

Prüfungsvorbereitungskurs Netzwerke und Schaltungen 2

4. Halbttag

Janick Matter

1 Vorwort

In diesem Dokument findet Ihr in Kürze die 'wichtigsten' Konzepte und Themen, welche ich für den Prüfungsvorbereitungskurs (PVK) des Faches "Netzwerke und Schaltungen 2" (Prof. J. Biela) im FS24 zusammengefasst habe. Das Dokument basiert auf den Vorlesungsunterlagen, den Slides der Übungsstunden, und dem Vorlesungsscript, von welchen die meisten Abbildungen stammen. Ausserdem basieren der ungefähre Ablauf, sowie die Auswahl einiger Beispielaufgaben auf dem PVK von Maximilian Stralz, welcher den PVK vergangenes Jahr gehalten hatte.

Da ich dieses Semester das erste Mal PVK in NuS2 halte, bin ich für gespotete Typos oder Anregungen und Verbesserungsvorschläge besonders dankbar. Die neuste Version des Skriptes (siehe 2) findet Ihr immer auf meiner Webseite n.ethz.ch/jamatter/ - oder via QR code unten.

Ich wünsche euch alles Gute für eure Prüfungen ;)

jamatter@student.ethz.ch



2 Überarbeitungen

- 6.6.2025: Initial version
- 18.6.2025:
 - Abschnitt 3.4: Typo korrigiert.

Contents

1	Vorwort	1
2	Überarbeitungen	2
3	Verstärkerschaltungen	4
3.1	Operationsverstärker OPV	4
3.2	Idealer OPV	5
3.3	Realer OPV	6
3.4	Gegen- und Mitkopplung	8
3.5	Nichtinvertierender Verstärker: $A(j\omega) > 0$	10
3.6	Invertierender Verstärker: $A(j\omega) < 0$	11
3.7	Integrator	12
3.8	Differenzierer	13

3 Verstärkerschaltungen

3.1 Operationsverstärker OPV

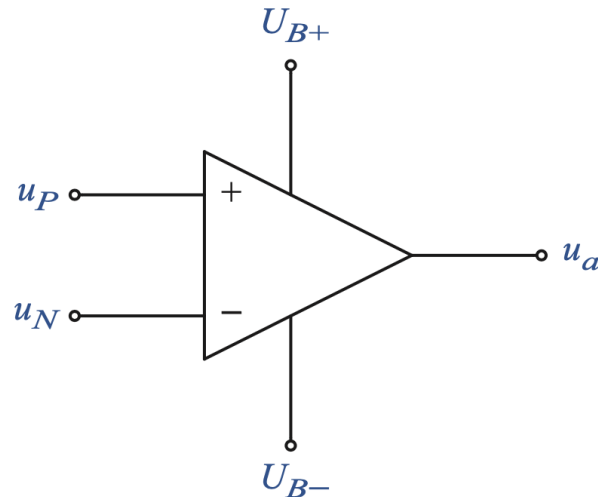


Figure 1: Links: Schaltbild eines OPV. Positiver Eingang u_p , negativer Eingang u_n , Betriebsanschlussspannungen U_{B+} bzw. U_{B-} , Ausgangssignal u_a .

Der OPV in Abbildung 1 verstärkt ein Eingangssignal u_{ed} linear wie folgt, wobei $v_g = A$ die Verstärkung angibt:

$$u_a = v_g(u_P - u_N) = A(u_P - u_N) = A \cdot u_{ed} \quad (1)$$

Die Verstärkung vom Spannung (oder Strömen) $v_g = A$ wird oft in dB angegeben:

$$A_{dB} = 20 \cdot \log_{10} |A| = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\hat{u}_a}{\hat{u}_{ed}} \right) \quad (2)$$

OPV werden in ideale und reale OPV unterschieden.

3.2 Idealer OPV

Bei idealen OPV im Open Loop können folgende Vereinfachungen getroffen werden (detailliertere Schaltbilder im Vorlesungsskript):

$$\begin{aligned}
 R_{in} &\rightarrow \infty \\
 R_{out} &\rightarrow 0 \quad \text{Ideale Spannungsquelle} \\
 i_{e+} &= i_{e-} = 0 \\
 A_{OL} = v_g &\rightarrow \infty \quad \text{Und Frequenzunabhängig(!)}
 \end{aligned} \tag{3}$$

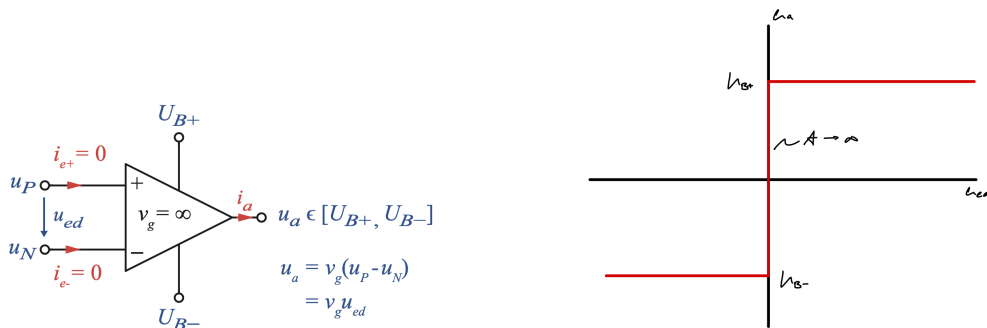


Figure 2: Links: Schaltbild eines idealen OPV. Rechts: Übertragungskennlinie eines idealen OPV im Open loop - also ohne Rückkopplung (unendliche Steigung der Kennlinie entspricht $A_{OL} \rightarrow \infty$). Die Ausgangsspannung u_a entspricht entweder U_{B-} oder U_{B+}

3.3 Realer OPV

Bei realen OPV können folgende Vereinfachungen getroffen werden (detailliertere Schaltbilder im Vorlesungsskript):

$$R_{in} < \infty$$

$$R_{out} > 0 \quad \text{Reale Spannungsquelle}$$

$$i_{e+} = i_{e-} \neq 0 \quad \text{aber vernachlässigbar} \quad (4)$$

$$A_{OL} = v_g < \infty \quad \text{Frequenzabhängig (TP)}$$

$$u_{ed} = u_P - u_N \neq 0 \quad \textbf{Kein} \text{ virtueller Kurzschluss bei Gegenkopplung}$$

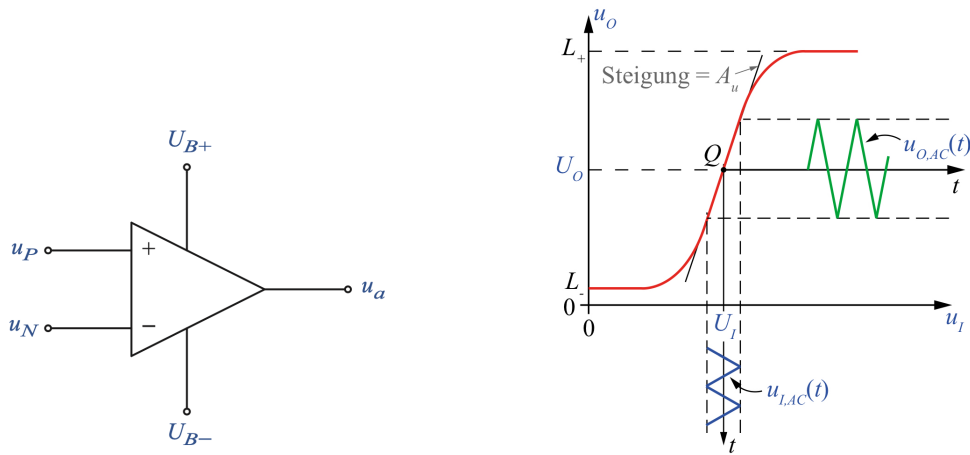


Figure 3: Links: Allgemeines Bild eines OPV. Rechts: Übertragungskennlinie eines realen OPV (mit teilweise nicht linearem Verhalten nahe der Sättigungsgrenzen). Steigung im linearen Teil entspricht der Verstärkung A des OPV. Der Punkt Q erreicht man durch eine Serienschaltung einer Spannungsquelle U_I mit dem OPV (Arbeitspunktverschiebung).

Ausserdem ist die Verstärkung von realen OPV frequenzabhängig, und verhältet sich wie ein Tiefpass:

$$\begin{aligned} A &= v_g = \frac{v_{g0}}{1 + \frac{j\omega}{\omega_b}} \\ f_b &= \frac{\omega_b}{2\pi} \\ f_T &= v_{g0} \cdot f_b \\ |v_g(j\omega_T)| &= 1 \end{aligned} \quad (5)$$

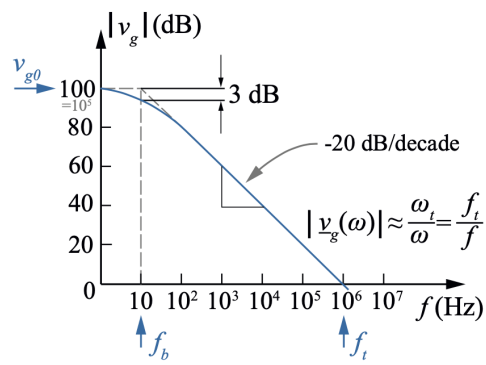
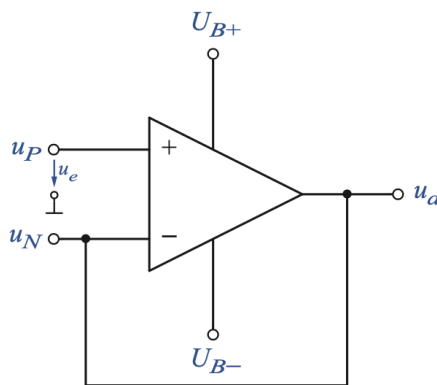


Figure 4: Frequenzabhängige Verstärkung (Tiefpass) von realen OPV.

3.4 Gegen- und Mitkopplung

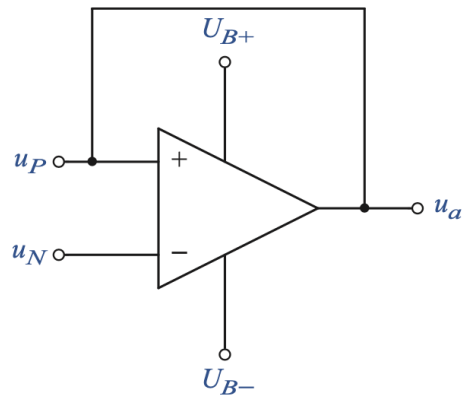
Gegenkopplung:

- Ausgang wird auf **negativen** Eingang zurückgeführt
- Stabilisiert bis $u_P - u_N \approx 0$



Mitkopplung:

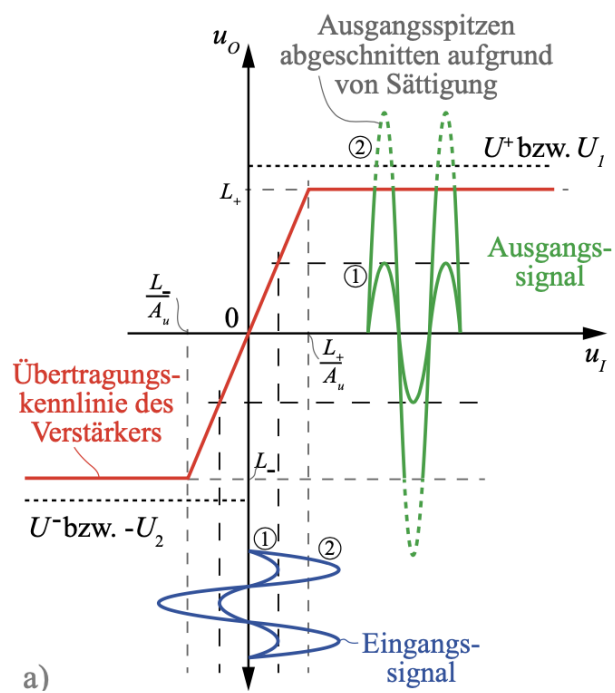
- Ausgang wird auf **positiven** Eingang zurückgeführt
- OPV steuert aus $\rightarrow u_a = \pm U_B$



Wird nun ein idealer OPV (mit unendlich grosser, frequenzunabhängiger Verstärkung $A \rightarrow \infty$) gegengekoppelt, ergibt sich folgende wichtige Eigenschaft:

$$\begin{aligned}
 u_a &= A \cdot (u_p - u_n) \\
 \Rightarrow \frac{u_a}{A} &= u_p - u_n \\
 \Rightarrow \lim_{A \rightarrow \infty} (u_p - u_n) &= \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{u_a}{A} = 0 \\
 \Rightarrow u_p &\approx u_n \quad (\text{virtueller Kurzschluss})
 \end{aligned}$$

Im Allgemeinen eignet sich also nur die Gegenkopplung zur gezielten Verstärkung von Signalen. Es stellt sich eine endliche Verstärkung der rückgekoppelten Schaltung ein, die mittels Widerständen in der Rückkopplung exakt gesteuert werden kann (folgende Abschnitte). Die Übertragungskennlinie eines idealen OPV (nicht invertierende Verstärkung, also positives A) ist in der folgenden Abbildung gegeben.



((a)) Übertragungskennlinie eines idealen rückgekoppelten OPV mit teilweise clipping. Die Steigung des linearen Teils entspricht der Verstärkung A des OPV.

3.5 Nichtinvertierender Verstärker: $A(j\omega) > 0$

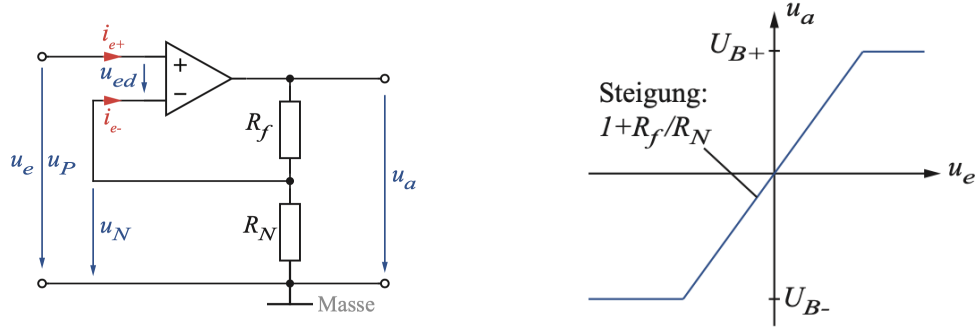


Figure 6: Links: Schaltbild eines nicht-invertierenden OPV. Rechts: Übertragungskennlinie eines nicht-invertierenden OPV. Steigung im linearen Teil entspricht der Verstärkung A des OPV.

Ideal:

$$u_P = u_N$$

$$u_e = u_a \cdot \frac{R_N}{R_N + R_f}$$

$$u_a = u_e \cdot \frac{R_N + R_f}{R_N} = u_e \cdot \left(1 + \frac{R_f}{R_N}\right) \quad (6)$$

Real:

$$u_N = u_a \frac{R_N}{R_N + R_f}$$

$$u_e = A \cdot (u_P - u_N) = A \cdot \left(u_e - u_a \frac{R_N}{R_N + R_f}\right)$$

$$u_a = u_e \cdot \frac{A(j\omega)}{1 + A(j\omega) \frac{R_N}{R_N + R_f}} \quad (7)$$

3.6 Invertierender Verstärker: $A(j\omega) < 0$

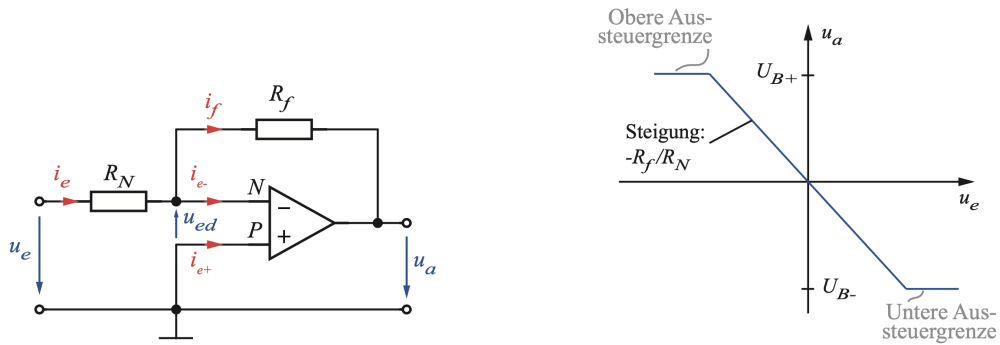


Figure 7: Links: Schaltbild eines invertierenden OPV. Rechts: Übertragungskennlinie eines invertierenden OPV. Steigung im linearen Teil entspricht der Verstärkung A des OPV.

Ideal:

$$\begin{aligned} i_e &= \frac{u_e}{R_N} = i_f = -\frac{u_a}{R_f} \\ u_a &= -\frac{R_f}{R_N} u_e \end{aligned} \quad (8)$$

Real:

$$\begin{aligned} i_e &= \frac{u_e - u_a}{R_N + R_f} \\ u_N &= u_e - i_e R_N \\ u_a &= -\frac{R_f}{\frac{R_N + R_f}{A(j\omega)} + R_N} u_e \end{aligned} \quad (9)$$

3.7 Integrator

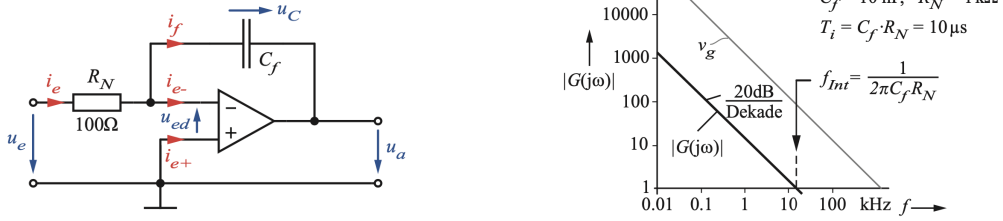


Figure 8: Links: Schaltbild eines Integrators. Rechts: Frequenzgang des eines Integrators.

Die Ausgangsspannung ergibt sich aus der Maschengleichung und dem Zeitverhalten für Ströme durch Kapazitäten:

$$\begin{aligned}
 i_e &= \frac{u_e}{R_N} = i_f = C \cdot \frac{du_C}{dt} \\
 -u_a - u_C &= 0 \\
 \Leftrightarrow u_a &= -u_{C0} - \frac{1}{R_N C_f} \int_0^t u_e(t) dt
 \end{aligned} \tag{10}$$

Die Verstärkung ergibt sich wie folgt:

$$A(j\omega) = -\frac{Z_f}{Z_N} = -\frac{1}{j\omega C R} \tag{11}$$

3.8 Differenzierer

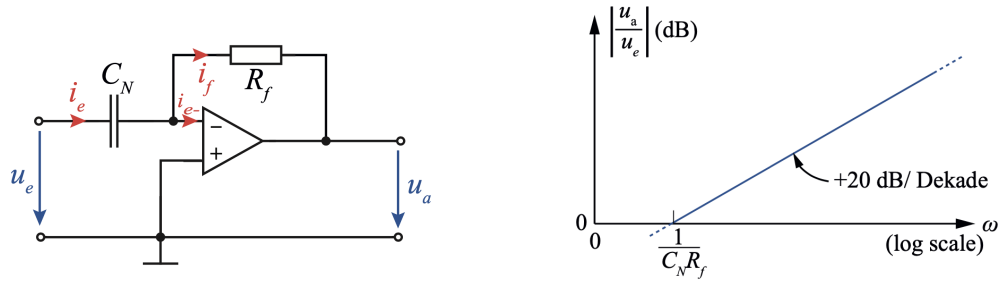


Figure 9: Links: Schaltbild eines Differenzierers. Rechts: Frequenzgang des eines Differenzierers.

Die Ausgangsspannung ergibt sich aus der Maschengleichung und dem Zeitverhalten für Ströme durch Kapazitäten:

$$\begin{aligned}
 i_e &= C \frac{du_e}{dt} = i_f \\
 -u_a - u_{Rf} &= 0 \\
 \Leftrightarrow u_a &= -R_f \cdot C_N \cdot \frac{du_e}{dt}
 \end{aligned} \tag{12}$$

Die Verstärkung ergibt sich wie folgt:

$$A(j\omega) = -\frac{Z_f}{Z_N} = -j\omega CR \tag{13}$$