

Elektrische Messtechnik

Vorlesung 09

Prof. Dr. Peter Weber

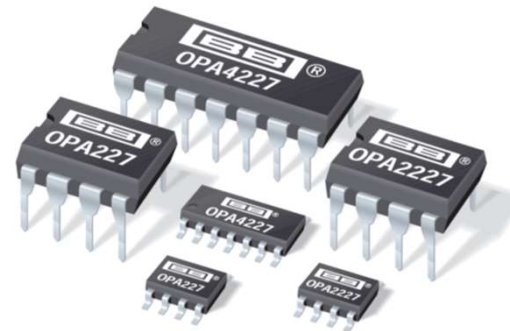
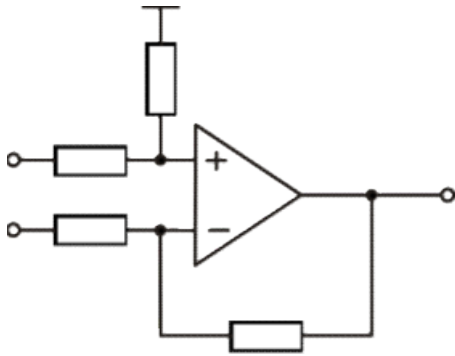
Wintersemester 24/25

Im Studiengang Elektro- und Informationstechnik (B.Eng.)

Spielregeln in der Präsenz-Vorlesung

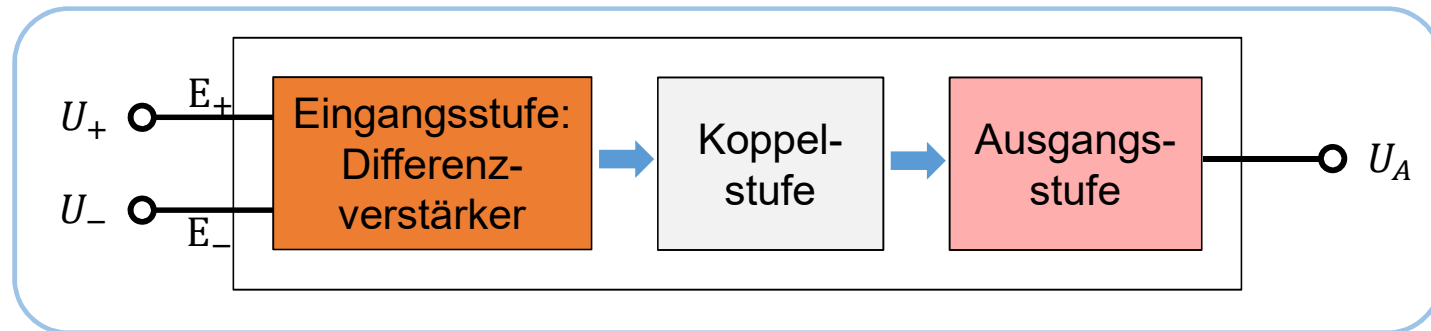
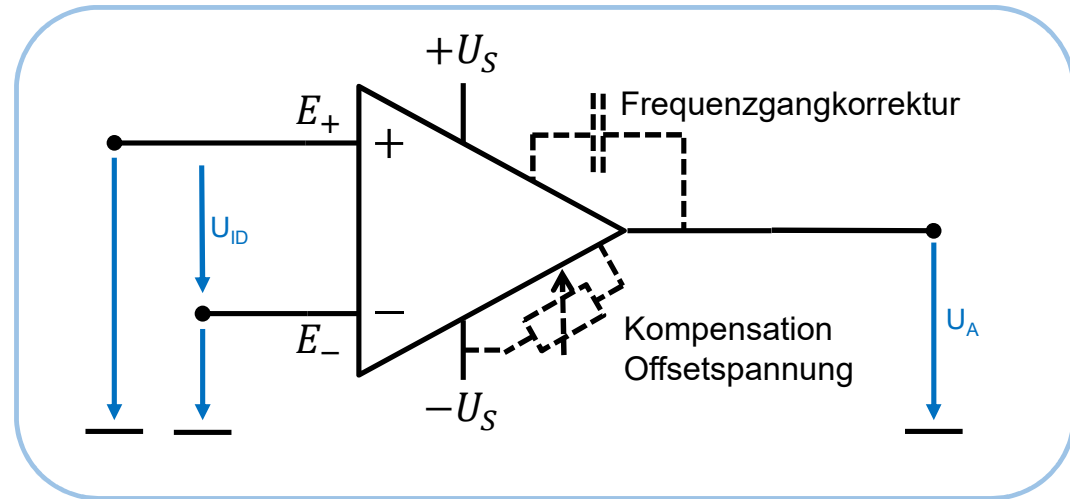
- Ihre Fragen und Anmerkungen gehen vor - Unterbrechen Sie mich gerne, wenn ich Ihre Meldung übersehen sollte
- Keine „Side Meetings“ in der Vorlesung - Paralleldiskussionen zu zweit verbreiten zu viel Unruhe
 - ➔ Fragen, Ideen oder Anmerkungen bitte immer in die große Runde – keine Hemmungen
 - ➔ Es gibt keine dummen Fragen - Niemand wird für eine Wortmeldung „agebuht“!
- Pünktlich erscheinen - Später hereintröpfelnde Teilnehmer verbreiten zu viel Unruhe
- Verlassen der Vorlesung bitte nur zur Pause oder zum Ende (logischerweise ausgenommen Toilettengänge)
- Am Ende der Vorlesung den letzten Satz vor dem Aufstehen abwarten.
- Telefone auf „leise“
- Ich wünsche mir immer Ihr Feedback – sofort in der Vorlesung oder gerne auch z.B. per mail

Verstärkung von Messsignalen



Verstärkung von Messsignalen

- Der Operationsverstärker verstärkt die an den Eingängen anliegende Differenzspannung $U_{ID} = U_+ - U_-$ und gibt eine entsprechende Spannung am Ausgang ab.
- E_+ ist der „nicht invertierende“ Eingang des Operationsverstärkers
- E_- ist „invertierende“ Eingang des Operationsverstärkers

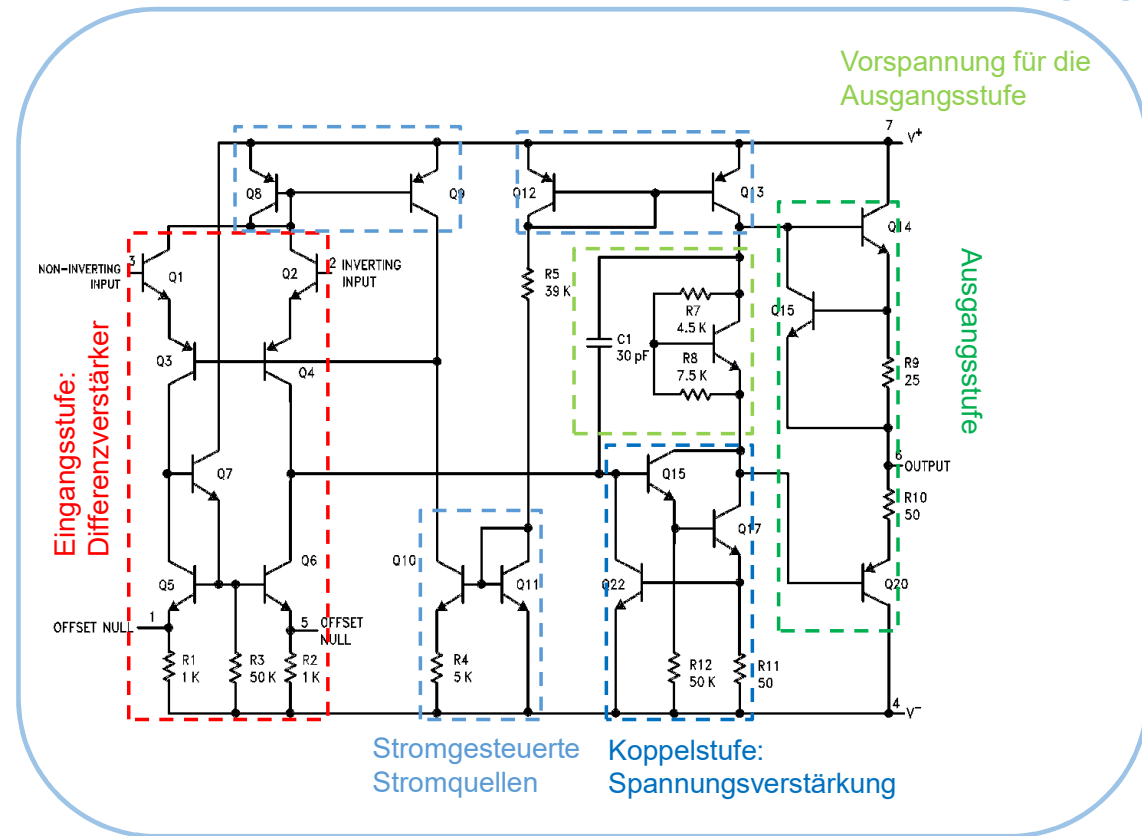


Verstärkung von Messsignalen

01:30 to 4:30 (<https://www.youtube.com/watch?v=gBAKXvsaEiw>)



- Der Klassiker aus den 60er Jahren: Der „LM741“
- Noch heute ein robustes preisgünstiges Modell
- IC-Bauweise
- Z.B. von Texas Instruments:
- <https://www.ti.com/document-viewer/LM741/datasheet/>



Spezielle Anwendungen

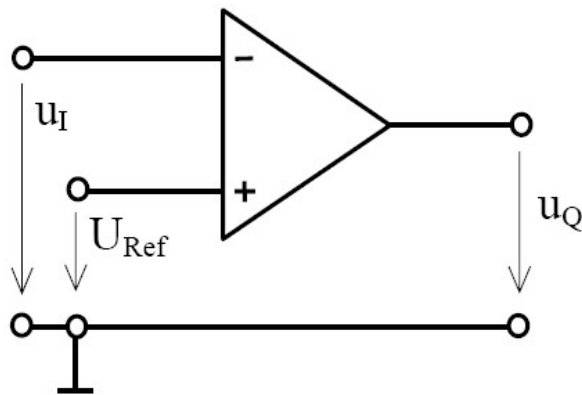
- Audio
- Messtechnik
- Treiber für Analog-Digital-Wandler
- DSL-Transmitter und Receiver

Vorteile gegenüber diskret aufgebauten Verstärkern

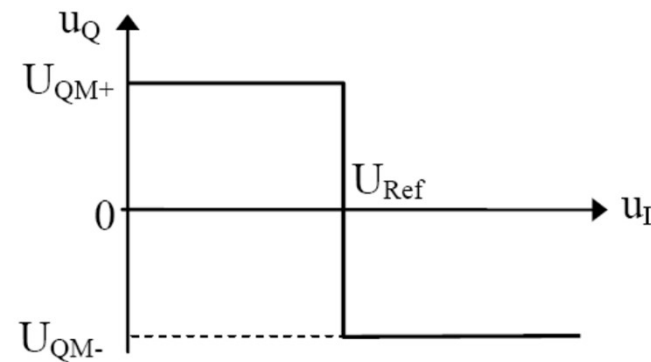
- weniger Parameterstreuungen der Halbleitereigenschaften
- geringere Temperaturabhängigkeit der Parameter
- universelle Schaltungsentwürfe möglich
- kurze Entwicklungszeiten
- Differenzverstärkung
- sehr hohe Verstärkung ($\rightarrow \infty$)
- sehr hoher Eingangswiderstand (Eingangsstrom ≈ 0)

Verstärkung von Messsignalen

Komparator



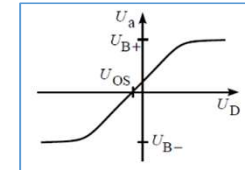
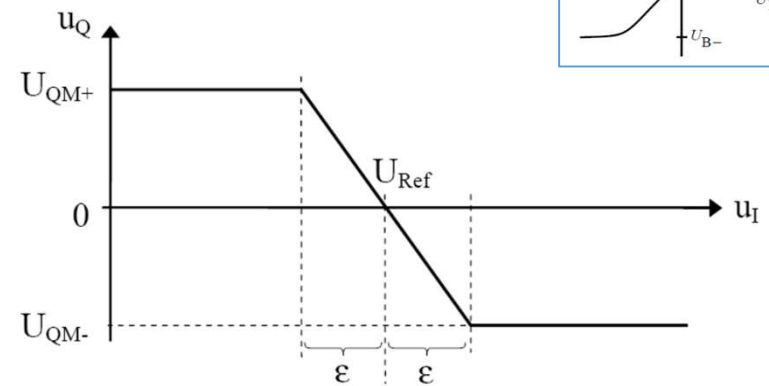
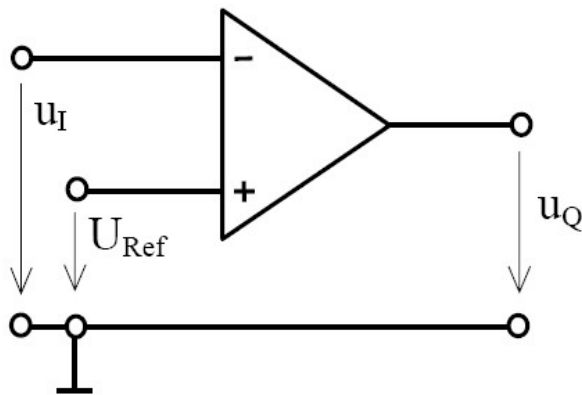
OP geht in den negativen Anschlag, wenn $u_I > u_{Ref}$
und in den positiven Anschlag, wenn $u_I < u_{Ref}$



- Die Schaltung stellt einen invertierenden Komparator dar
- Die Ausgangsspannung U_{QM} entspricht in etwa der Betriebsspannung des Operationsverstärkers
- Der Komparator vergleicht die Eingangsspannung mit einer Referenzspannung

Verstärkung von Messsignalen

Komparator



für kleine Änderungen der Eingangsspannung um U_{Ref} ist der Verlauf der Übertragungskennlinie nicht mehr senkrecht.

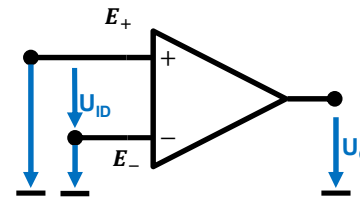
Verstärkung von Messsignalen

Ein idealer Operationsverstärker (OPamp) ist ein idealer Differenzverstärker mit einer unendlichen Spannungsverstärkung V_U :

$$R_E (R_E) \rightarrow \infty \text{ Eingangswiderstand}$$

$$R_A = 0 \text{ Ausgangswiderstand}$$

$$V_U \rightarrow \infty \text{ Spannungsverstärkung}$$



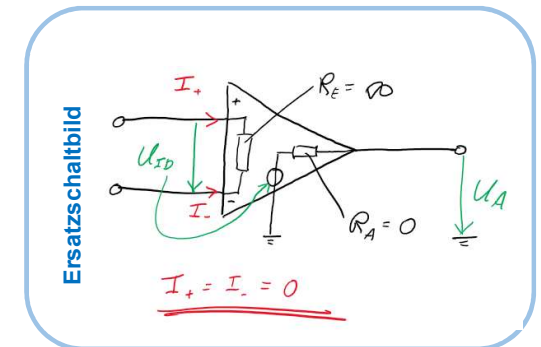
Aus der unendlichen Spannungsverstärkung folgt für die Analyse von OPamp-Schaltungen:

$$U_{ID} = \frac{U_Q}{V_U} \Rightarrow \boxed{\lim_{V_U \rightarrow \infty} U_{ID} = 0}$$

Ist V_U unendlich, dann wird die differentielle Eingangsspannung u_{id} bei einer endlichen Ausgangsspannung auf den Wert 0 gezwungen:

1

$$\boxed{U_{ID} = 0}$$



2 $i_+ = 0$ und $i_- = 0$

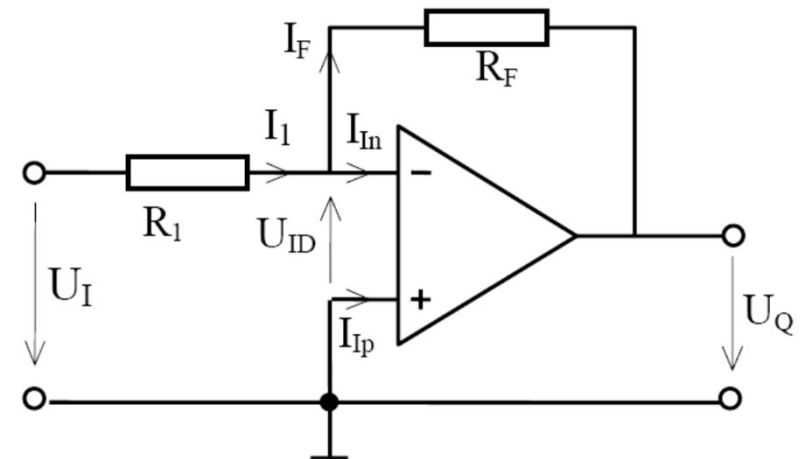
Ersatzschaltbild



Verstärkung von Messsignalen

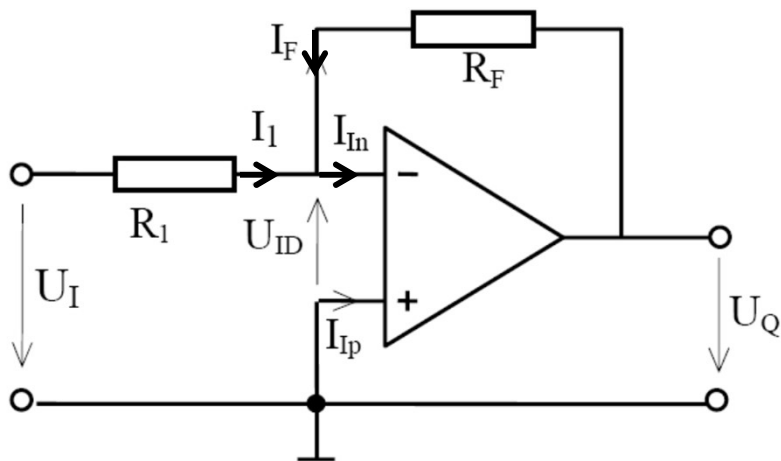
Verstärkerschaltungen mit Gegenkopplung (invertierend)

- Durch Gegenkopplung können Verstärkerschaltungen realisiert werden, die einen größeren linearen Bereich aufweisen als der nicht gegengekoppelte Operationsverstärker mit seiner sehr großen Leerlaufverstärkung.
- Zur Gegenkopplung wird das Ausgangssignal auf den invertierenden Eingang zurückgekoppelt.
- Der Operationsverstärker kompensiert über die Gegenkopplung die an den Eingängen anliegende Differenzspannung so dass sich eine dem Ausgangssignal proportionale Eingangsdifferenzspannung einstellt.



Verstärkung von Messsignalen

Verstärkerschaltungen mit Gegenkopplung (invertierend)



$$I_1 + I_F = I_{IN} = 0$$

$$I_1 = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{U_I - U_{ID}}{R_1}$$

$$I_F = \frac{U_{RF}}{R_F} = \frac{U_Q - U_{ID}}{R_F}$$

$$\frac{U_I + \cancel{U_{ID}}}{R_1} = - \frac{U_Q - \cancel{U_{ID}}}{R_F}$$

$$U_Q = -U_I \frac{R_F}{R_1}$$

$$U_{ID} = 0 ! \rightarrow$$

$$V_{UF} = \frac{U_Q}{U_I} = -\frac{R_F}{R_1}$$

Verstärkung von Messsignalen

Verstärkerschaltungen mit Gegenkopplung
(nicht-invertierend)

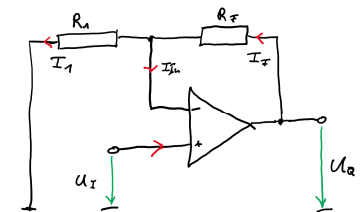
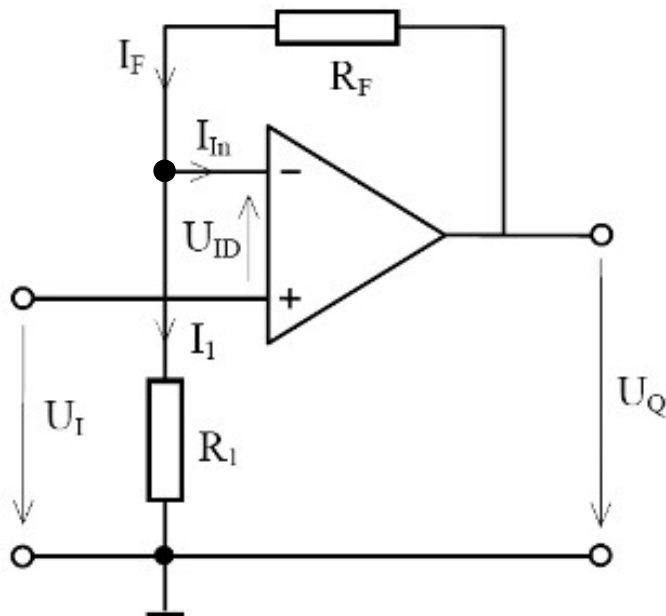
$$I_F = I_1 + I_{IN}$$

$$U_{ID} = 0! \Rightarrow \frac{U_Q - U_I + U_{ID}}{R_F} = \frac{U_I - U_{ID}}{R_1}$$

$$\frac{U_I}{R_1} + \frac{U_I}{R_F} = \frac{U_Q}{R_F}$$

$$U_Q = U_I \cdot \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)$$

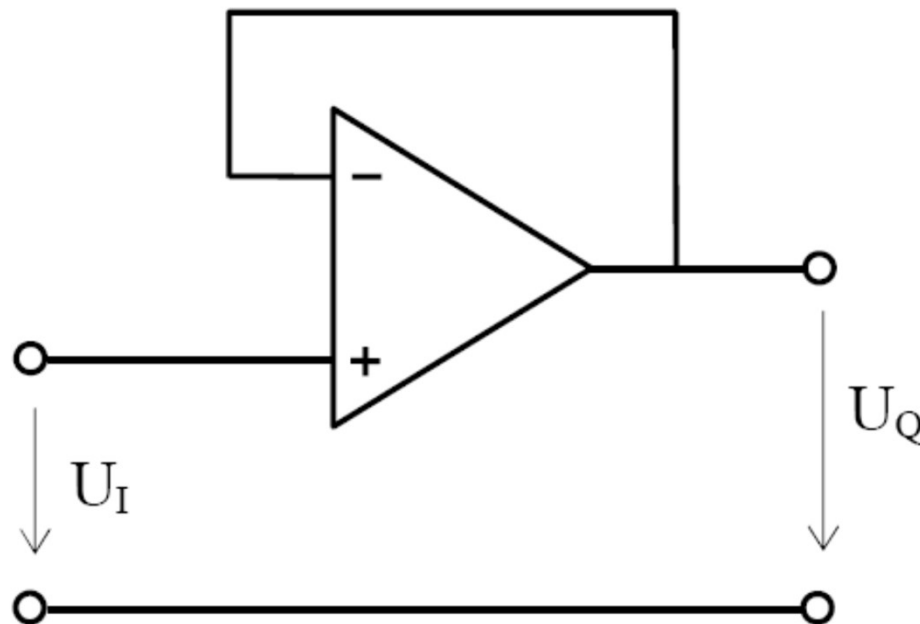
$$V_{UF} = \frac{U_Q}{U_I} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$



Verstärkung von Messsignalen

Sonderfall Spannungsfolger (oder Impedanzwandler)

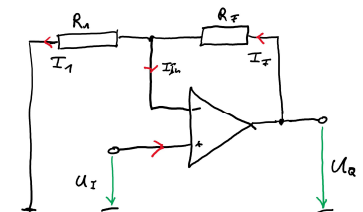
- sehr hoher Eingangswiderstand (Ausgang der vorhergehenden Stufe wird nicht belastet)
- geringer Ausgangswiderstand (= gute gesteuerte Spannungsquelle)
- Spannung wird 1:1 übertragen



$$U_Q = U_I \cdot \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) = U_I \cdot \left(1 + \frac{0}{\infty}\right) = U_I$$

$$V_{UF} = \frac{U_Q}{U_I} = 1 + \frac{R_F}{R_1} = 1 + \frac{0}{\infty} = 1$$

- Vorteil:
Obwohl Eingangsstrom $I_1 = I_p = 0$ ist, kann der Ausgang beliebig belastet werden
- Verwendung:
Abgriff einer Spannung, ohne die Spannungsquelle U_1 zu belasten

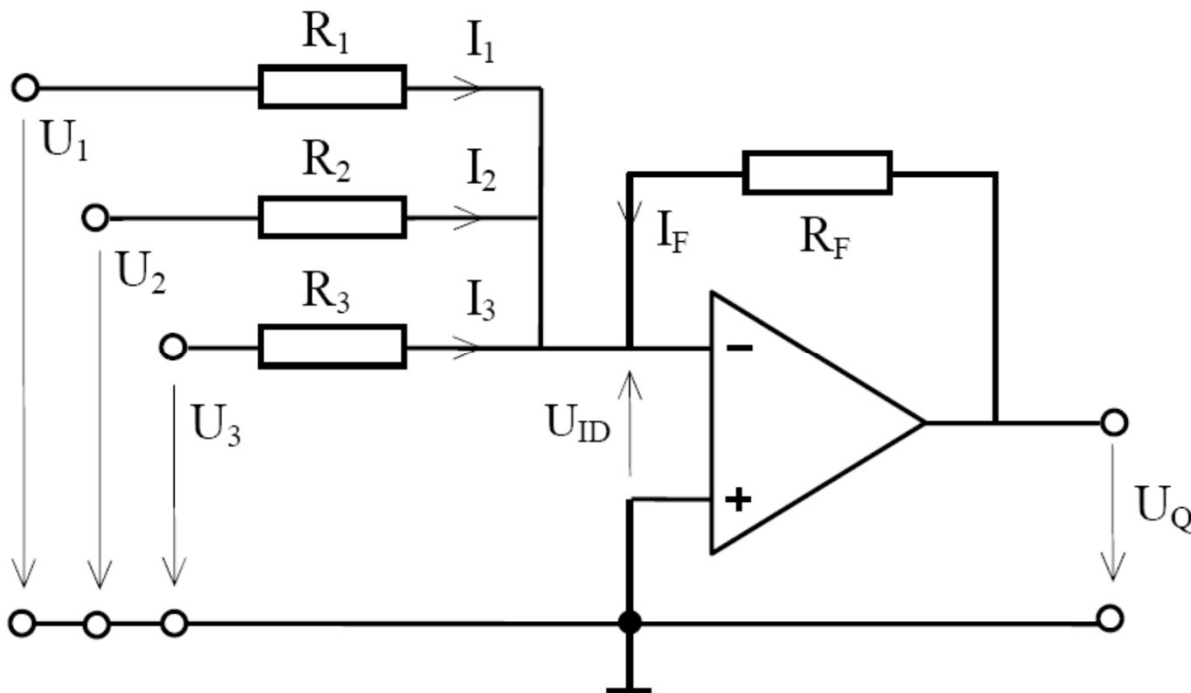


$$R_F = 0$$

$$R_1 = \infty$$

Verstärkung von Messsignalen

Addierer (mit Inversion)

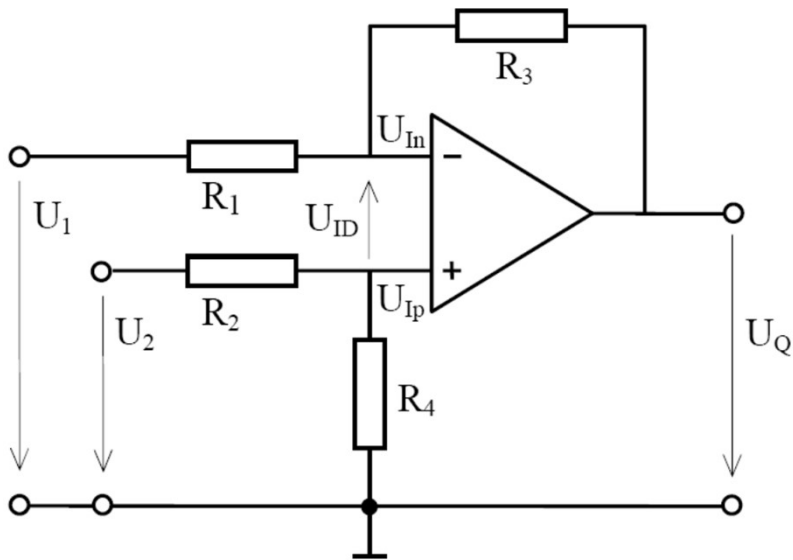


$$\text{mit } U_{ID} = 0: \quad \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} = -\frac{U_Q}{R_F}$$

$$U_Q = -\left(U_1 \cdot \frac{R_F}{R_1} + U_2 \cdot \frac{R_F}{R_2} + U_3 \cdot \frac{R_F}{R_3}\right)$$

Verstärkung von Messsignalen

Subtrahierer (Differenzverstärker)



$$U_{ID} = 0 ! \rightarrow$$

$$1 \quad U_{In} = U_{Ip} = U_2 \frac{R_4}{R_2 + R_4}$$

$$2 \quad \frac{U_1 - U_{In}}{R_1} = - \frac{U_Q - U_{In}}{R_3}$$

$$\Leftrightarrow -R_3 \left(\frac{U_1 - U_{In}}{R_1} - \frac{U_{In}}{R_3} \right) = U_Q$$

$$\Leftrightarrow -U_1 \frac{R_3}{R_1} + U_{In} \frac{R_1 + R_3}{R_1} = U_Q$$

Einsetzen von Gleichung 1 in Gleichung 2:

$$U_Q = -U_1 \frac{R_3}{R_1} + U_2 \frac{R_4}{R_2 + R_4} \frac{R_1 + R_3}{R_1}$$

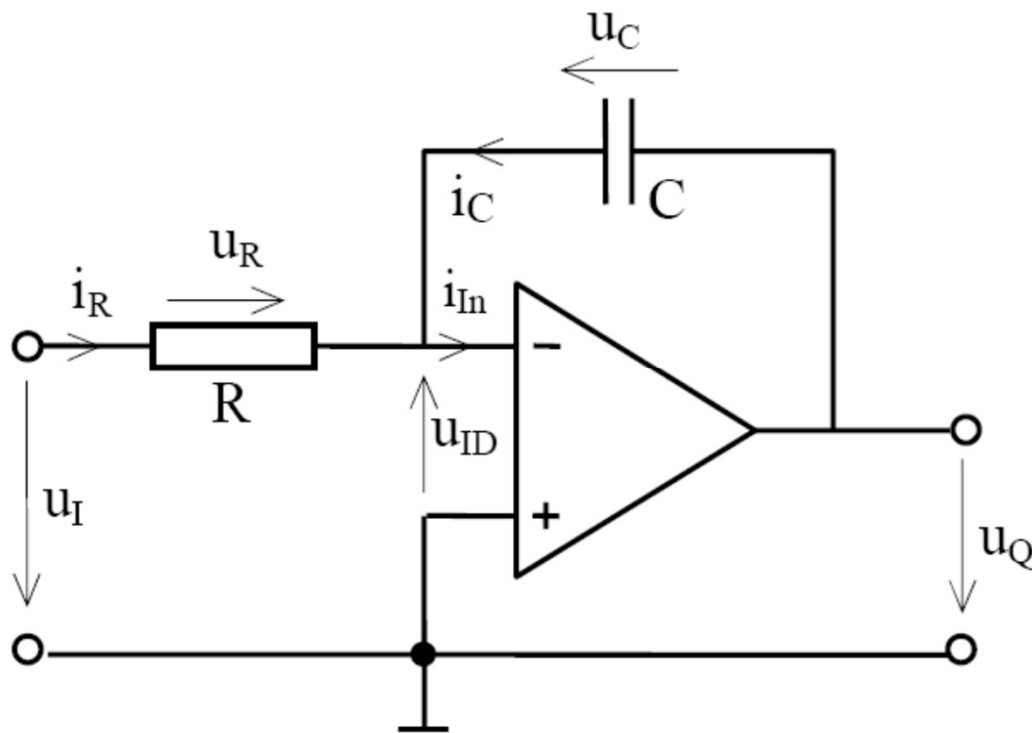
$$U_Q = U_2 \cdot \frac{R_1 + R_3}{R_2 + R_4} \cdot \frac{R_4}{R_1} - U_1 \cdot \frac{R_3}{R_1}$$

mit $R_1 = R_2 = R_I$ und $R_3 = R_4 = R_F$ erhält man:

$$U_Q = (U_2 - U_1) \cdot \frac{R_F}{R_I}$$

Verstärkung von Messsignalen

Integrierer

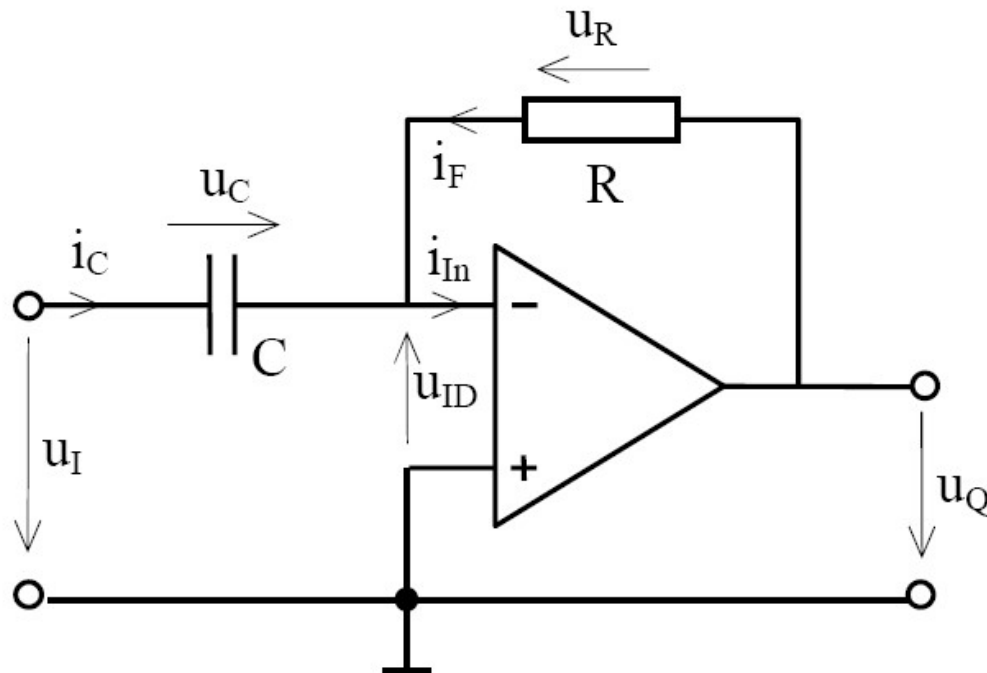


$$\frac{u_I}{R} = -C \frac{du_Q}{dt}$$
$$\Leftrightarrow \frac{u_I}{RC} = -\frac{du_Q}{dt}$$

$$u_Q = -\frac{1}{R \cdot C} \int u_I dt$$

Verstärkung von Messsignalen

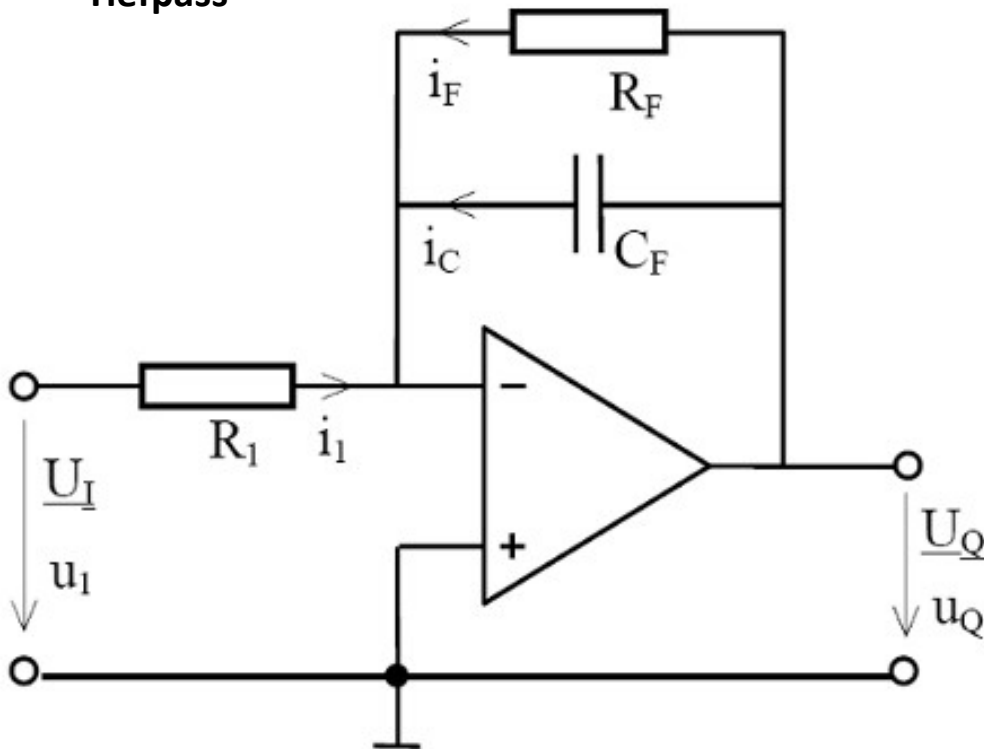
Differenzierer



$$u_Q = -R \cdot C \frac{d(u_I)}{dt}$$

Verstärkung von Messsignalen

Tiefpass

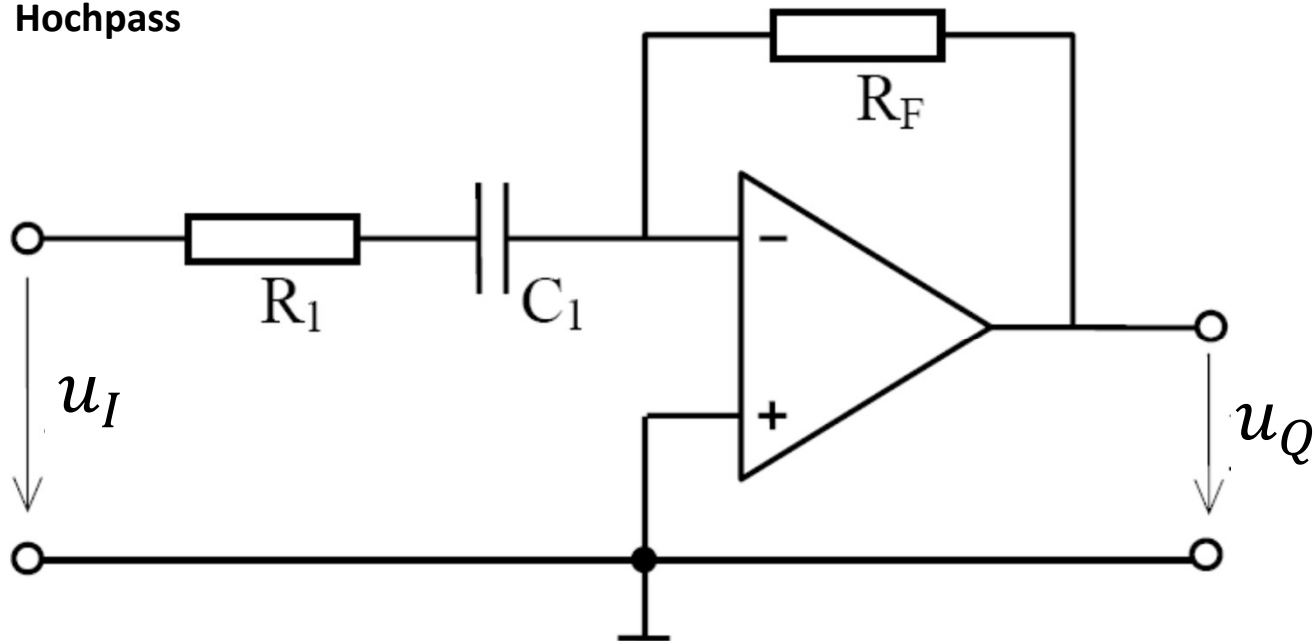


$$\frac{u_I}{R_1} = -u_Q \left(\frac{1}{R_F} + j\omega C_F \right)$$

$$u_Q = -u_I \frac{R_F}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega C R_F} = -u_I \frac{R_F}{R_1} \cdot \frac{1 - j\omega C R_F}{1 + (\omega C R_F)^2}$$

Verstärkung von Messsignalen

Hochpass

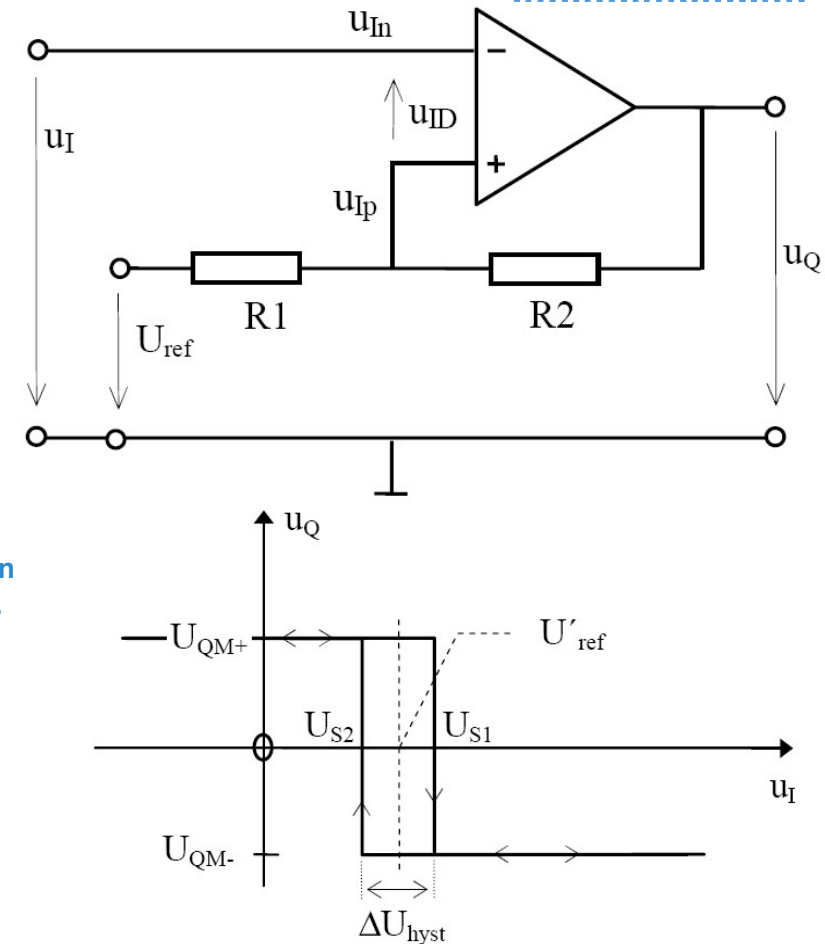


$$\frac{u_I}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = -\frac{u_Q}{R_F} \quad \Leftrightarrow \quad -u_I R_F \frac{1}{R_1 + \frac{R_1}{j\omega C_1 R_1}} = u_Q \quad \boxed{u_q} = -u_I \frac{R_F}{R_1} \cdot \frac{1}{1 - j(1/(\omega C_1 R_1))}$$

Verstärkung von Messsignalen

Schmitt-Trigger

- Der Schmitt-Trigger verhält sich wie ein Komparator mit Hysterese
- Einschalt- und Ausschaltswelle unterscheiden sich um ΔU_{Hyst}
- Die Ausgangsspannung wird über R1 und R2 auf den nicht invertierenden Eingang gekoppelt (Mitkopplung). Hierdurch ergibt sich in jedem Falle ein sprunghaftes Umschalten des Ausgangs.



$$U_{S1} = (U_{QM} - U_{ref}) \frac{R_1}{R_1 + R_2} + U_{ref}$$

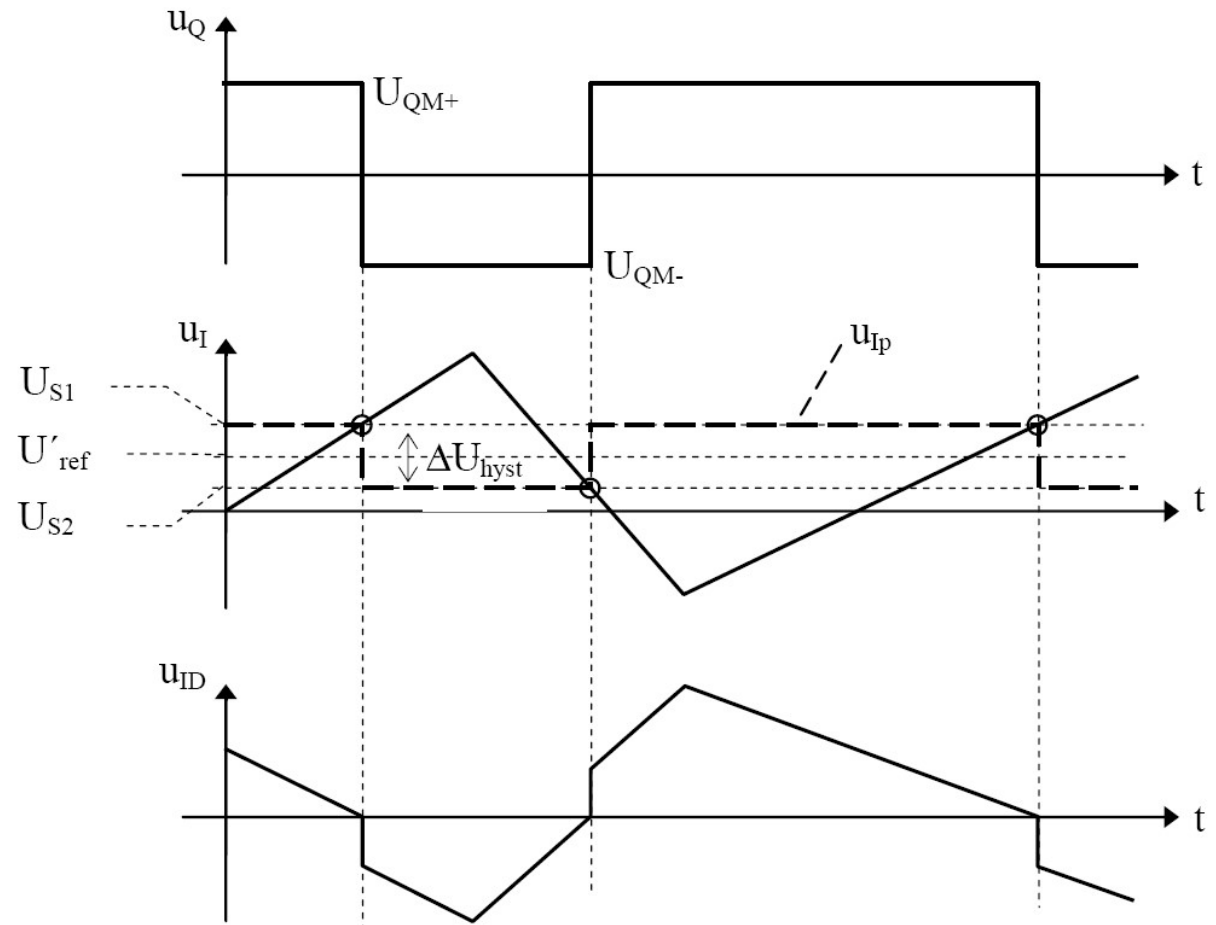
$$U_{S2} = (-U_{QM} - U_{ref}) \frac{R_1}{R_1 + R_2} + U_{ref}$$

$$U'_{ref} = \frac{U_{S1} + U_{S2}}{2} = U_{Ref} \left(1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

Komparator geht in den negativen Anschlag, wenn $u_{In} > u_{Ip}$ und in den positiven Anschlag, wenn $u_{In} < u_{Ip}$.

Verstärkung von Messsignalen

Spannungen am Schmitt-Trigger bei sich langsam änderndem Eingangssignal



Verstärkung von Messsignalen

Vergleich idealer / realer Operationsverstärker

	Idealer Op-Amp	Realer Op-Amp
Spannungsverstärkung	∞	$10^5 \dots 10^8$ 100 ... 160 dB
Eingangsimpedanz	$\infty \Omega$	$10^6 \dots 10^9$ (10^{13})
Ausgangsimpedanz	0Ω	$60 \Omega \dots 1000 \Omega$
Eingangsoffsetspannung	0 V	$10 \mu\text{V} \dots 10 \text{ mV}$
Gleichtaktunterdrückung Common Mode Rejection Ratio $\text{CMRR} = A_{\text{DIFF}} / A_{\text{COM}}$	∞	$10^5 \dots 10^7$ 100 ... 140 dB
Transitfrequenz	$\infty \text{ Hz}$	$500 \text{ kHz} \dots 1 \text{ GHz}$ _____
Rauschen	0 V	$1,4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \dots 1 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$

Dimensionierung von Operationsverstärker-Schaltungen

- Die Anforderungen an die Schaltung müssen bekannt sein
- Auswahl eines Operationsverstärkers in geeigneter Technologie
- Abschätzung der wesentlichen Parameter der Schaltung
- Nach Möglichkeit Simulation der Schaltung

Wesentliche Parameter

- Eingangsoffsetspannung / -strom
- Transitfrequenz
- Rauschen

- Spannungsverstärkung (open loop gain)
- Eingangsimpedanz
- Ausgangsimpedanz