

Elektrische Messtechnik

Vorlesung 8

Prof. Dr. Peter Weber

Wintersemester 25

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

Spielregeln in der Präsenz-Vorlesung

- Besuch der Vorlesungen erhöht die Chance auf eine gute Note bzw. Klausurbestehen
- 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 „augebuht“!
- Pünktlich erscheinen - Später hereintröpfelnde Teilnehmer verbreiten Unruhe
- Verlassen der Vorlesung bitte nur zur Pause oder zum Ende (logischerweise ausgenommen Toilettengänge)
- Am Ende der Vorlesung meinen 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

Organisation

Vorlesung:

Montag 08:15 h bis 11:30 h Raum: Hung C-101

Start 13.07.2025 - Ende 26.01.2026

Labor (Herr Michalik):

Montag 11:45 h bis 15:45 h Raum: 8-205

Terminorganisation bei Herrn Michalik

CampUAS – Vorlesung (P. Weber):

<https://campuas.frankfurt-university.de/course/view.php?id=4525>

Weber: Elektrische Messtechnik - WiSe 25/26

Enrollment Key: alessandrovolta

CampUAS – Labor (R. Michalik):

<https://campuas.frankfurt-university.de/course/view.php?id=4433>

Michalik: Labor Elektrische Messtechnik - WiSe 25

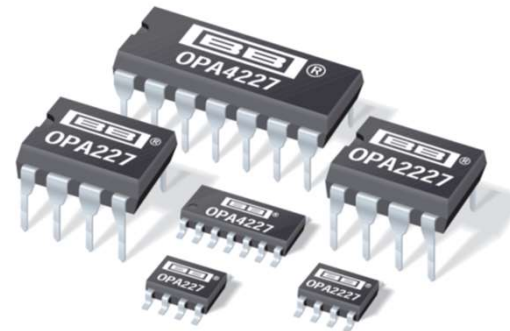
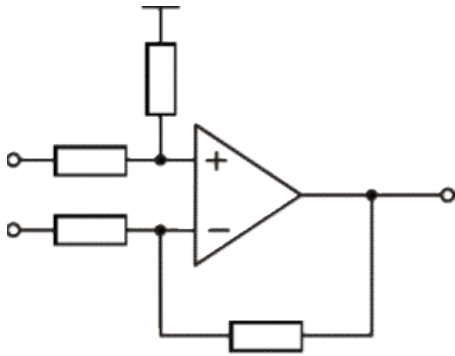
Enrollment Key: MTLAB-WiSe2025

Wichtig: Vorbesprechung Labor – Termin kommt von Herrn Michalik

Bitte unbedingt in beiden Kursen einschreiben (auch bei Herrn Michalik).

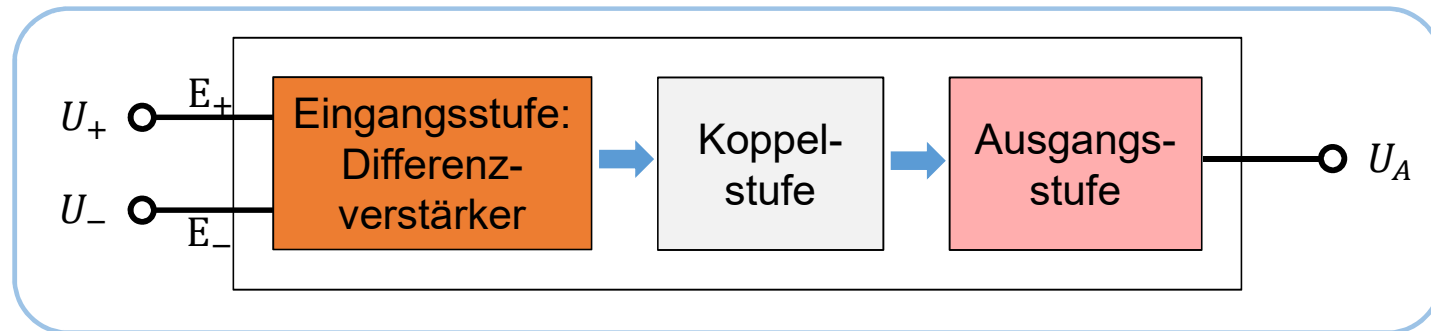
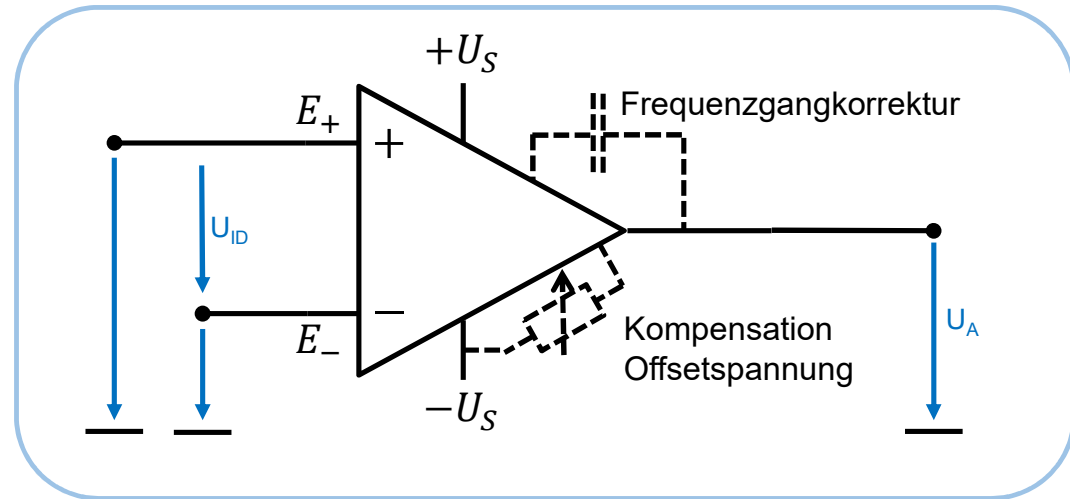
Sie verpassen sonst wichtige Infos bzw. werden bei der Laborterminvergabe nicht berücksichtigt

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

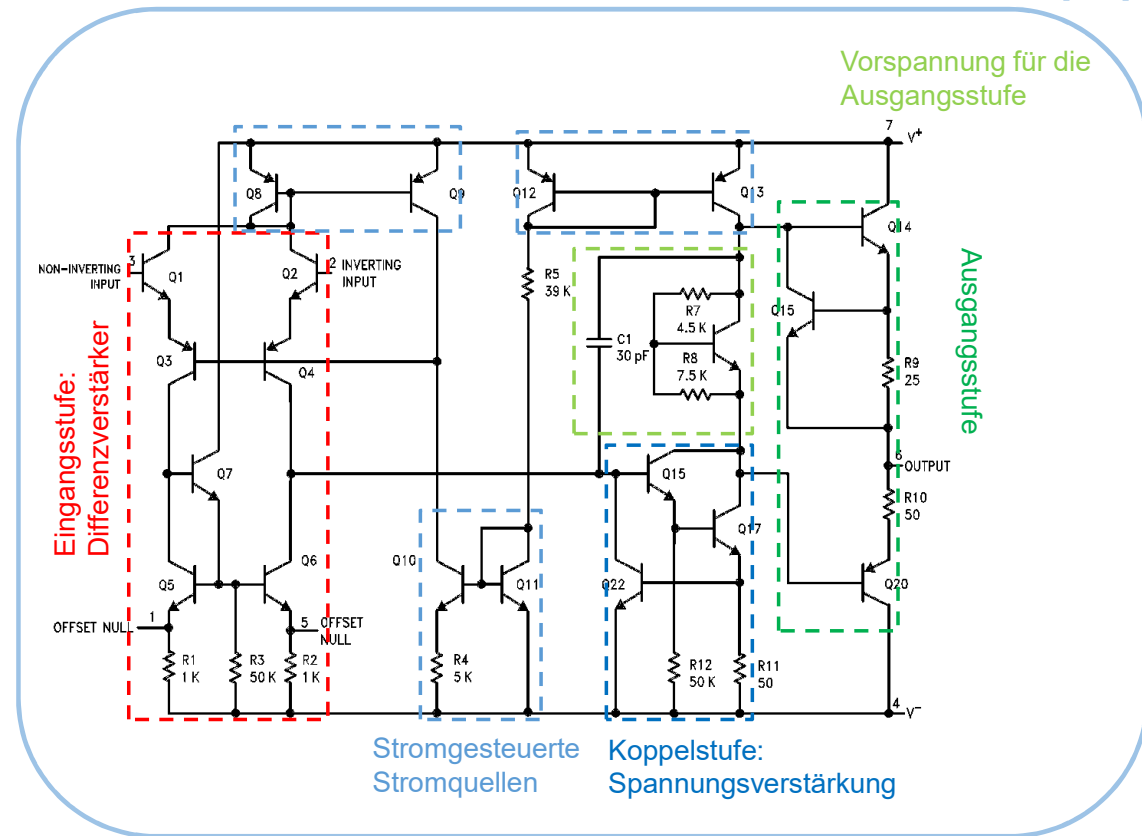


Verstärkung von Messsignalen

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

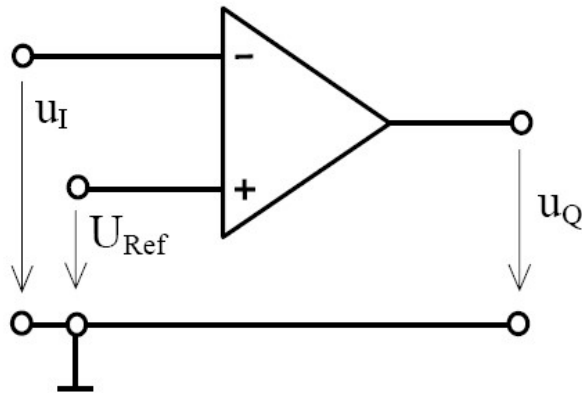
- Audio
- Messtechnik
- Treiber für Analog-Digital-Wandler
- DSL-Transmitter und Receiver

Vorteile gegenüber diskret aufgebauten Verstärkern

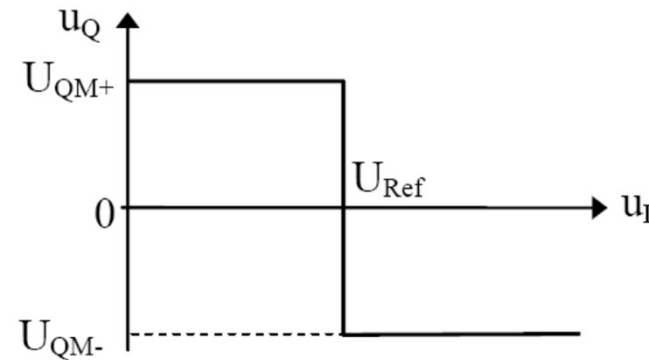
- weniger Parameterstreuungen der Halbleitereigenschaften
- geringere Temperaturabhängigkeit der Parameter
- universelle Schaltungsentwürfe möglich
- kurze Entwicklungszeiten
- Differenzverstärkung
- sehr hohe Verstärkung ($\rightarrow \infty$)
- sehr hoher Eingangswiderstand (Eingangsstrom ≈ 0)

Verstärkung von Messsignalen

Komparator



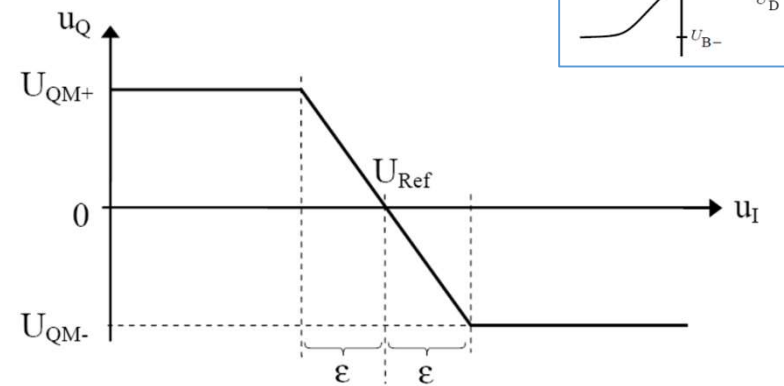
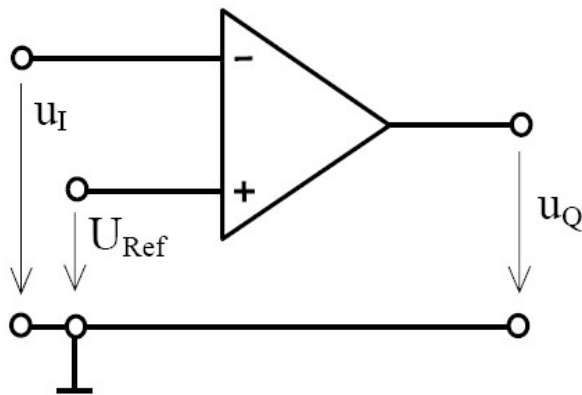
OP geht in den negativen Anschlag, wenn $u_I > u_{Ref}$
und in den positiven Anschlag, wenn $u_I < u_{Ref}$



- 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.

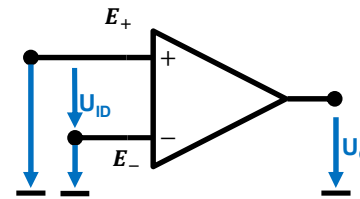
Verstärkung von Messsignalen

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

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

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

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



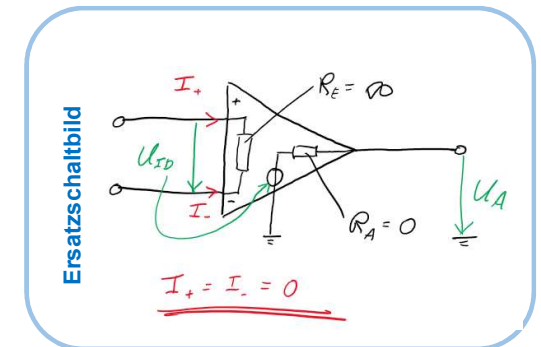
Aus der unendlichen Spannungsverstärkung folgt für die Analyse von OPamp-Schaltungen:

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

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

1

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



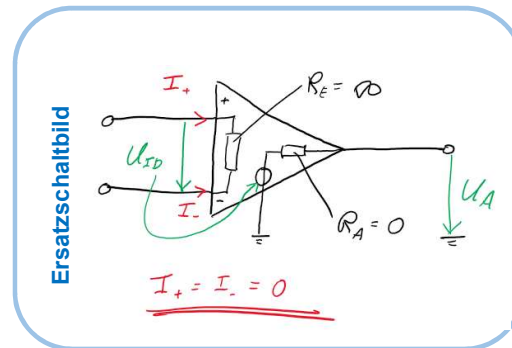
Verstärkung von Messsignalen

Ist die Eingangsimpedanz R_{ID} unendlich, dann werden die beiden Eingangsströme i_+ and i_- auf den Wert 0 gezwungen:

2 $i_+ = 0 \quad \text{und} \quad i_- = 0$

→ Diese beiden Annahmen legen die Basis für die Analyse beliebiger idealer OPamp-Schaltungen, in Kombination mit der Kirchhoff'schen Maschenregel und der Knotenregel.

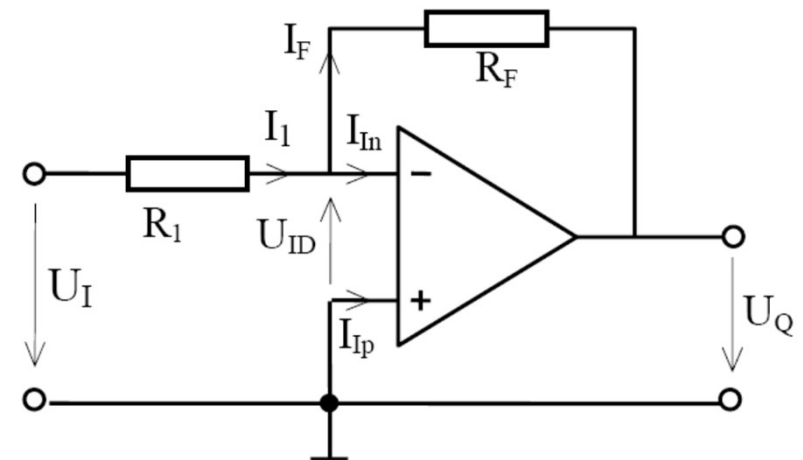
Ersatzschaltbild



Verstärkung von Messsignalen

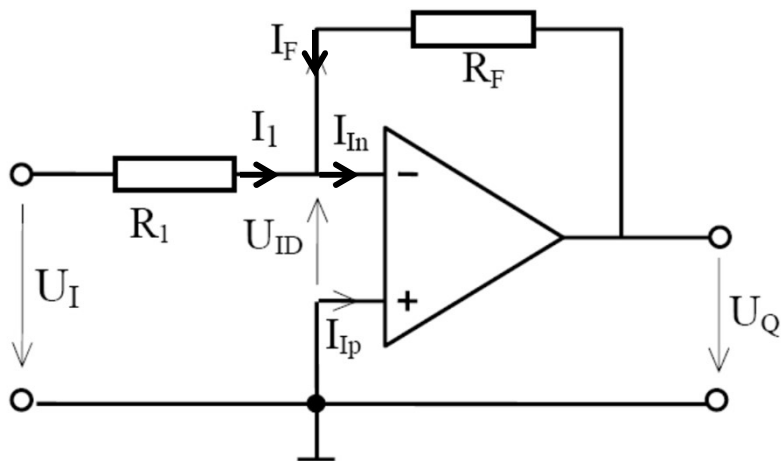
Verstärkerschaltungen mit Gegenkopplung (invertierend)

- 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 Eingangs Differenzspannung 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)

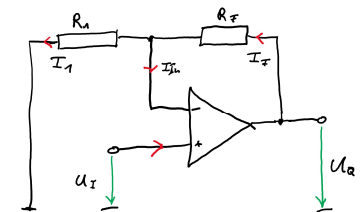
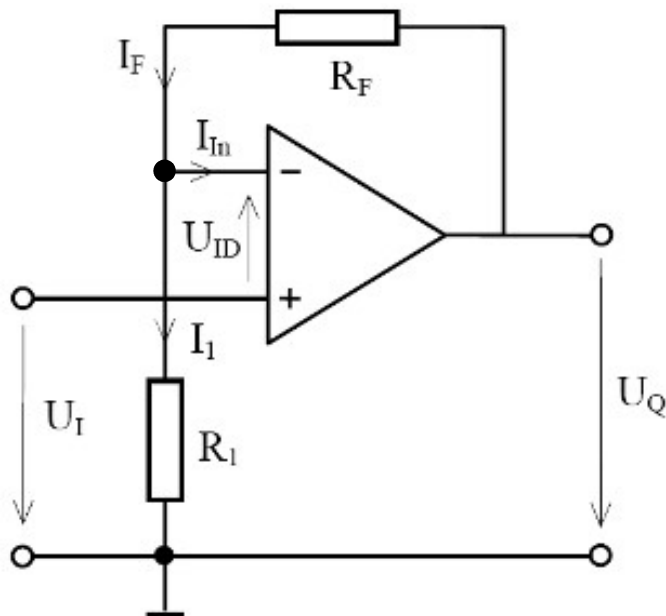
$$I_F = I_1 + I_{IN}$$

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

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

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

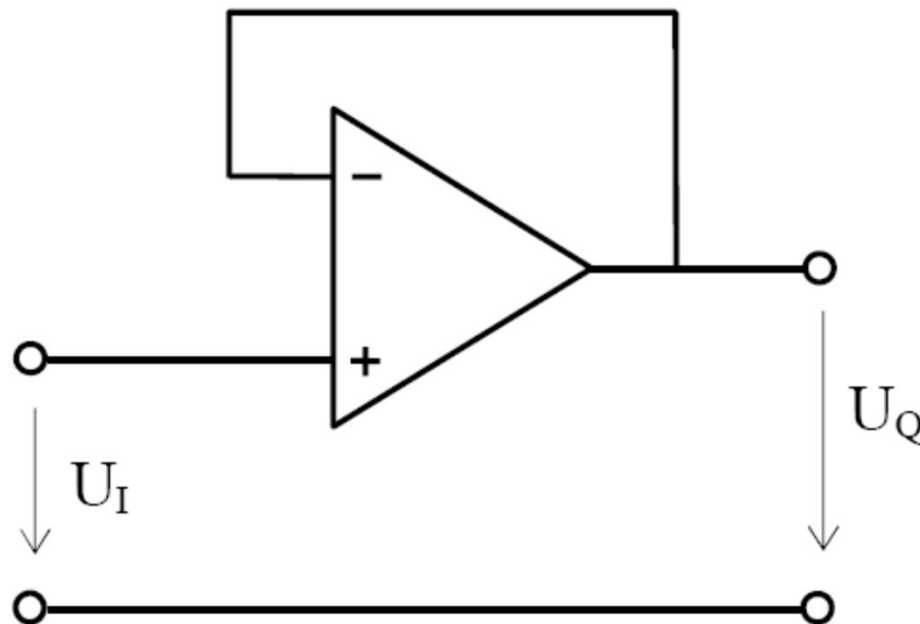
$$V_{UF} = \frac{U_Q}{U_I} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$



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



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

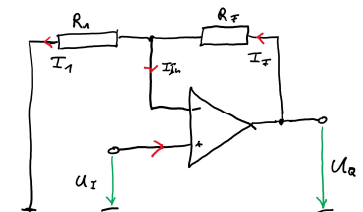
$$V_{UF} = \frac{U_Q}{U_I} = 1 + \frac{R_F}{R_1} = 1 + \frac{0}{\infty} = 1$$

- 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

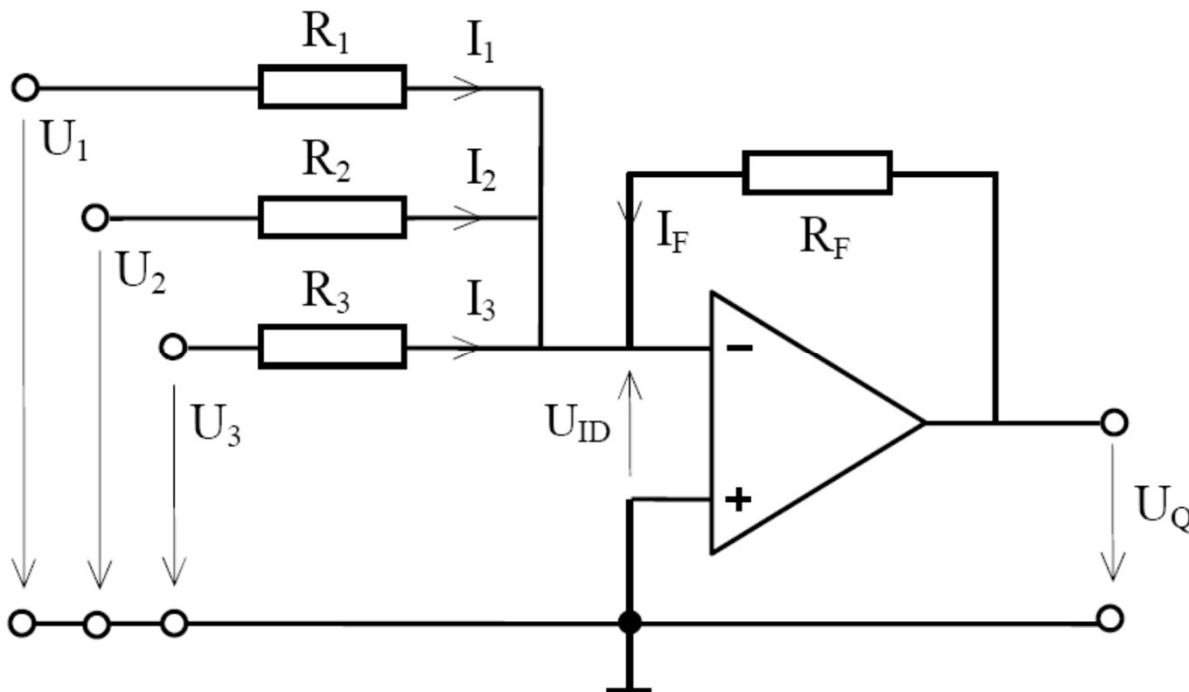


$$R_F = 0$$

$$R_1 = \infty$$

Verstärkung von Messsignalen

Addierer (mit Inversion)

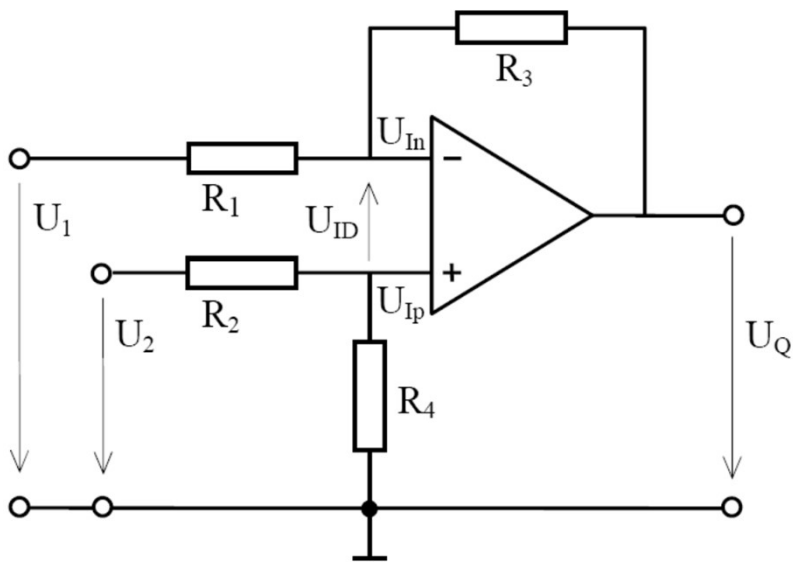


$$\text{mit } U_{ID} = 0: \quad \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} = -\frac{U_Q}{R_F}$$

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

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:

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

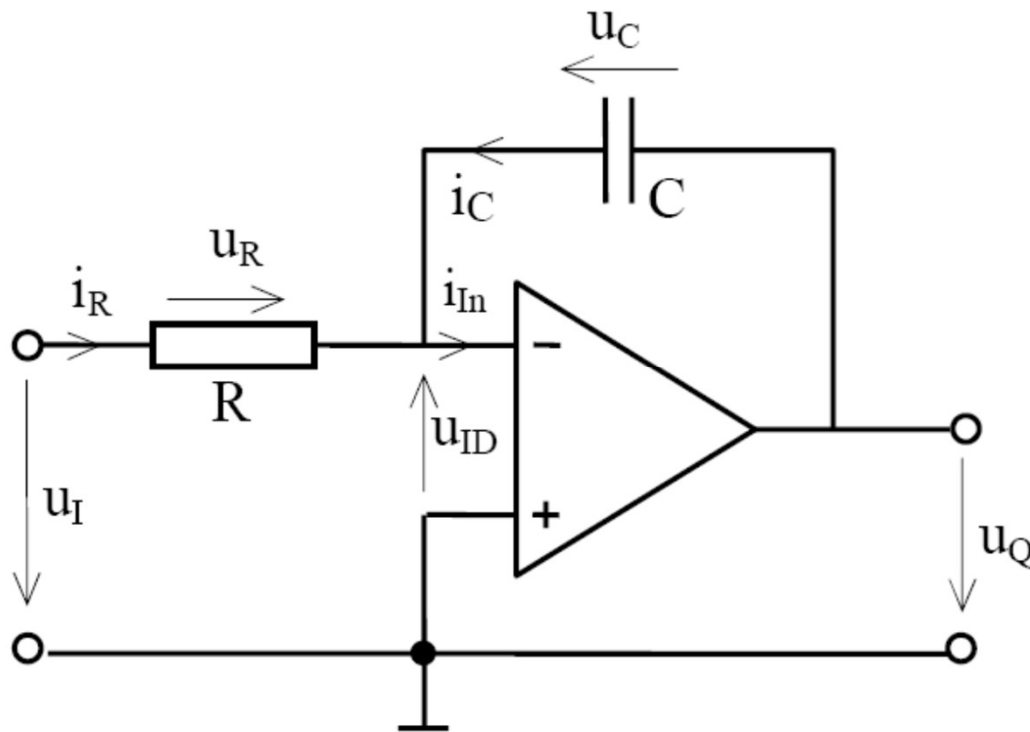
$$U_Q = U_2 \cdot \frac{R_1 + R_3}{R_2 + R_4} \cdot \frac{R_4}{R_1} - U_1 \cdot \frac{R_3}{R_1}$$

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

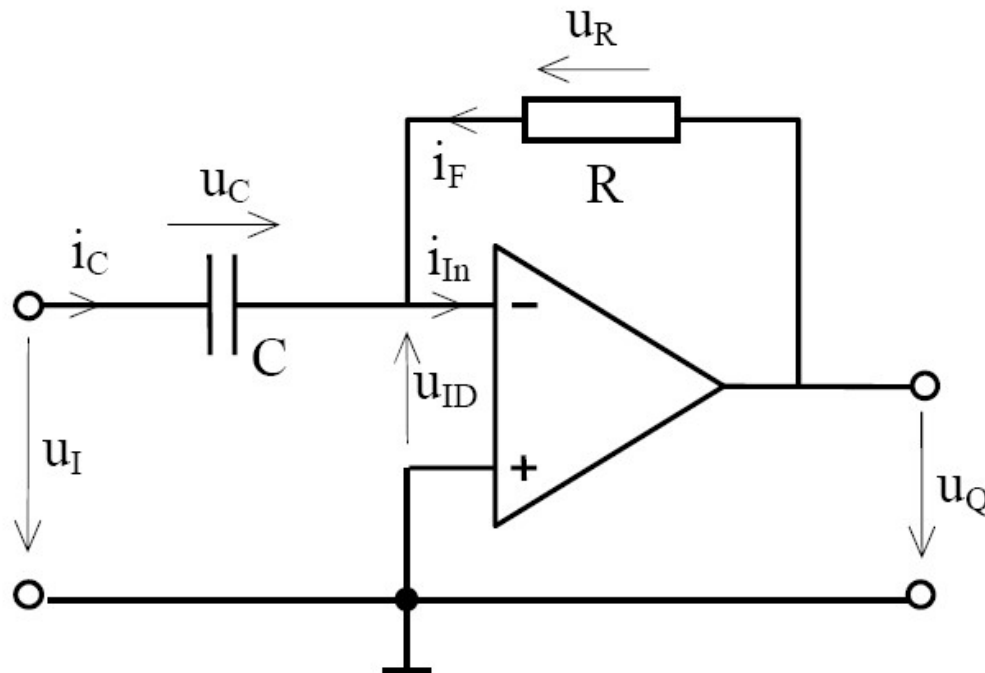


$$\frac{u_I}{R} = -C \frac{du_Q}{dt}$$
$$\Leftrightarrow \frac{u_I}{RC} = -\frac{du_Q}{dt}$$

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

Verstärkung von Messsignalen

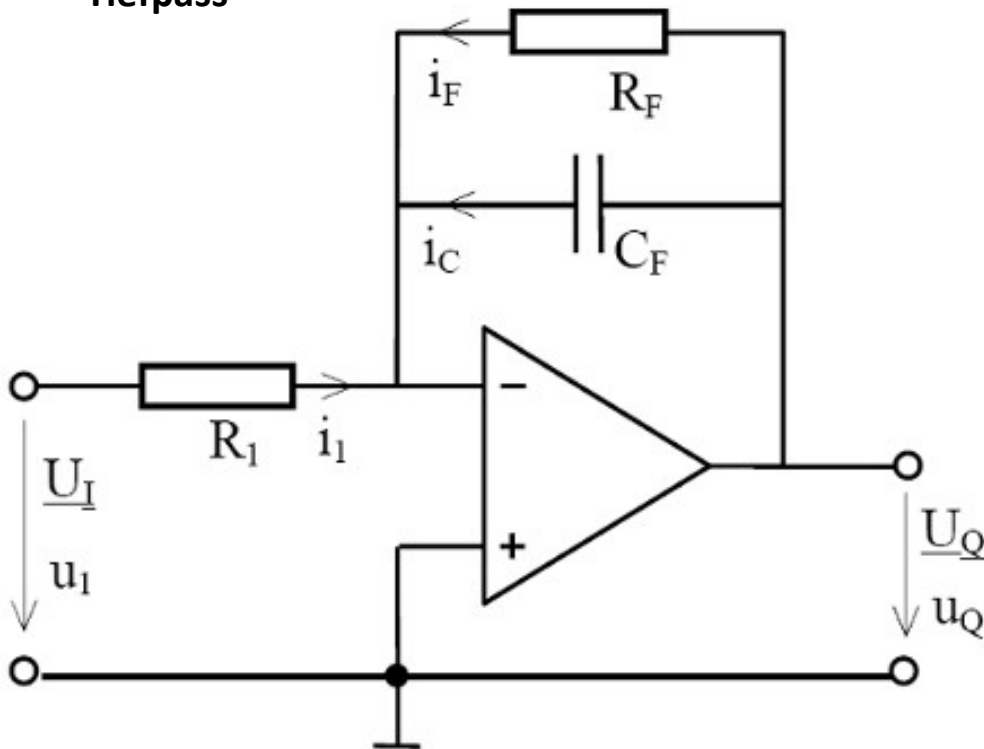
Differenzierer



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

Verstärkung von Messsignalen

Tiefpass

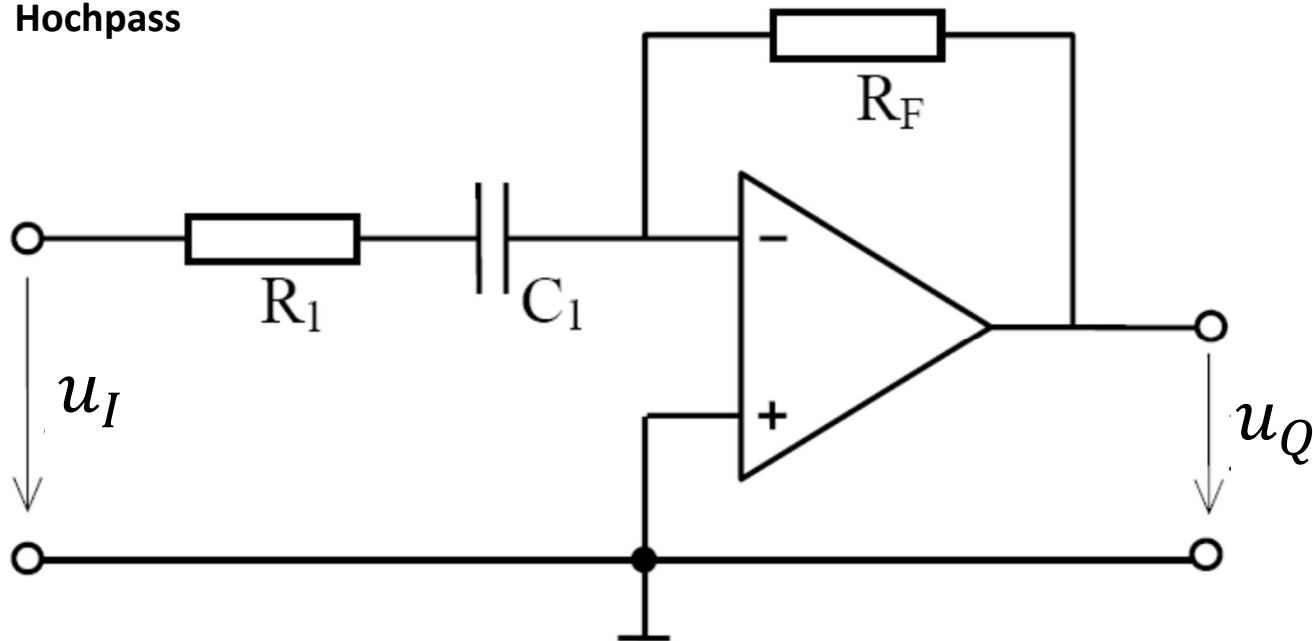


$$\frac{u_I}{R_1} = -u_Q \left(\frac{1}{R_F} + j\omega C_F \right)$$

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

Verstärkung von Messsignalen

Hochpass

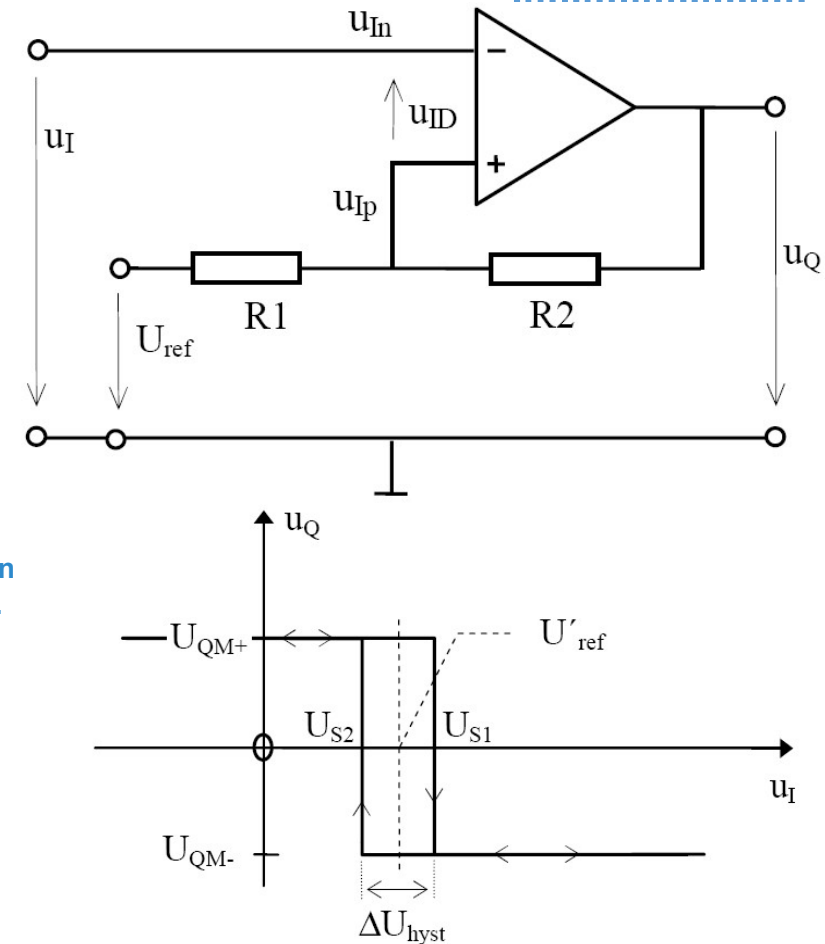


$$\frac{u_I}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = -\frac{u_Q}{R_F} \quad \Leftrightarrow \quad -u_I R_F \frac{1}{R_1 + \frac{R_1}{j\omega C_1 R_1}} = u_Q \quad \boxed{u_q} = -u_I \frac{R_F}{R_1} \cdot \frac{1}{1 - j(1/(\omega C_1 R_1))}$$

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.



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

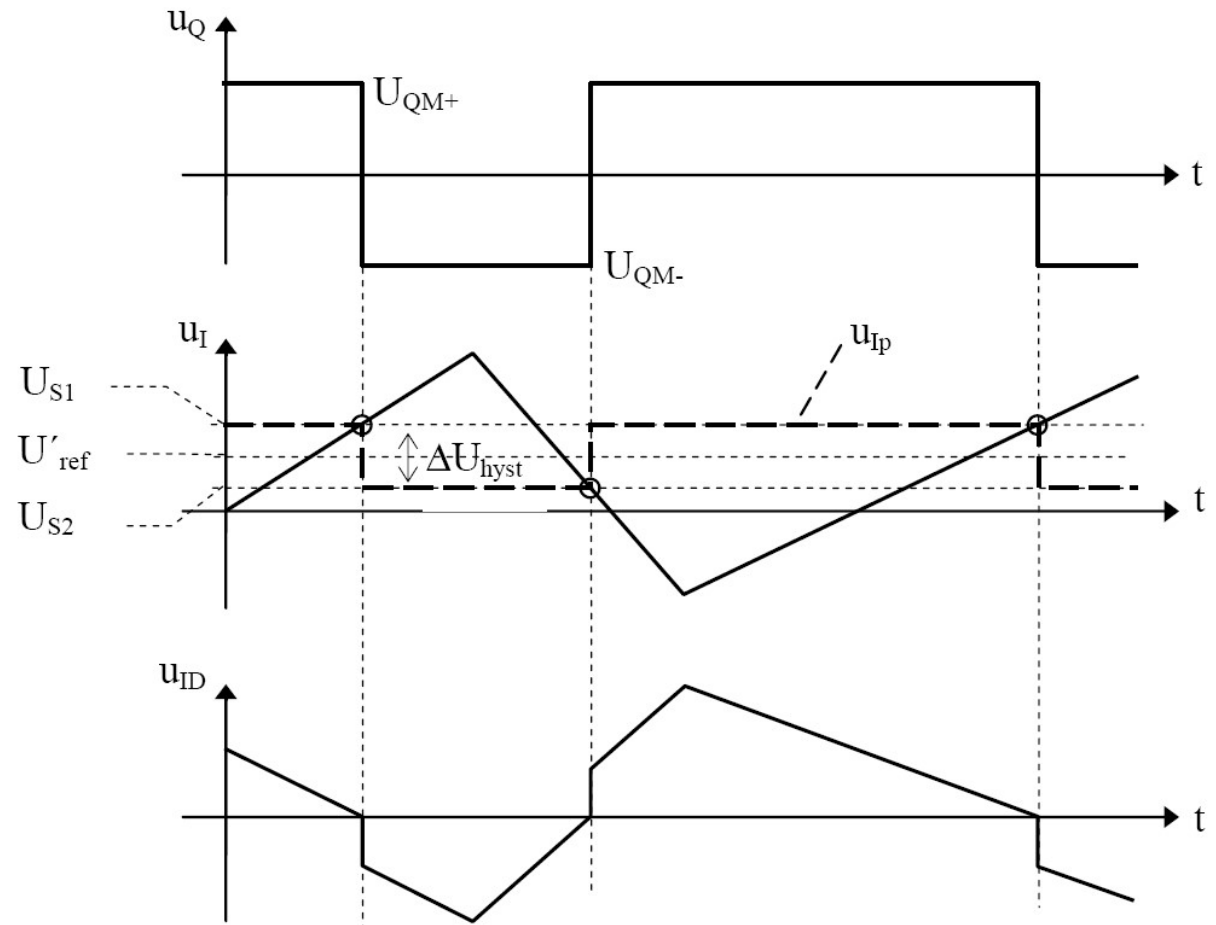
$$U_{S2} = (-U_{QM} - U_{ref}) \frac{R_1}{R_1 + R_2} + U_{ref}$$

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

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