dritte "Goldene Regel".

■