Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

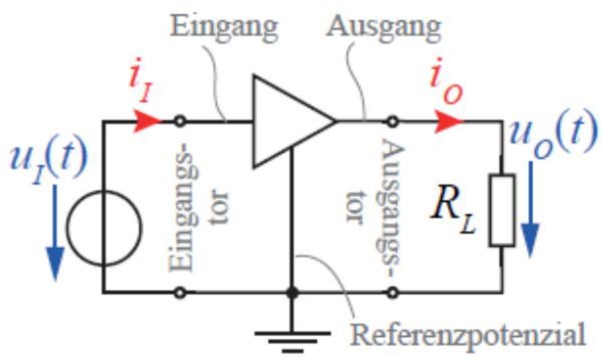
Netzwerke und Schaltungen II

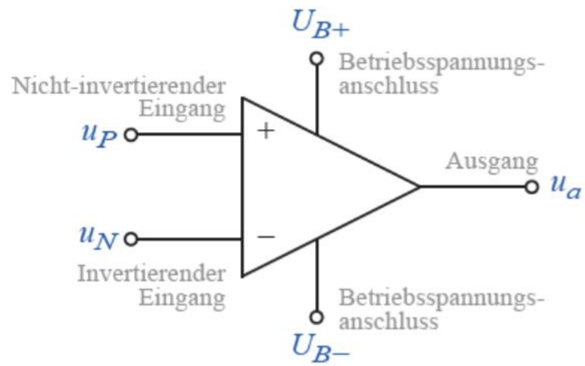
Übung 13
Operationsverstärkerschaltungen

THEORIE FÜR DIE ÜBUNG

- **Zu schwache Messsignale oder durch Übertragung abgeschwächte Signale müssen auf ausreichend grossen Wert verstärkt werden**
- **Anwendungen:**
  - Radio und sonstige drahtlose Kommunikationstechnik
  - Audioverstärker
  - Messsignalverstärker
  - Steuerungs- und Regelungstechnik

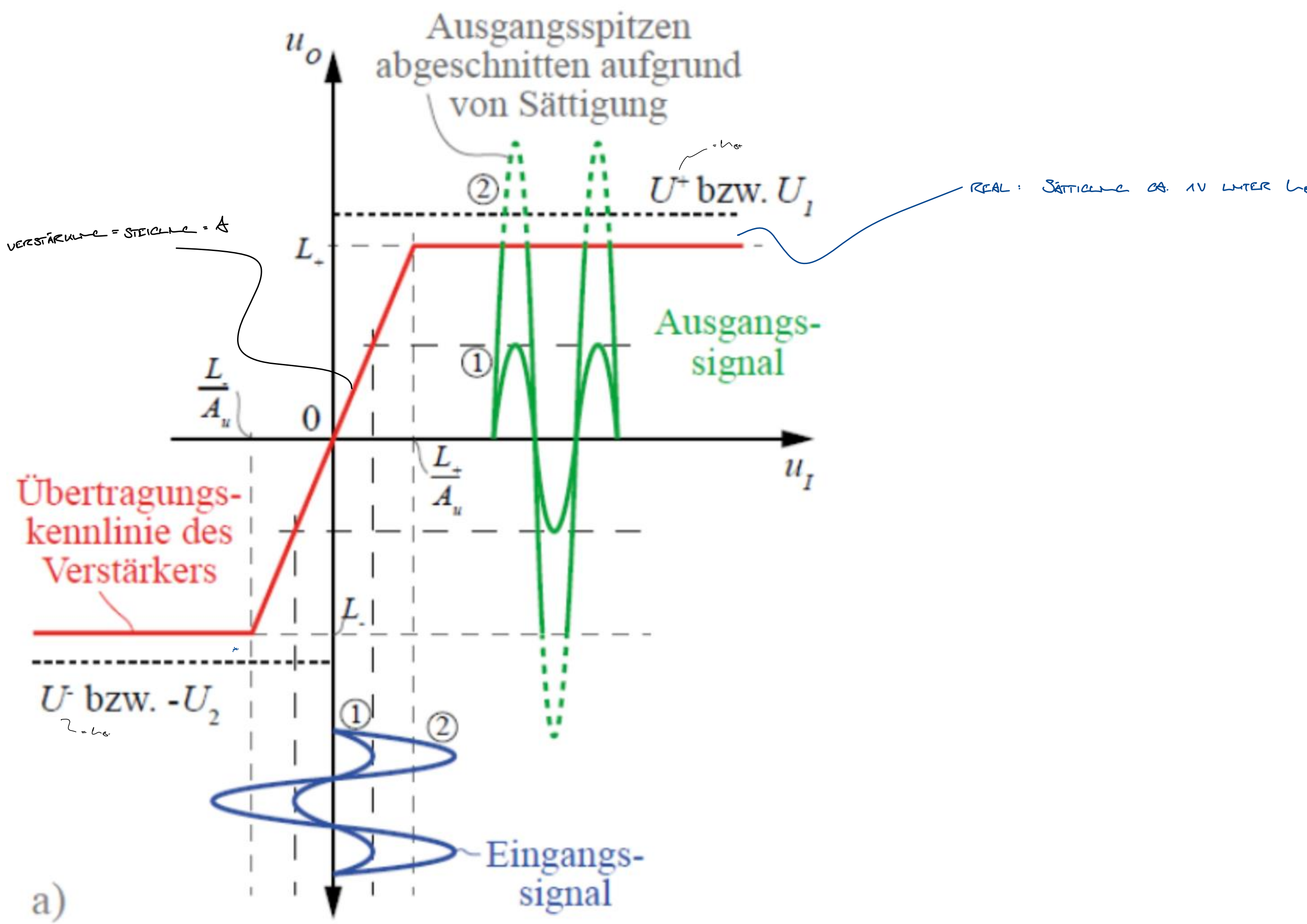
- **Symbolisches Schaltbild:**



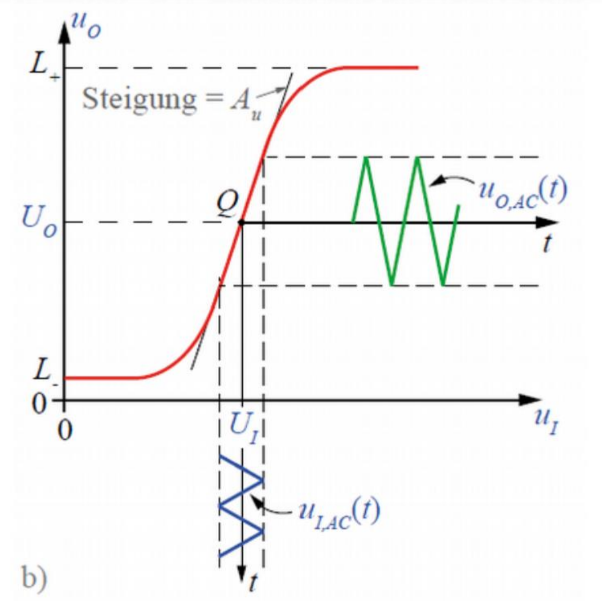


- **Ein idealer Verstärker verstärkt das Eingangssignal $u_1(t)$ um einen Faktor A, der unabhängig von der Frequenz ist.**
  - $u_0(t) = A \cdot u_1(t)$ $= A \cdot (u_P(t) - u_N(t)) = u_a(t) \in [u_{B-}, u_{B+}]$
- **Verstärkungen werden häufig in dB angegeben**
  - $A_{db} = 20 \cdot log_{10}\left(\frac{u_0}{u_1}\right)$ $\Longleftrightarrow$ $\frac{u_0}{u_1} = 10^{\frac{A_{dB}}{20}}$
- **Es gibt auch OPVs mit nur einem Betriebsanschluss. Die Betriebsanschlüsse werden im Schaltbild meist weggelassen.**

Clipping (SÄTTIGUNG)



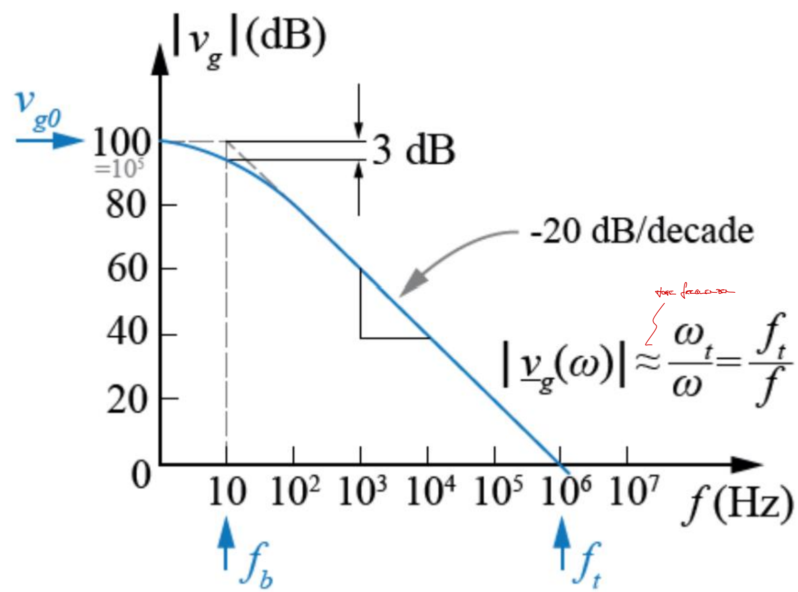
- **Reale Verstärker haben:**
  - Einen Eingangswiderstand. Dieser sollte möglichst gross sein.
  - Einen Ausgangswiderstand. Dieser sollte möglichst klein sein.
  - Ein nicht lineares Verhalten, dies führt zu Verzerrungen der Signalform.
  - Die Verstärkung ist dann amplituden- und frequenzabhängig.



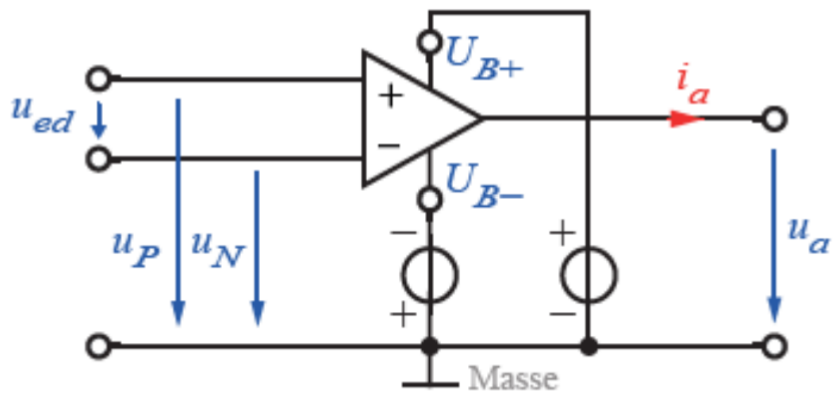
- **Reale Verstärker haben das Verhalten eines aktiven Tiefpassfilters**
- v_{g0} **ist die Gleichspannungsverstärkung**
- f_b **ist die Knickfrequenz**
- f_t **ist die Frequenz wo** $\frac{u_0}{u_1}$ **noch 1 beträgt (Transitfrequenz)**
- **Es gilt:**
  - $v_g(\omega) = \frac{v_{g0}}{1+\frac{j\omega}{\omega_b}}$

A(j0) ⟺ ω = 0

TP 1. Ord.



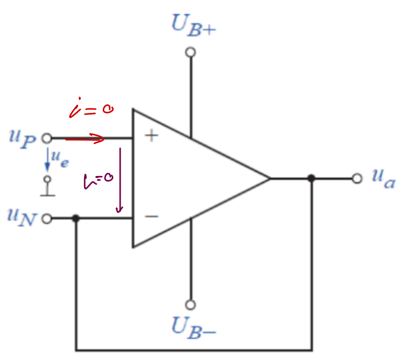
- $u_a = A \cdot (u_P - u_N)$



- **Der ideale OPV ist frequenzunabhängig, besitzt eine unendlich hohe Verstärkung, einen unendlich grossen Eingangswiderstrand und einen verschwindenden Ausgangswiderstand**
- **Das Funktionsprinzip des OPV beruht auf der Verstärkung der Eingangsspannungsdifferenz $u_P - u_N$ und dessen Ausgabe am Ausgang.**
- **Man bezeichnet den + Eingang als «nicht invertierenden Eingang» und den – Eingang als «invertierenden Eingang».**

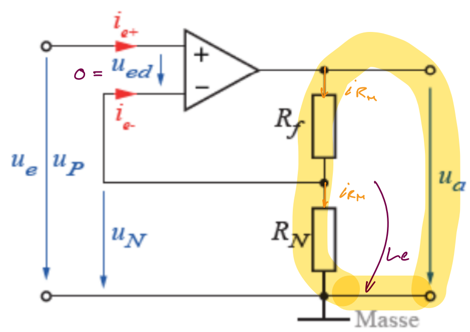
Rückkopplung

- **Um die Verstärkung einstellen zu können, koppelt man den Ausgang zurück auf den invertierenden Eingang.**
- **Diese negative Rückkopplung setzt die Verstärkung auf einen endlichen Wert herab.**
- **Das führt dazu, dass wir beim idealen OPV folgende Annahmen machen können:**
  - $u_P - u_N = 0$ VIRTUELLER KURZSCHLUSS
  - **In den OPV fliesst kein Strom hinein**
- **In allen alten Prüfungen durften ideale OPVs angenommen werden**



(IDEAL : $u_{ed} = 0$ UND $i_{e-} = i_{e+} = 0$)

- **Nicht invertierender Verstärker**



$$i_{RN} = \frac{u_e}{R_N}$$

$$u_a = \left(1 + \frac{R_f}{R_n}\right) \cdot u_e$$

MASCHE : $-u_a + i_{RN}\left[R_F + R_N\right] = 0$

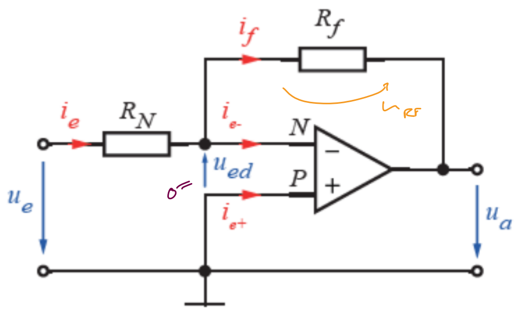
$$\Longleftrightarrow \quad u_a = \frac{u_e}{R_N}\left[R_F + R_N\right]$$

$$= \left[1 + \frac{R_F}{R_N}\right] u_e$$

(IDEAL: $u_{ed} = 0$ UND $i_{e-} = i_{e+} = 0$)

- **Invertierender Verstärker:**

$i_e = \frac{u_e}{R_F} = i_f$ BZW. $u_{RF} = i_F \cdot R_F = \frac{u_e}{R_N} \cdot R_F$



$$u_a = -\frac{R_f}{R_n} \cdot u_e$$

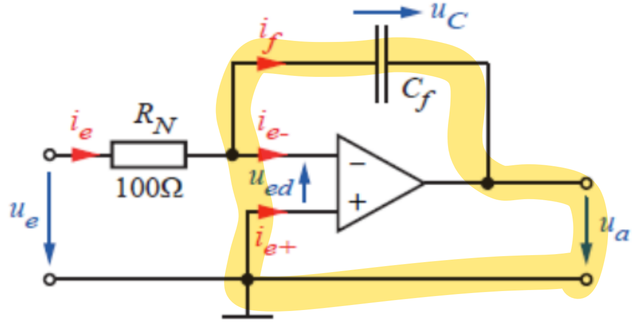
MASCHE: $-u_a - u_{RF} = 0$

$$\Longleftrightarrow u_a = -\frac{R_F}{R_N} \cdot u_e$$

$$i_e = \frac{u_e}{R_N} = i_f$$

- **Integrierer**

$$u_c(t) = u_{c0} + \frac{1}{C_f}\int_0^t i_c(t)\,dt = u_{c0} + \frac{1}{C_f}\int_0^t \frac{u_e}{R_N}\,dt$$



$$u_a = -U_{c0} - \frac{1}{R_n \cdot C_f} \cdot \int_0^t u_e \cdot dt$$

MASCHE: $-u_a - u_c = 0$

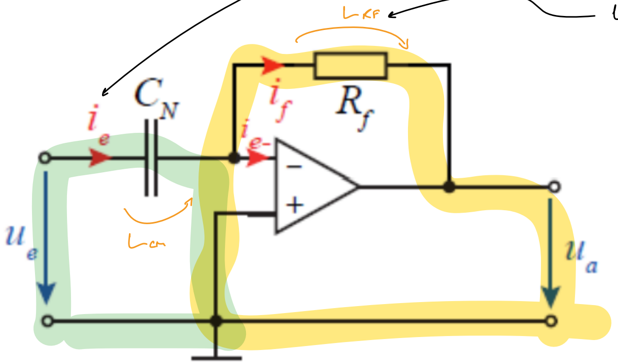
$$\Longleftrightarrow \quad u_a(t) = -u_{c0} - \frac{1}{R_N C_f}\int_0^t u_e(t)\,dt$$

(IDEAL : $u_d = 0$ UND $i_{e-} = i_{e+} = 0$)

- **Differenzierer**

$i_e(t) = C_N \cdot \frac{d}{dt} u_{CN}(t) = C_N \frac{d}{dt} u_e(t) = i_f$

$u_{RF} = i_e(t) \cdot R_F$

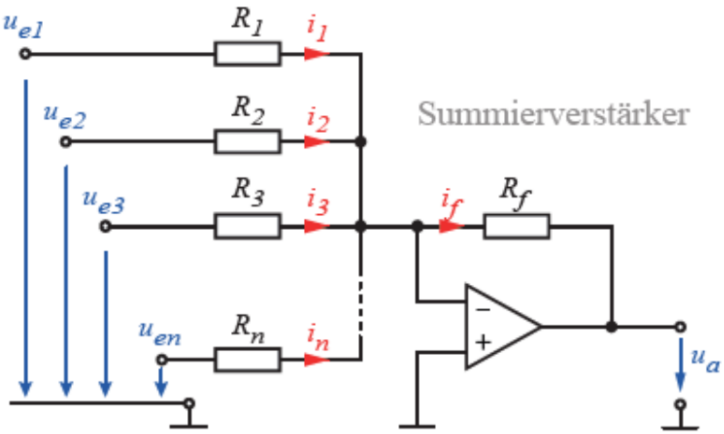


$$u_a = -R_f \cdot C_n \cdot \frac{du_e}{dt}$$

MASCHE: $-u_a - u_{RF} = 0$

$$\Longrightarrow \quad u_a = -R_f \cdot C_n \cdot \frac{du_e}{dt}$$

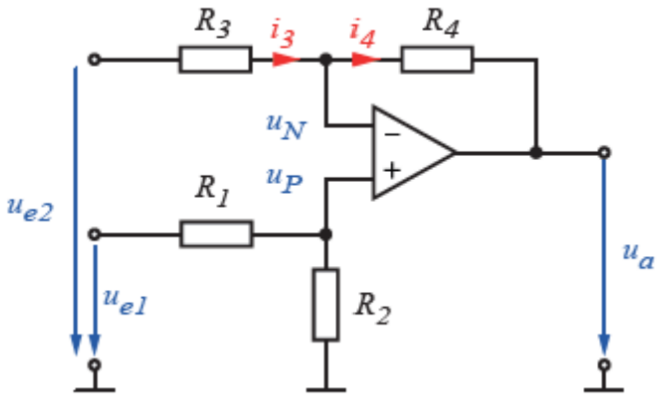
- **Mit Verstärkern können zahlreiche Funktionen ausgeübt werden, darunter auch Addition/Subtraktion**
- **Hier ein Beispiel von einem Addierer:**



$$u_a = -\frac{R_f}{R_1}\cdot u_e - \frac{R_f}{R_2}\cdot u_e - \frac{R_f}{R_3}\cdot u_e - \ldots$$

 BEISPIELE

- **Subtrahierer**



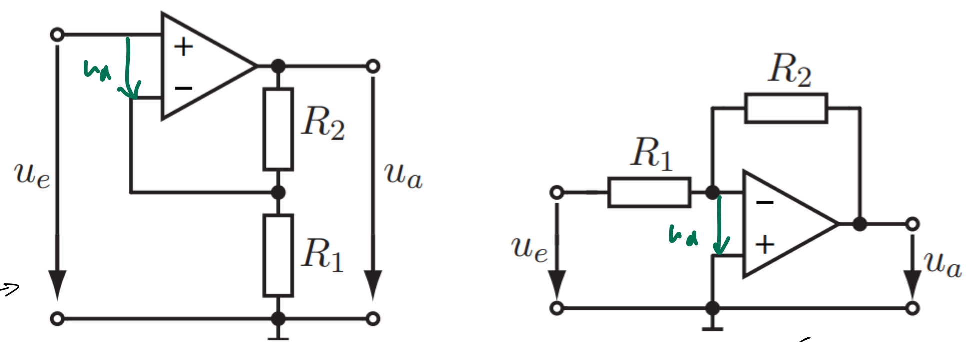
Subtraktionsschaltung

BEISPIELAUFGABE

Aufgabe 1 Operationsverstärkergrundschaltungen

1.1) Betrachtet wird ein idealer Operationsverstärker (OPV) mit Rückführung des Ausgangs an den negativen Eingang. Durch diese Verschaltung ergibt sich eine Ausgangsspannung u_a welche zu einer Spannungsdifferenz von $(u_\mathrm{p} - u_\mathrm{n} = 0)$, am positiven und negativen Eingang führt. Des Weiteren fliesst in die beiden Eingänge des idealen OPV kein Strom $(i_\mathrm{p} = i_\mathrm{n} = 0)$. Mit diesen Annahmen soll nun die Ausgangsspannung u_a als Funktion der Eingangsspannung u_e, des in Abbildung 1(a) gegebenen nicht-invertierenden und des in Abbildung 1(b) gegebenen invertierenden Verstärkers berechnet werden.

$$u_a = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_e$$



(a) (b)

$$u_a = -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_e$$

Abbildung 1: (a) Nichtinvertierender Verstärker, (b) invertierender Verstärker.

Beispielaufgabe

1.2) Ein realer Operationsverstärker weist eine endliche Verstärkung auf. Das in Abbildung 2 angegebene Ersatzschaltbild berücksichtigt diesen Effekt ($u_\mathrm{a} = A(u_\mathrm{p} - u_\mathrm{n})$). Die Eingänge sind weiterhin als stromfrei zu betrachten ($i_\mathrm{p} = i_\mathrm{n} = 0$). Berechnen Sie unter Verwendung des Ersatzschaltbildes aus Abbildung 2 die Ausgangsspannung u_a des in Abbildung 1(a) gegebenen nicht-invertierenden und des in 1(b) gegebenen invertierenden Verstärkers als Funktion der Eingangsspannung u_e.

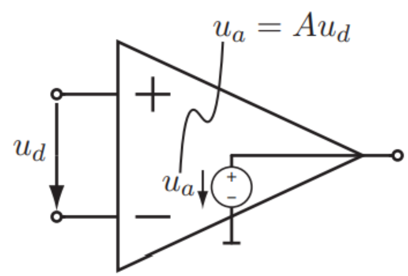


Abbildung 2: Einfaches Ersatzschaltbild eines realen Operationsverstärkers

1.3) Für sehr grosse Verstärkungen nähern sich die Ergebnisse aus 1.2) immer mehr den Ergebnissen aus 1.1) an. Bilden Sie den Grenzwert der Ergebnisse aus 1.2) für $A \to \infty$ und vergleichen Sie das Resultat mit dem Ergebnis aus 1.1).