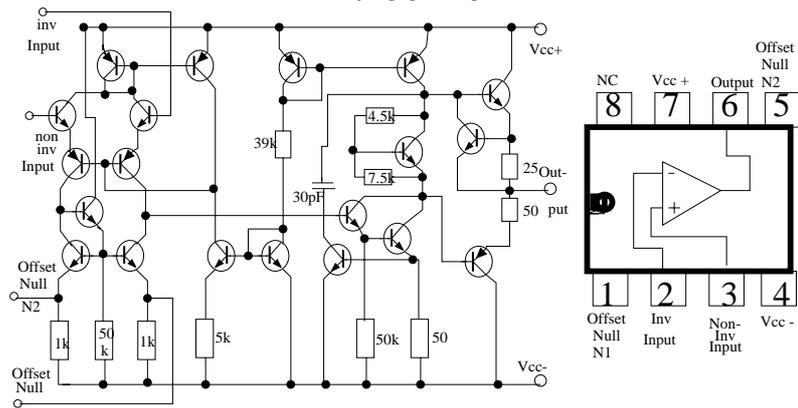
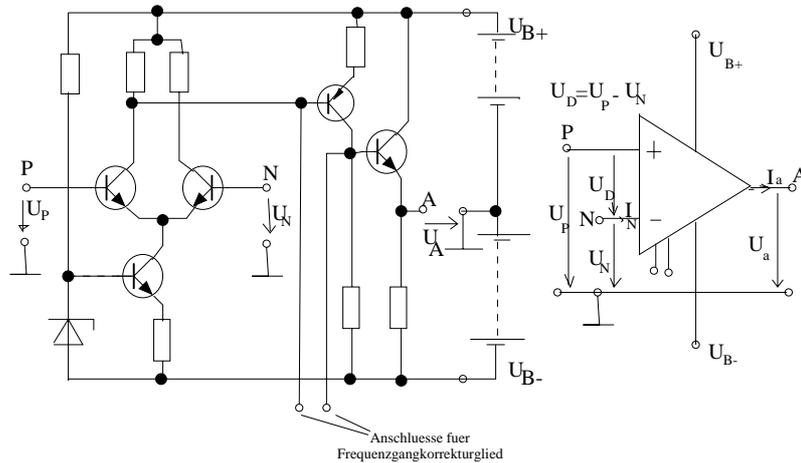
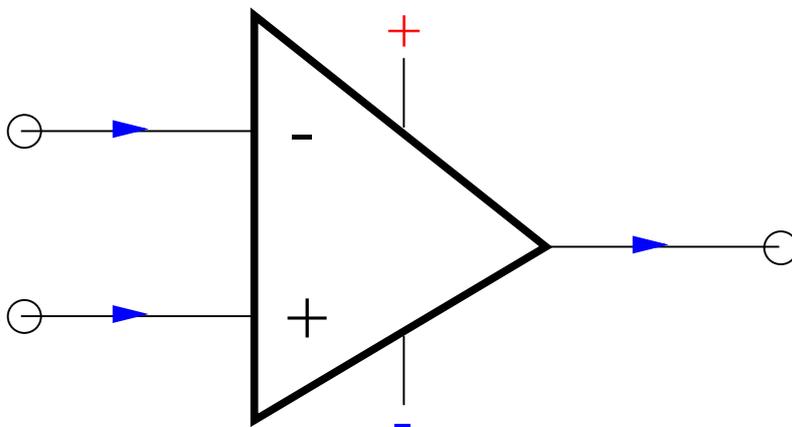


WAS IST EIN „OP“



Ein Haufen Transistoren?

Ein Käfer?



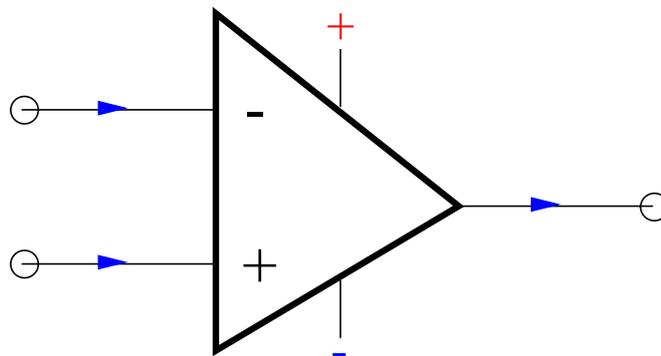
Was ist ein Operationsverstärker?

Ein OP ist

- ein universeller Gleichstromverstärker mit
 - Betriebsspannung
 - zwei Eingängen
 - = invertierend,
 - + = nicht-invertierend
 - Ausgangsspannung ist verstärkte Differenz von U_+ und $U_-!$
 - nahezu unendlich hohem Eingangswiderstand ($100\text{k}\Omega - 10^{13}\Omega$)
 - akzeptabel niedrigem Ausgangswiderstand ($\sim 100\Omega$)
 - nahezu „unendlichem“ Spannungs-Verstärkungsfaktor V_0 ($10^5 - 10^6$)

Mehr müssen wir gar nicht wissen!

Schaltbild:



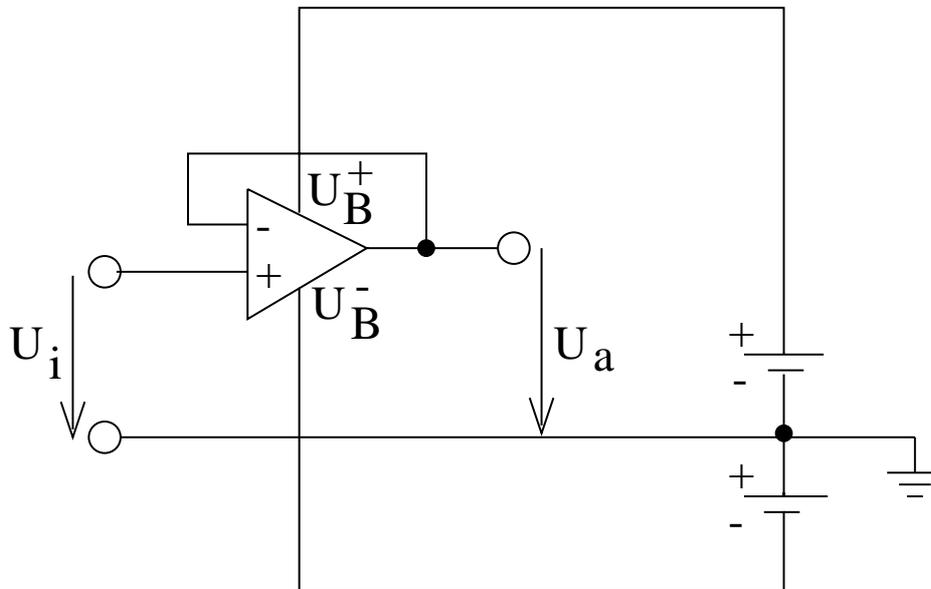
Billig zu haben (~ 1 DM)

als integrierte Schaltung in Plastikgehäuse!

Wie setzt man OPs ein?

wichtig: OP muß „rückgekoppelt“ werden,
um sinnvolle endliche Verstärkung zu erreichen

einfachste Schaltung („Spannungsfollower“):



- Spannungsverstärkung 1
- immer noch hoher Innenwiderstand bei kleinem Ausgangswiderstand, $r_a = \frac{\partial U_a}{\partial I_a} \sim \text{m}\Omega$, maximaler Ausgangsstrom einige 10 mA

Damit ist schon viel gewonnen

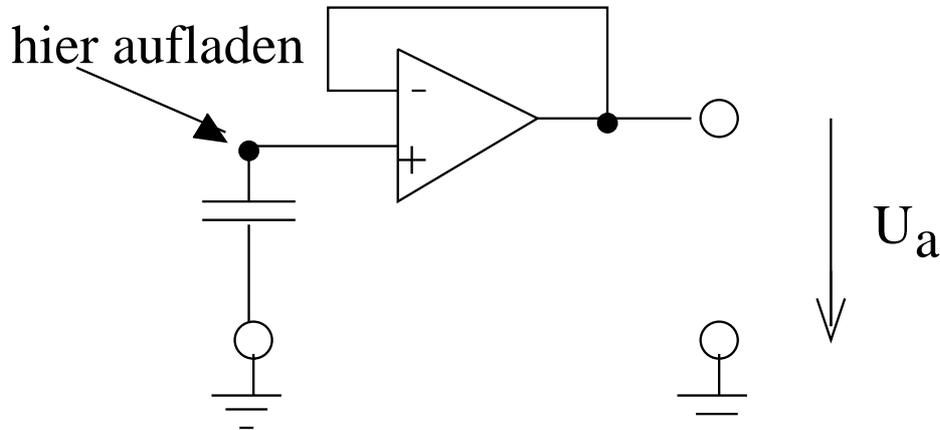
**können „ideales“ Spannungsmeßgerät bauen:
OP + beliebiges Meßgerät**

beachte: brauchen zwei Spannungsquellen in Serienschaltung, deren Mitte als Referenzpotential („Erde“) dient!
Ab jetzt nicht mehr eingezeichnet, aber immer dran denken!

Die erste Anwendung: Elektrometerverstärker

Messung der Spannung über einem Kondensator

mit hochohmigem Typen CA3160



D. h. **Ladungsmessung** mittels $Q = CU$!

Einfache, anschauliche Messungen in der Elektrostatik
über Kondensatorgrundgleichung!

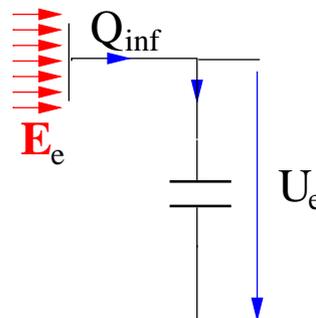
Empfindlich auf Ladungsvorzeichen!

Bsp.: $C = 1 \text{ nF}$, $Q = +1 \text{ nC} \Rightarrow U_a = +1 \text{ V}$

U kann am Ausgang des OP mit beliebigem (schlechtem)
Voltmeter gemessen werden!

Ersetzt ominöse „ladungsempfindliche Meßverstärker“

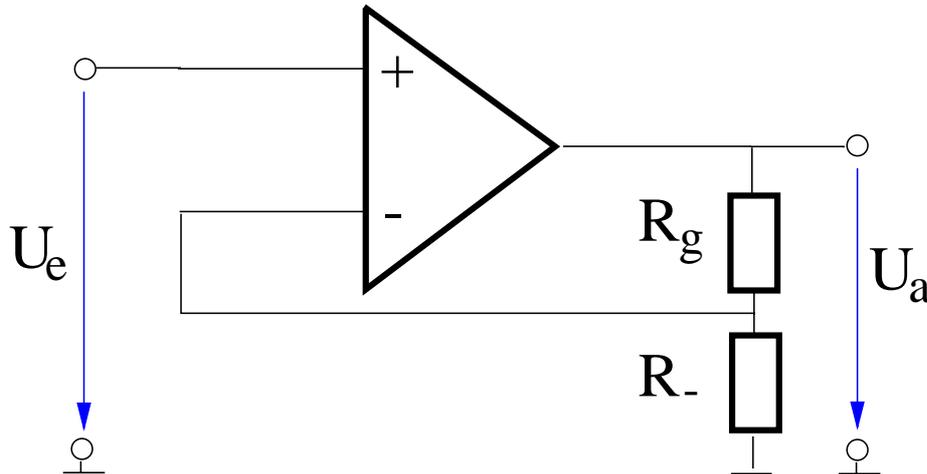
Es kann auch eine
influenzierte Ladung sein:



Einstellbare Verstärkung

Prinzip:

Führen nur einen Teil der Ausgangsspannung über Spannungsteiler zum invertierenden Eingang!



In excellenter Näherung:

$$U_a = \frac{R_g + R_-}{R_-} \cdot U_e$$

recht leicht einzusehen:

$$U_a = V_0 \cdot (U_+ - U_-), \text{ d.h. mit } V_0 \rightarrow \infty : \underline{U_+ \rightarrow U_-}$$

wichtiges Argument bei OPs!

weiter ist

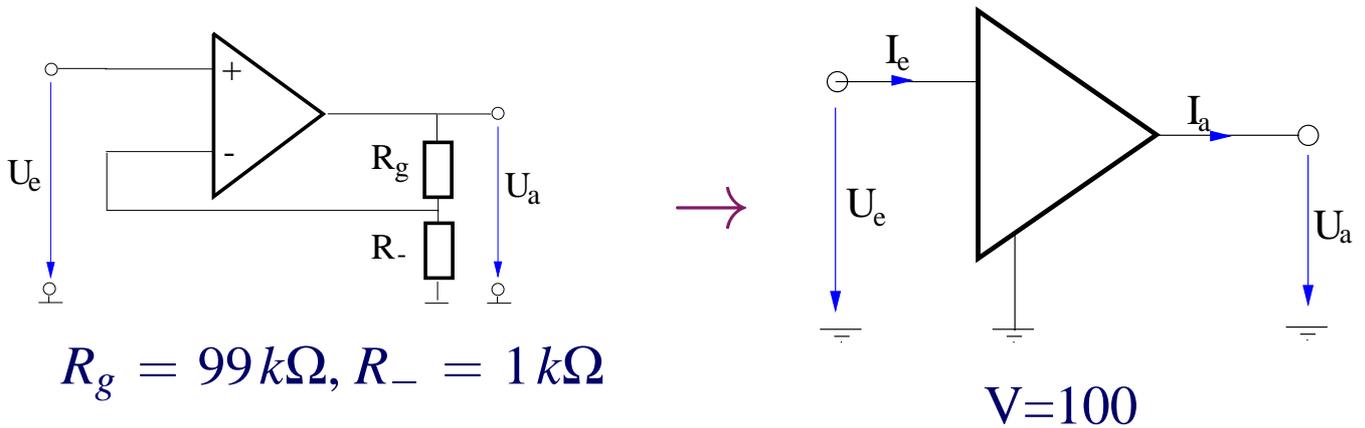
$$U_- = U_a \cdot \frac{R_-}{R_g + R_-} \quad \text{Spannungsteiler}$$

Jetzt nur noch U_- durch U_e ersetzen ✓

Verstärkung hängt nur von den Widerständen ab!

⇒ leicht einzustellen!

Anwendung: Aktive Meßbereichserweiterung



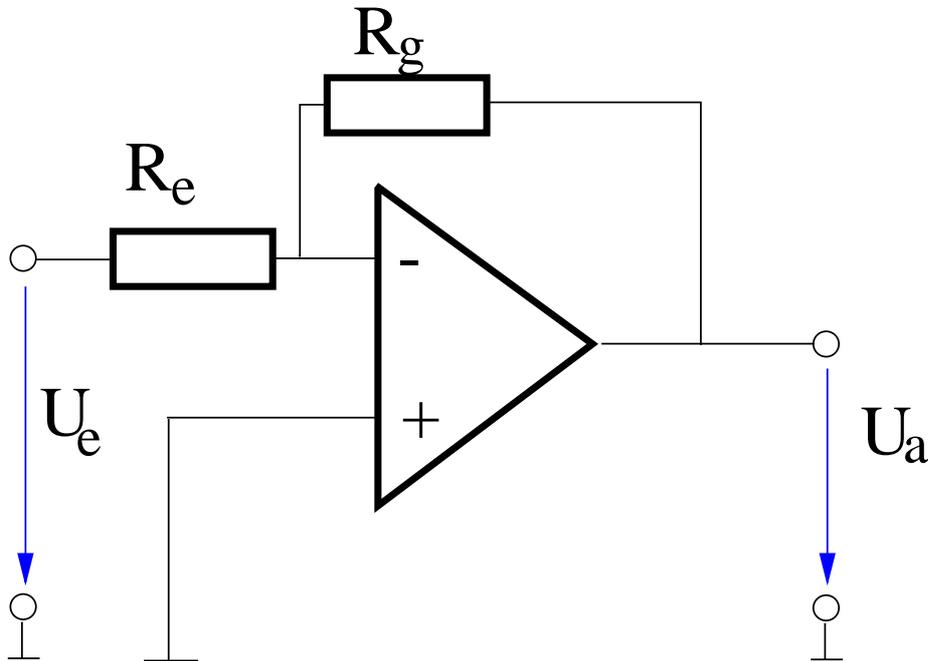
Vereinfachter Schaltplan für „didaktische Zwecke“

Einfach vor x-beliebiges Meßinstrument schalten

- hoher Innenwiderstand des OP bleibt erhalten
TIP: falls unerwünscht:
Widerstand parallel zum Eingang legen!
- niedriger Ausgangswiderstand
erlaubt Anschluß von fast beliebigem Verbraucher (von Leuchtdiode über Uralt-Meßgerät und Multimeter bis Computer)
- Genauigkeit hängt von Präzision der Widerstände ab
1 % kann man sich noch leisten!

Invertierender Verstärker

Es geht auch etwas anders:



Analog zu eben:

$$U_- \simeq U_+ = 0V$$

man sagt: – -Eingang liegt auf „virtueller Masse“

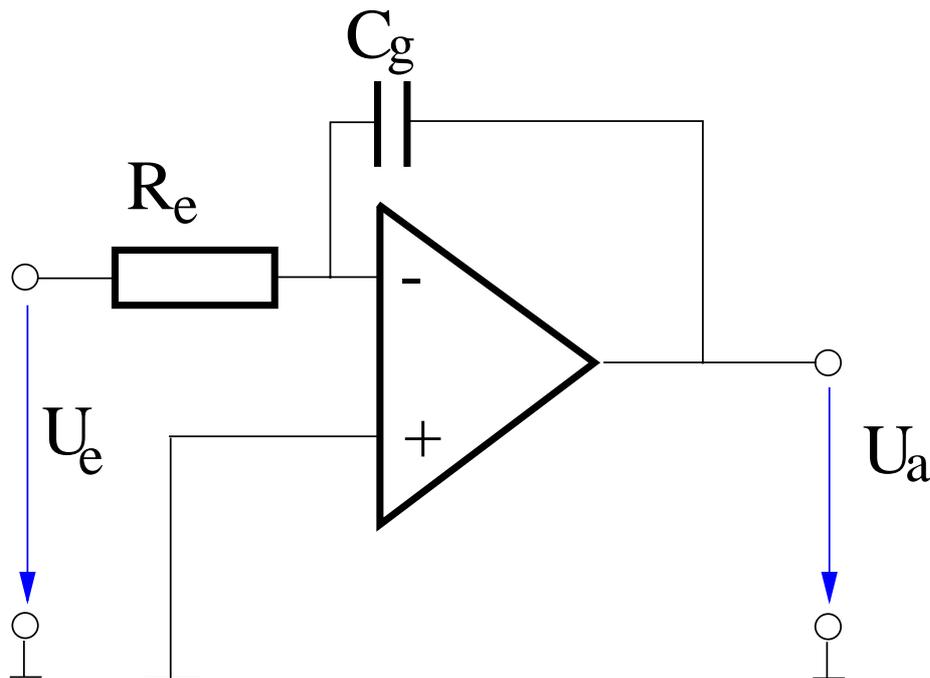
in den OP fließt kein Strom hinein : $I_e = -I_g$

$$\text{also } U_e = I_e R_e, U_a = -I_e R_g$$

$$\text{oder } U_a = -U_e \frac{R_g}{R_e}$$

- Ausgangsspannung hat umgekehrte Polarität
delhalb: **invertierender Verstärker**
- Innenwiderstand der Schaltung jetzt durch R_e gegeben
besser kontrolliert als eben!

Er kann auch integrieren ...



wieder fließt kein Strom in den OP, d. h. I_e lädt C_g auf!

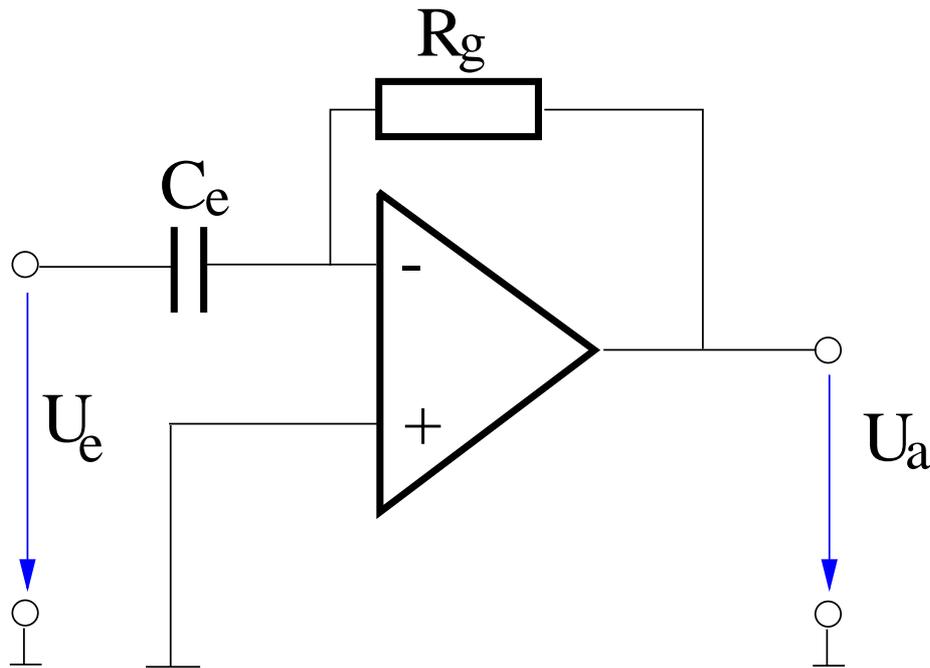
$$U_e = I_e R_e,$$

$$U_a = \frac{Q_g}{C_g} = -\frac{\int I_e dt}{C_g}$$

also $U_a = -\frac{1}{R_e C_g} \int U_e dt$

- Ausgangsspannung proportional zur zeitlich integrierten Eingangsspannung
- Anwendungen:
 - $s = \int v dt$ bei Geschwindigkeitssensoren
 - $B \propto \int U_{\text{ind}} dt$ zur Magnetfeldmessung
 - ...

... oder differenzieren



I_e lädt C_e auf,
über R_g fließt Strom vom Ausgang zur virtuellen Masse:

$$U_e = Q_e / C_e$$

$$U_a = I_g R_g = -\frac{d}{dt} Q_e R_g$$

also $U_a = -C_e R_g \frac{d}{dt} U_e$

- Ausgangsspannung proportional zur differenzierten Eingangsspannung
- Anwendungen:
 - $v = \frac{d}{dt} s$ oder $a = \frac{d^2}{dt^2} s$ bei Wegsensoren
 - $a = \frac{d}{dt} v$ bei Geschwindigkeitssensoren
 - ...

Echte Hardware

Welche „Hardware“ braucht man?

- Netzgerät mit zwei erdfreien Spannungen
für die um Masse symmetrische Betriebsspannung des OP
alternativ: zwei 9 V-Blockbatterien!
- Ein Stück Lochrasterplatine
zum Auflöten des IC-Sockels und der Anschlußbuchsen
- OP-Chips
 - Typ 741
der Klassiker, preiswert
 - Typ CA3160
Hochohmiger Eingang ($10^{13} \Omega$)
 - OP 07
rauscharm, Leerlaufverstärkung $\simeq 10^6$
 - evtl. Leistungs-OP TCA 365
Ausgangsstrom 3 A max.
- ein $100 \text{ k}\Omega$ -Trimpotentiometer zum Abgleich
wichtig bei hohem Verstärkungsfaktor
- Widerstände und Kondensatoren für die externe
Beschaltung des OP
- optional: ein schönes Kästchen mit toller Beschriftung

Resumée

Versuche, die erfolgreich mit OPs getestet wurden:

- Ladungsmessung in der Elektrostatik
- Strommessung bei Photoeffekt
- Leitfähigkeitsmessung der Luft bei radioaktiver Bestrahlung
- Thermospannungen
- Anpassung diverser Sensoren an Demonstrations-Meßgeräte
- Mikrofonverstärker
(nur „langsam“ veränderliche Gleichströme für einen OP!)
- „Leistungsfunktionsgenerator“ aus einfachem Signalgenerator, Lautsprecherverstärker

längst nicht alle Möglichkeiten

Dies waren lediglich Grundanwendungen von OPs,
die für Schulanwendungen relevant sind

es gibt noch viele, viele weitere Einsatzbereiche