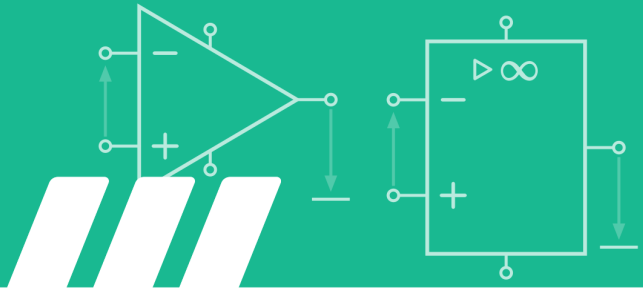
GET it digital

Modul 10: Operationsverstärker



Stand: 10. März 2026

Lizenz

Weiternutzung als OER ausdrücklich erlaubt: Dieses Werk und dessen Inhalte sind lizenziert unter CC BY 4.0. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. Nennung gemäß TULLU-Regel bitte wie folgt: „GET it digital Modul 10: Operationsverstärker“ von J. Brodmann, D. Thiem, M. Kaminski, K. Siebert Lizenz: CC BY 4.0.

Der Lizenzvertrag ist hier abrufbar:
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de
Das Werk ist online verfügbar unter:
https://getitdigital.uni-wuppertal.de/module/modul-10-operationsverstaerker

Lernziele: Operationsverstärker

Die Studierenden können

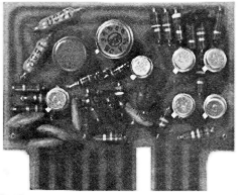
- den Aufbau eines einfachen Operationsverstärkers angeben.
- das Funktionsprinzip eines Operationsverstärkers erläutern.
- verschiedene Operationsverstärkerschaltungen und mögliche Einsatzgebiete nennen.
- Unterschiede zwischen dem vereinfachten Operationsverstärkermodell und realen Operationsverstärkern beschreiben und wichtige Bereiche der Operationsverstärkerkennlinie angeben.
- die Funktion von vorliegenden Operationsverstärkerschaltungen bestimmen und mithilfe der Kirchhoff'schen Gesetze die Verstärkung berechnen.

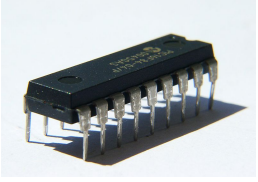
Lernziele: Operationsverstärker

Die Studierenden können

- geeignete Operationsverstärkerschaltungen für eine Problemlösung angegeben, Widerstandsverhältnisse berechnen und die Schaltung aufzeichnen.
- wichtige Eigenschaften von Operationsverstärkerschaltungen benennen.
- Stabilitätsanalysen durchführen und Ergebnisse der Analyse beurteilen.
- auf Grundlage von Datenblättern Vor- und Nachteile von Operationsverstärkern für bestimmte Einsatzzwecke benennen und geeignete Komponenten für vorliegende Problemstellungen auswählen.

Historie und Aufbau





- Mehrstufige Transistorverstärker können genutzt werden, um Signale zu verstärken (siehe Kap. Halbleiter).
- Nach diesem Prinzip entworfene Schaltungen wurden bis zur Entwicklung der integrierten Schaltkreise (IC) diskret als Universalverstärker aufgebaut.
- Heute werden Universalverstärker monolithisch aufgebaut. Ihr Verhalten für den gewünschten Einsatzzweck wird maßgeblich durch die äußere Beschaltung bestimmt.
- Sie werden in der Regel aufgrund ihres ursprünglichen Einsatzes in Analogrechnern als „Operationsverstärker“ bezeichnet.

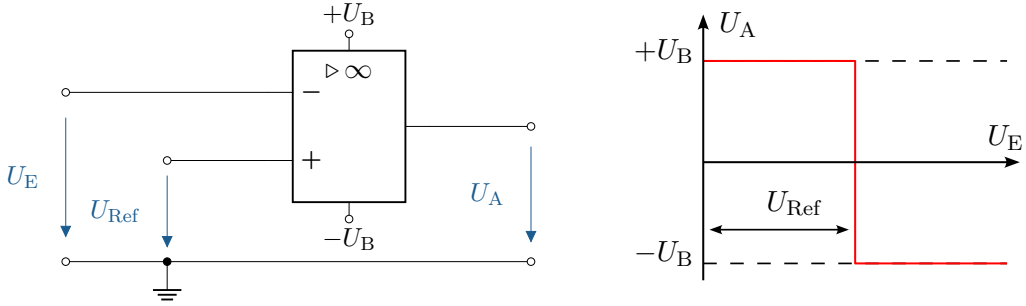
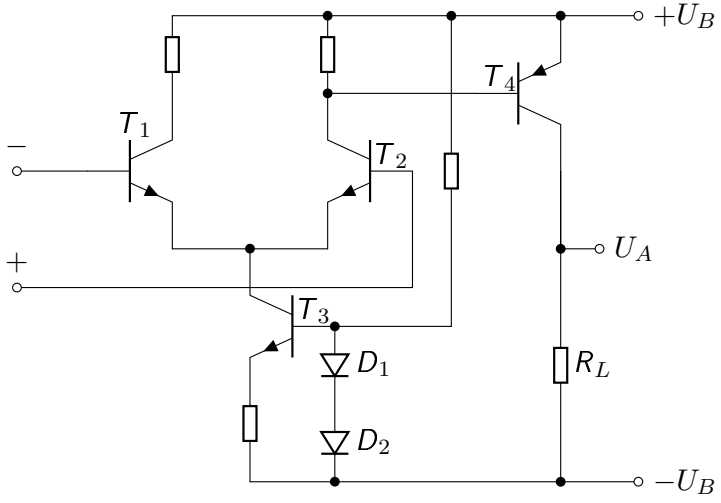


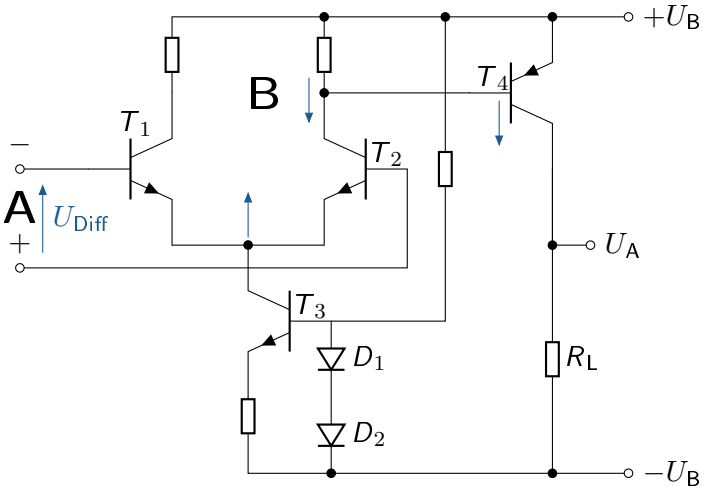
Abbildung: **Operarationsverstärker als Komparator.** Links: Grundlegender Schaltkreis eines Komparators. Rechts: Resultierende Ausgangsspannung in Abhängigkeit zu der Eingangsspannung und Referenzspannung.

Funktionsweise von Operationsverstärkern

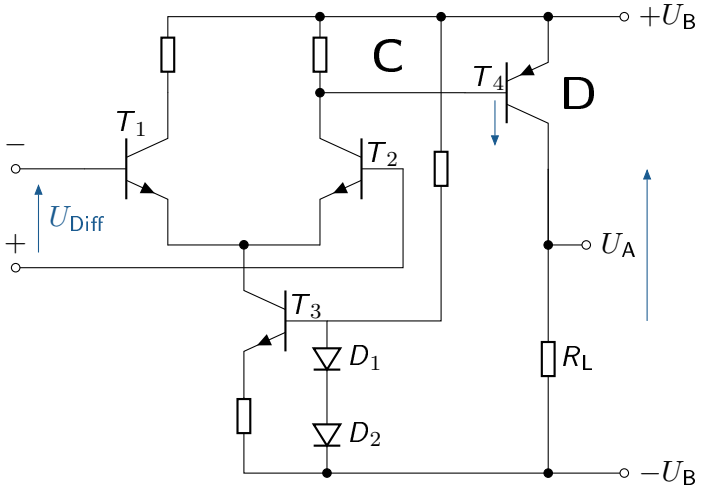
Die Funktionsweise lässt sich gut an folgender Schaltung nachvollziehen. Was passiert, wenn an dieser Schaltung eine positive Differenzspannung angelegt wird?



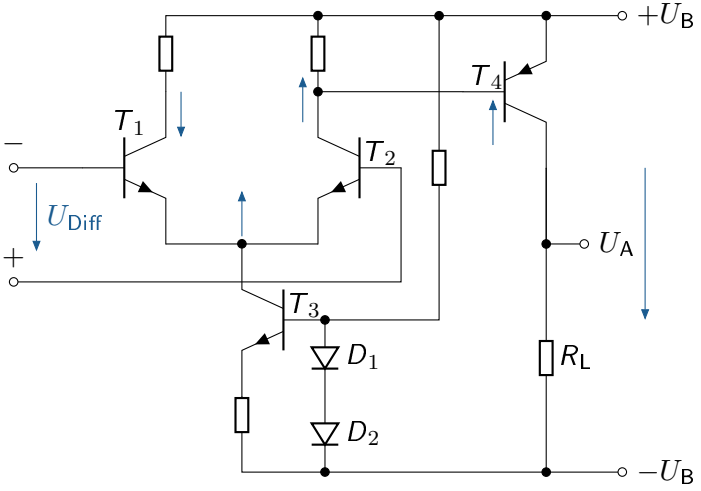
Funktionsweise von Operationsverstärkern



Eine positive Differenzspannung (A) führt zu einer Reduktion des Widerstands von T_2, was zu einer Spannungsreduktion an dessen Kollektor und einem Anstieg am Emitter führt (B). T_3 fungiert als Stromquelle.

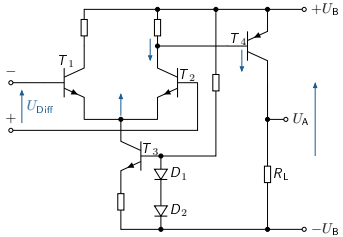


Durch die Spannungserhöhung an der Basis von T_4 (C) führt der Kollektor-Emitter-Pfad von T_4 mehr Strom (D), was zu einem erhöhten Spannungsabfall am Lastwiderstand R_L und somit zu einer höheren Ausgangsspannung U_A führt.

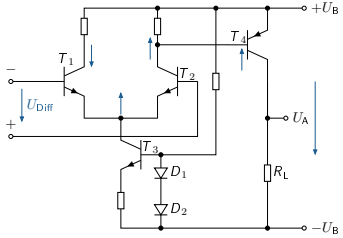


Eine höhere invertierte Eingangsspannung hingegen verringert den Widerstand im Kollektor-Emitter-Pfad von T_1. Der dadurch erhöhte Widerstand von T_4 verringert den Stromfluss durch R_L, wodurch die Spannung U_A ebenfalls sinkt.

Wichtige Eigenschaften des idealen Verstärkers



Verstärker bei positiver Differenzspannung

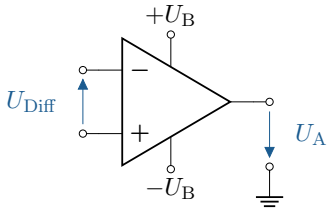


Verstärker bei negativer Differenzspannung

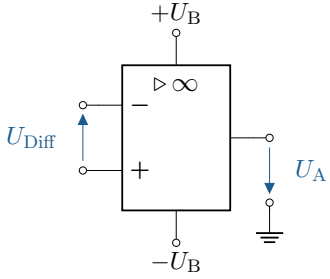
In dieser Schaltung sind bereits einige wichtige Eigenschaften des reellen Operationsverstärkers ablesbar:

- Die Eingangsseitige Stromaufnahme des Verstärkers ist abhängig von den Transistoren T_1 und T_2.
- Die Verstärkung ist durch die Versorgungsspannung nach oben und unten begrenzt.
- Der verfügbare Ausgangsstrom ist durch die Quelle und den Transistor T_4 vorgegeben.

Modellierung und charakteristische Größen



altes Schaltzeichen



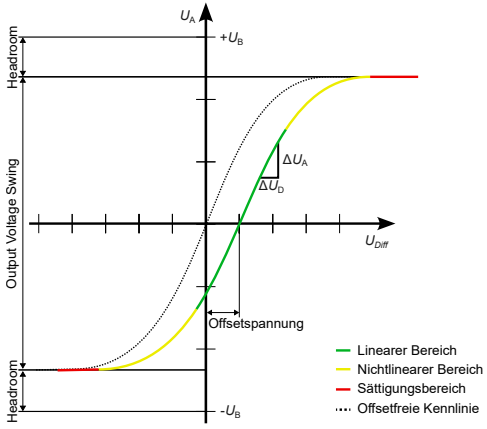
neues Schaltzeichen

- In Schaltungen wird der Operationsverstärker durch eines der beiden links abgebildeten Symbole dargestellt.
- Der Operationsverstärker lässt sich so durch ein sogenanntes Zweitor modellieren.
- Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass vereinfacht davon ausgegangen werden darf, dass das Übertragungsverhalten vollständig durch die Größen Strom- und Spannung beschrieben werden kann.
- Durch diese Vereinfachung kann der interne Aufbau des Operationsverstärkers vernachlässigt und als „Black-Box“ betrachtet werden.

Charakteristische Werte

Bezeichnung	Ideale OPV-Eigenschaften	Typische Werte (z.B. OPA 121)
Leerlaufverstärkung	$V_{\text{Leer}} = \infty$	$V_{\text{Leer}} = 10^6$
Eingangsimpedanz	$Z_{\text{i}} = \infty\,\Omega$	$Z_i = 10^{13}\,\Omega$
Ausgangsimpedanz	$Z_{\text{a}} = 0\,\Omega$	$Z_{\text{a}} = 50$ bis $100\,\Omega$
Bandbreite	$B = \infty\,\text{MHz}$	$B > 2\,\text{MHz}$
Phasenverschiebung	$\varphi = 0°$	$\varphi > 0°$
Slew Rate	∞	$2\,\text{mV}$ bis $1000\,\text{V}/\mu s$
Ausgangs-Aussteuerbarkeit	∞	Rail-to-Rail
Eingangsruhestrom	$I_{\text{Ruhe}} = 0\,\text{pA}$	$I_{\text{Ruhe}} < 5\,\text{pA}$
Eingangsoffsetstrom	$I_{\text{Off}} = 0\,\text{pA}$	$I_{\text{Off}} < I_+ - I_-$
Eingangs-Offsetspannung	$U_{\text{Off}} = 0\,\text{mV}$	$U_{\text{Off}} < 2\,\text{mV}$
Gleichtakt-unterdrückung	$CMR = \infty\,\text{dB}$	$CMR = 86\,\text{dB}$

Allgemeine Kennlinie eines Operationsverstärkers

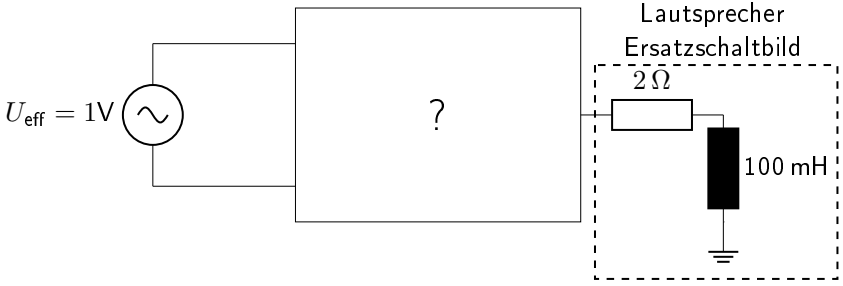


Kennlinie eines Operationsverstärkers

- U_{Off} ist die Offset-Spannung, die zu einer horizontalen Verschiebung der Kennlinie führt.
- Im spezifizierten Ausgangsspannungsbereich ist die Verstärkung linear.
- Der Ausgangsspannungsbereich wird im Datenblatt durch die größe „Output Voltage Swing angegeben“.

Prinzip der Gegenkopplung

Es soll ein Leistungsverstärker aufgebaut werden, der geeignet ist, das Signal eines Handys so zu verstärken, dass ein Lautsprecher damit betrieben werden kann. Das Eingangsspannungsniveau ist 1 V und es soll ein 4 Ω Lautsprecher betrieben werden. Wie groß muss die Spannung am Ausgang des Verstärkers sein, damit der Lautsprecher bei 1 kHz 25 W aufnimmt. Wie kann hier vorgegangen werden, wenn eine Operationsverstärkerschaltung für die Lösung genutzt werden soll?



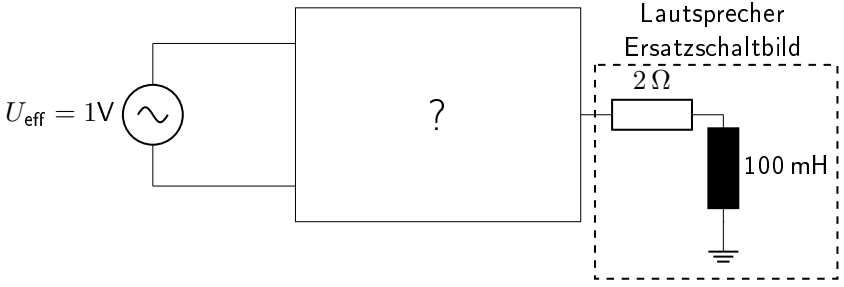
.

Lösung

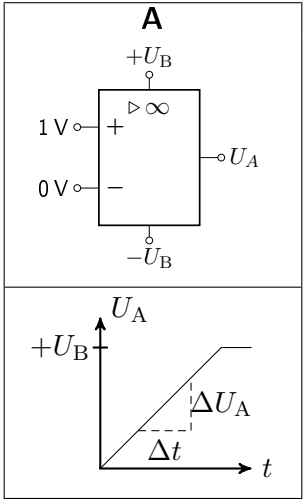
Zunächst muss dazu die Spannung berechnet werden, die am Ausgang des Verstärkers anliegen soll.

$$U_{\mathrm{A}} = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{25\,\mathrm{W} \cdot 4\,\Omega} = 10\,\mathrm{V}$$

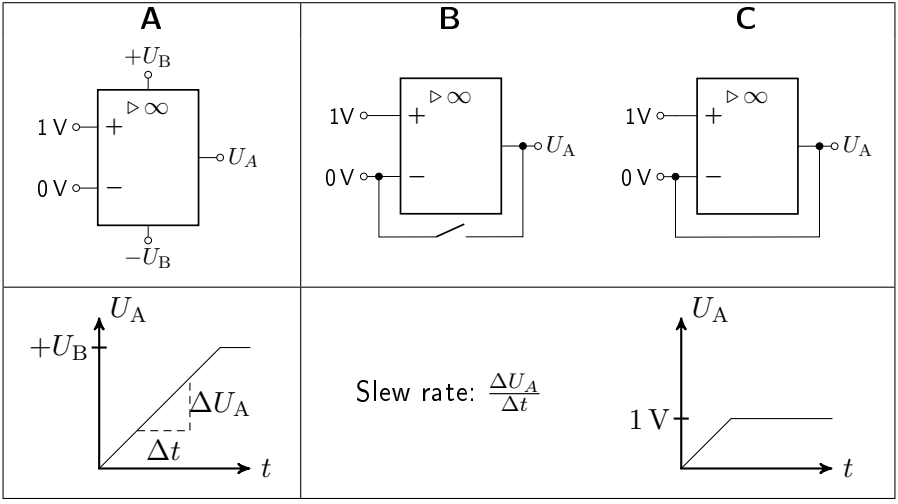
Wie kann nun mithilfe eines Operationsverstärkers der mit einem „?“ gekennzeichneten Teil der Schaltung ersetzt werden, um eine notwendige Verstärkung von 5 zu erreichen.



Prinzip der Gegenkopplung - Lösung des Beispielproblems (2)



Prinzip der Gegenkopplung - Lösung des Beispielproblems (2)



Prinzip der Gegenkopplung - Lösung des Beispielproblems (2)

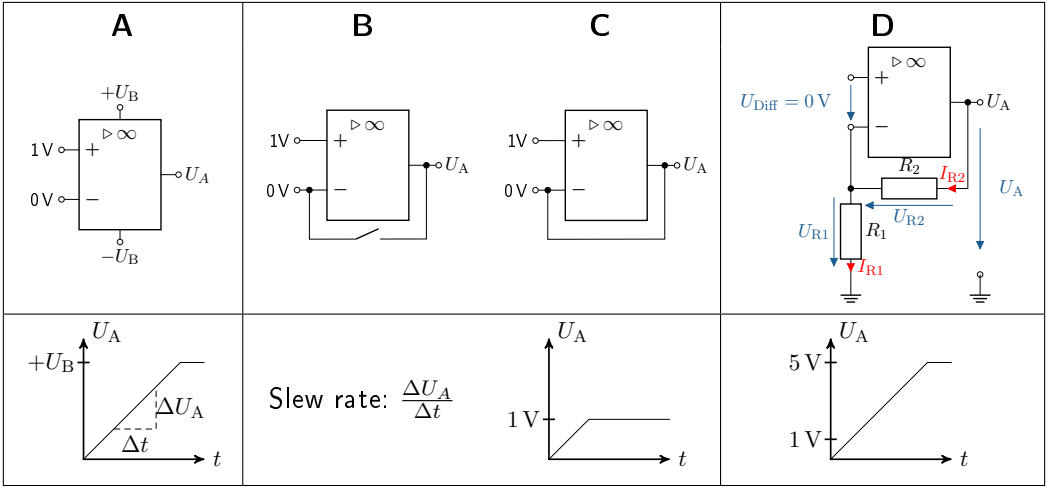
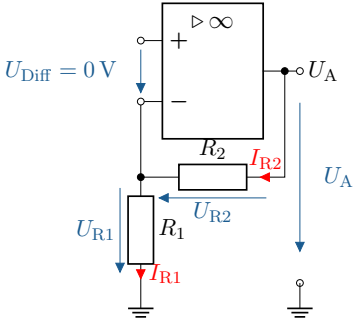


Abbildung: Verschaltung eines Verstärkers als Komparator (A), Impedanzwandler (C) und nicht-invertierender Verstärker (D)

Prinzip der Gegenkopplung - Lösung des Beispielproblems (3)



Finale Verstärkerschaltung mit Rückführung

Annahme: $U_{\mathrm{Diff}} = 0$

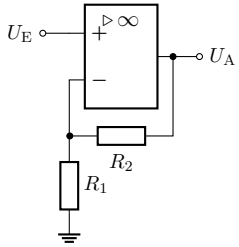
$$U_{\mathrm{A}} = U_{\mathrm{R1}} + U_{\mathrm{R2}} = U_{\mathrm{E}} + I_{\mathrm{R2}} \cdot R_2$$

$$U_{\mathrm{A}} = U_{\mathrm{E}} + \frac{U_{\mathrm{E}}}{R_1} \cdot R_2$$

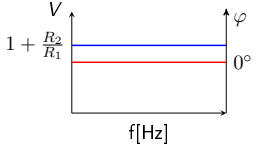
$$\frac{U_{\mathrm{A}}}{U_{\mathrm{E}}} = \underbrace{(1 + \frac{R_2}{R_1})}_{V_{Gain}}$$

Weitere OPV-Grundschaltungen sind Skript zu finden.

Nichtinvertierender Verstärker



(a) Schaltung eines nichtinvertierenden Verstärkers



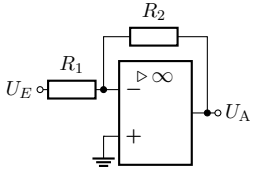
(b) Frequenzgang eines nichtinvertierenden Verstärkers

- Gleichung:

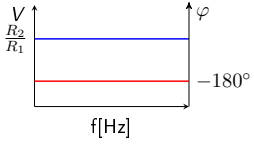
$$U_A = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_E$$

- Phasengleiches Ausgangssignal
- Sehr hochohmiger Eingangswiderstand
- Niederohmiger Ausgangswiderstand
- Anwendungen: z.B. Impedanzwandler

Invertierender Verstärker



(a) Schaltung eines invertierenden Verstärkers



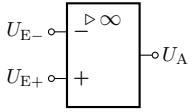
(b) Frequenzgang eines invertierenden Verstärkers

- Gleichung:

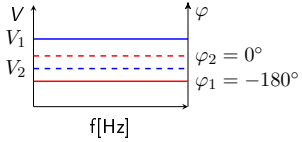
$$U_A = \frac{R_2}{R_1} U_E$$

- -180° Phasenverschiebung zwischen Ein- zu Ausgang
- R_1 bestimmt den Eingangswiderstand
- Niederohmiger Ausgangswiderstand
- Anwendungen: z.B. Aktiver Spannungsteiler zum Messen hoher Spannungen, wenn $R_1 > R_2$

Komparator



(a) Schaltung eines Komparators



(b) Frequenzgang eines Komparators

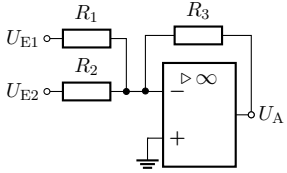
- Gleichung:

$$V_1 : U_{E+} > U_{E-} \Rightarrow U_A \approx +U_B$$

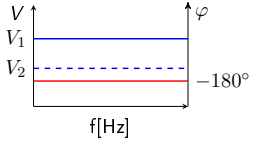
$$V_2 : U_{E+} < U_{E-} \Rightarrow U_A \approx -U_B$$

- Einsatz in Zweipunktreglern und Analog-Digital-Wandlern

Summierer



(a) Schaltung eines Summierers



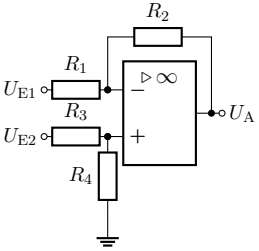
(b) Frequenzgang eines Summierers

- Gleichung:

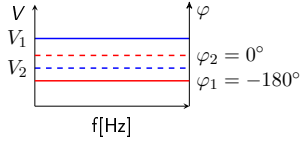
$$U_A = \underbrace{\frac{R_3}{R_1}}_{V_1} \cdot U_{E1} + \underbrace{\frac{R_3}{R_2}}_{V_2} \cdot U_{E2}$$

- Der Summierer basiert auf dem invertierenden Verstärker und findet Verwendung in Analogrechnern und beim Mischen von Spannungssignalen

Subtrahierer



(a) Schaltung eines Subtrahierers

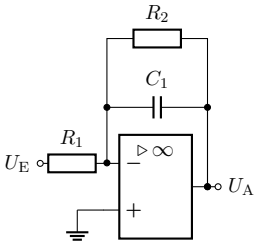


(b) Frequenzgang eines Subtrahierers

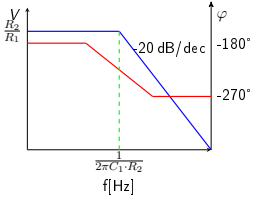
- Gleichung:

$$U_A = U_{E2} \cdot \underbrace{\frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}}_{V_2} - U_{E1} \cdot \underbrace{\frac{R_2}{R_1}}_{V_1}$$

- Wenn alle Widerstände gleich groß sind, wird die Differenz der Signale U_{E1} und U_{E2} gebildet, weswegen diese Schaltung als Differenzverstärker bezeichnet wird



(a) Schaltung eines Integrierers



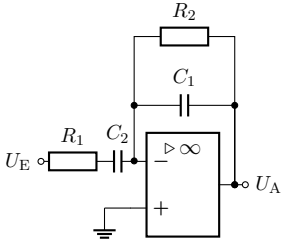
(b) Frequenzgang eines Integrierers

- Gleichung:

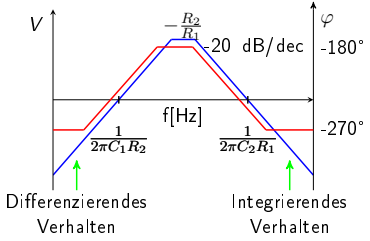
$$U_A(t) = -\frac{R_2}{R_1} U_E(t) - \int_0^t \frac{U_E(t)}{R_1 C_1}\, dt$$

- Nimmt eine Integration des Eingangssignals vor
- Wird als aktives Tiefpassfilter verwendet

Differenzierer



(a) Schaltung eines Differenzierers



(b) Frequenzgang eines

- Gleichung:

$$U_A(t) = -\frac{R_2}{R_1} U_E(t) - \int_0^t \frac{1}{R_1 C_1} U_E(\tau)\, d\tau - R_2 C_2 \frac{dU_E}{dt}(t)$$

- Nimmt eine Differenziation des Eingangssignals vor
- Wird als aktives Hochpassfilter verwendet (zeigt in der Realität meist Bandpassverhalten, wie hier dargestellt)

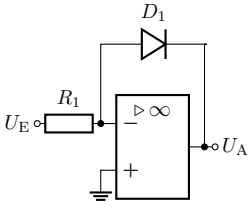


Abbildung: Schaltung eines Logarithmierers

- Gleichung:

$$U_A = -U_T \cdot \ln\left(\frac{U_E}{R_1 \cdot I_S}\right)$$

$$U_T = \frac{k_B \cdot T}{e}$$

e = Elementarladung
k_B = Boltzmannkonstante
I_s = Sperrstrom der Diode

- Bildet den natürlichen Logarithmus des Eingangssignals

Potenzierer

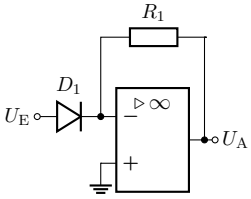


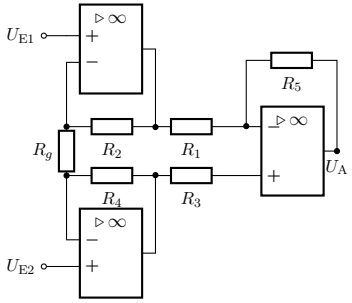
Abbildung: Schaltung eines Potenzierers

- Gleichung:

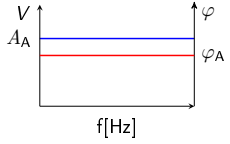
$$U_A = -R_1 \cdot I_S \cdot e^{\frac{U_E}{U_T}}$$

- Besitzt einen e-funktionalen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsspannung

Instrumentenverstärker



(a) Schaltung eines Instrumentenverstärkers



(b) Frequenzgang eines Instrumentenverstärkers

- Gleichung:

a_i : Amplitude Eingangsspannung i

φ_i : Phase Eingangsspannung i

$$A_A = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

$$\tan(\varphi_A) = \frac{a_1\sin(\varphi_1) + a_2\sin(\varphi_2)}{a_1\cos(\varphi_1) + a_2\cos(\varphi_2)}$$

Wenn : $R_2 = R_4 = R$

$$U_A = (1 + \frac{2R}{R_g}) \cdot \frac{R_3}{R_2}(U_{E2} - U_{E1})$$

- Differenzverstärker mit hoher Eingangsimpedanz und hoher Gleichtaktunterdrückung

Impedanzwandler

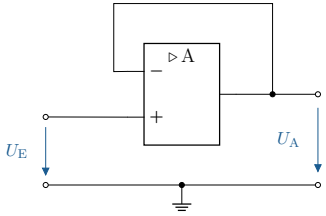


Abbildung: Schaltung eines Impedanzwandlers

- Ausgangsspannung U_A folgt der Eingangsspannung U_E
- Verstärkung $V = \frac{U_A}{U_E} = 1$
- Auch Spannungsfolger genannt
- Hoher Eingangswiderstand durch Operationsverstärker
- Typische Anwendung: Sensoren

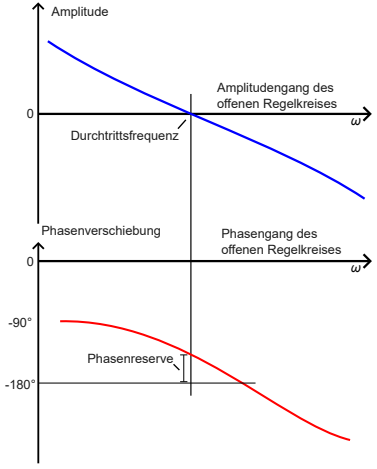
Stabilität des Operationsverstärker-Regelkreises

Durch die Rückführung des Ausgangssignal ergibt sich ein Regelkreis. Dieser muss auf Stabilität überprüft werden. Dazu werden 3 Methoden vorgstellt:

- Die Frequengangzanalyse auf Grundlage des Bodediagramms
- Die Untersuchung der Übertragungsfunktion auf ihre Pollagen
- Die Analyse des Einschwingverhaltens

Frequenzgangsanalyse (experimentell/simulativ)

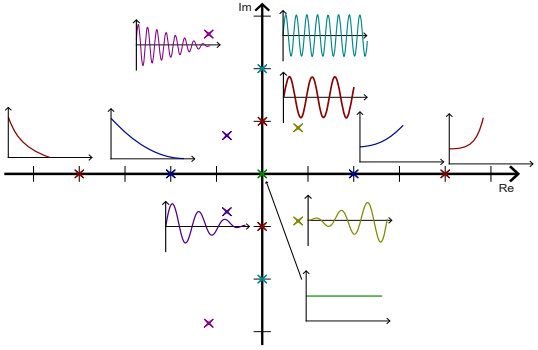
Bei dieser Methode wird das Bodediagramm im relevanten Frequenzbereich betrachtet.



Auf dieser Grundlage wird die Phasenlage am 0 dB-Durchtrittspunkt der Amplitude bestimmt. Besteht ein geringer Abstand zu -180° ist das System instabil.

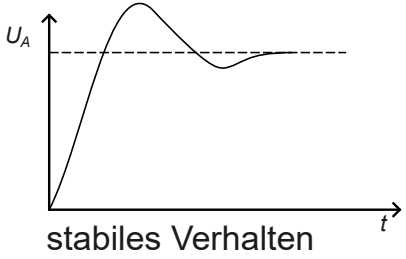
Analyse der Übertragungsfunktion (analytisch)

Bei dieser Methode wird werden die Polstellen der Übertragunsfunktion bestimmt.
Unten ist dargestellt, welches

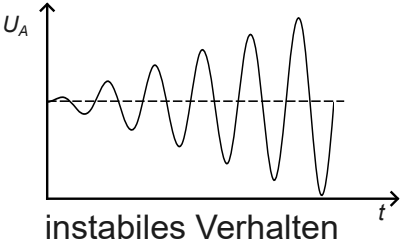


Analyse des Einschwingverhaltens (experimentell/simulativ)

Bei dieser Methode wird die Schaltung mit einem Eingangssignal angeregt und das Ausgangsverhalten beobachtet.



stabiles Verhalten



instabiles Verhalten

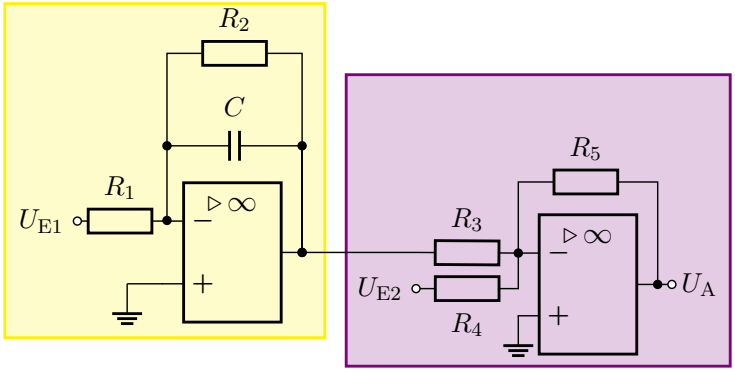
Es soll eine Schaltung entworfen werden, die folgende Funktion umsetzt:

$$U_{\mathsf{A}} = \int U_{\mathsf{E1}}\, dt + x \cdot U_{\mathsf{E1}} - 2 \cdot U_{\mathsf{E2}}$$

Wie kann das erreicht werden? Überlegen Sie sich zunächst, welche Grundschaltungen hierfür zu kombinieren sind.

Lösungsschritt 1: Verstärkerschaltung

Zunächst muss die obere Gleichung in zwei Teilprobleme zerlegt werden, die mithilfe von Operationsverstärkerschaltungen gelöst werden können. Das erste Teilproblem bildet die Integration des Eingangssignals U_{E1}. Dazu soll zunächst eine Integratorschaltung verwendet werden. Das zweite Teilproblem bildet die Addition der Signale. Dafür kann ein Summierer verwendet werden.



Durch eine Kombination von einer Integratorschaltung und einem Summierer ist also das gewünschte Verhalten zu erreichen. Ist es mit dieser Schaltung möglich x=0 zu

$$U_{\mathsf{A}} = \underbrace{\left[-\frac{1}{R_1 C} \int_0^t U_{\mathsf{E1}}\, dt - \frac{R_2}{R_1} \cdot U_{\mathsf{E1}} \right]}_{Formel\ des\ Integrators} \cdot \underbrace{\left(-\frac{R_5}{R_3} \right) - \frac{R_5}{R_4} \cdot U_{\mathsf{E2}}}_{Formel\ des\ Summierers}$$

Dies kann nun wie folgt umgeformt werden

$$U_{\mathsf{A}} = \underbrace{\frac{R_5}{R_1 R_3 C}}_{\stackrel{!}{=}1} \int_0^t U_{\mathsf{E1}}\, dt + \underbrace{\frac{R_2 R_5}{R_1 R_3}}_{\stackrel{!}{=}x} \cdot U_{\mathsf{E1}} - \underbrace{\frac{R_5}{R_4}}_{\stackrel{!}{=}2} \cdot U_{\mathsf{E2}}$$

Wie der Formel zu entnehmen ist, müssen nun die Bauteilwerte nur noch so gewählt werden, dass sich die richtigen Vorfaktoren ergeben. Eine Wahl von x=0 ist nur möglich, wenn der Widerstand R_2 weggelassen wird.