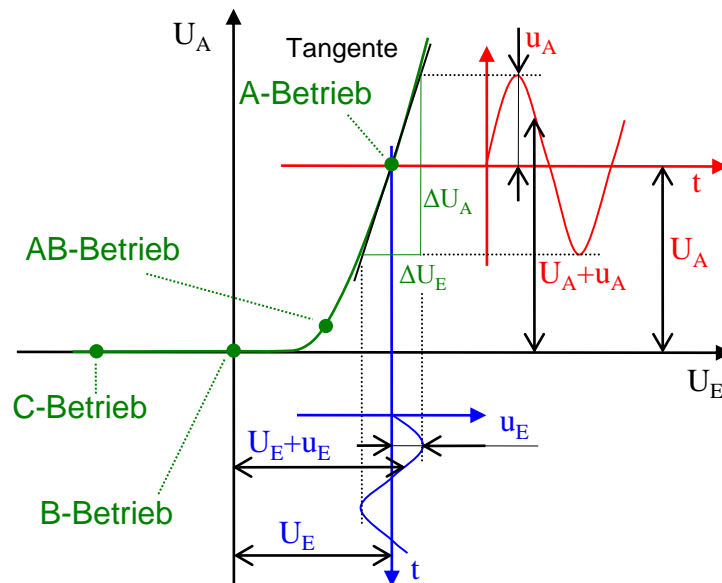


3. Analoge Schaltungstechnik

3.1 Einteilung von Verstärkerschaltungen

Ein Verstärker (Röhren, heute Halbleiterbauelementen) hat immer eine nichtlineare Kennlinie. → mehrere Betriebsweisen



A-Betrieb

(Kleinsignalverstärker)

B-Betrieb

AB-Betrieb

(für Transistortechnik)

C-Betrieb

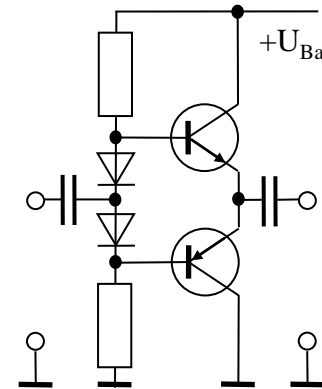
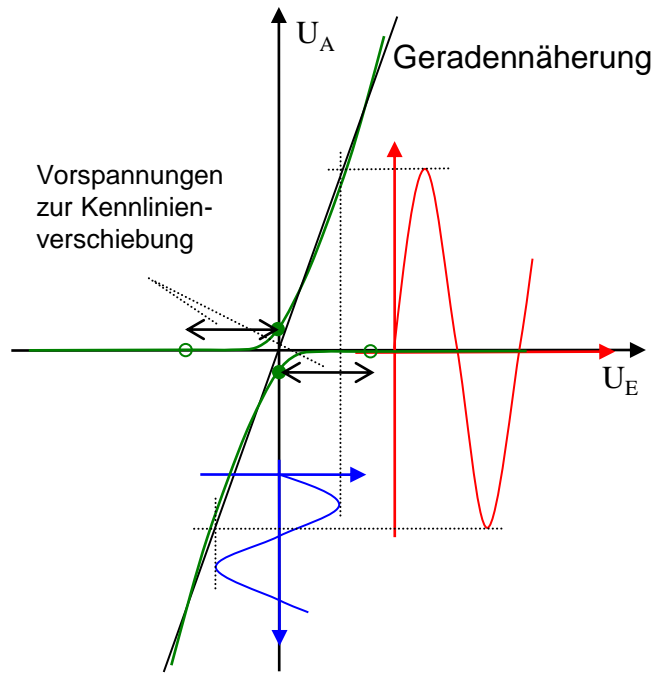
(Impulsverstärker)

D-Betrieb

(Zerhackerverstärker)

A-, AB- oder B-Verstärker → keine Gleichsignale deshalb D-Betrieb

AB-Gegentaktbetrieb hat sich für Endstufen durchgesetzt



Ein Paar **komplementäre Transistoren** (NPN und PNP mit ausgesuchten spiegelgleichen Kennlinien) durch Dioden **Arbeitspunktverschiebung**

Anforderungen an Verstärker ergeben sich z.B. aus:

- dem Signalpegel (z.B. Spannungsbereich, Klein-, Großsignal...)
- dem notwendigen Eingangswiderstand,
- der Signalfrequenz und der Signalbandbreite,
- dem geforderten Ausgangswiderstand,
- der geforderten Verstärkung und Ausgangsleistung.

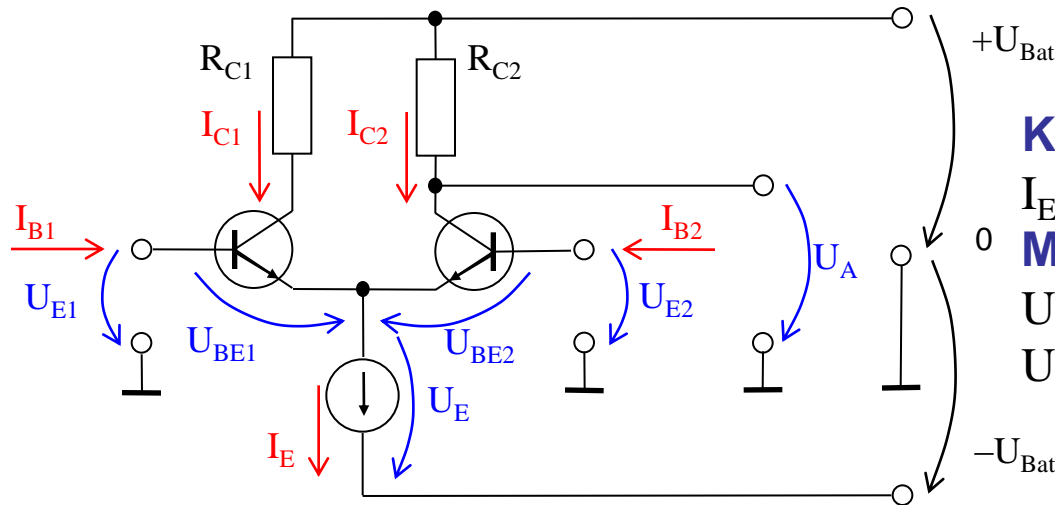
Danach haben sich z.B. folgende Grundtypen herausgestellt:

- Audioverstärker (NF-Verstärker angepasst an Audiosignale),
- Videoverstärker (Breitbandverstärker angepasst an Videosignale),
- HF-Verstärker (für unterschiedliche Einsatzfälle bei hohen Frequenzen),
- ZF-Verstärker (selektive HF-Verstärker für verschiedene Zwischenfrequenzen),
- Gleichspannungsverstärker (für Signale von 0 Hz bis ...) usw.

Am universellsten hat sich dabei der **Operationsverstärker** als integrierter Baustein erwiesen.

3.2 Operationsverstärkertechnik

Ausgangspunkt der Entwicklung des Operationsverstärkers war die **Forderung der Regelungstechnik, Gleichsignale** zu verstärken. Das ermöglichte der **Differenzverstärker**.



Knotenpunktsatz

$$I_E = I_{B1} + I_{C1} + I_{B2} + I_{C2} = \text{const}$$

Maschensätze :

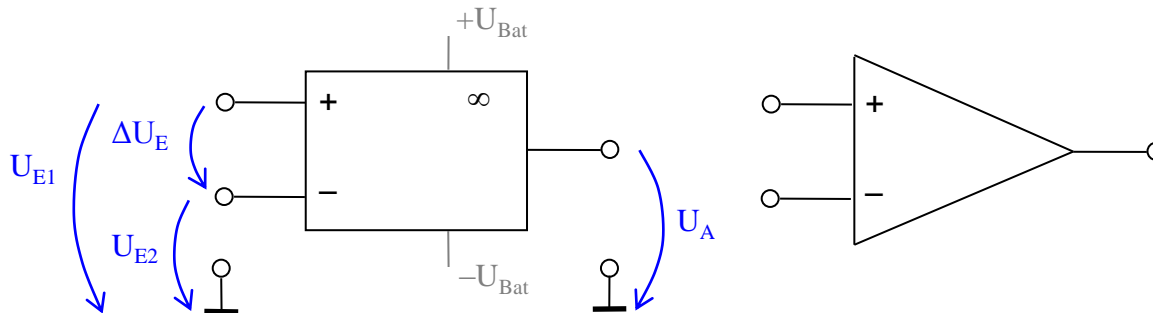
$$U_{BE1} = U_{E1} + U_{bat} - U_E$$

$$U_{BE2} = U_{E2} + U_{bat} - U_E$$

- gleiche Transistoren mit gleichen Arbeitspunkten \rightarrow für $U_{E1} = U_{E2}$ Ströme $I_{B1} + I_{C1} = I_{B2} + I_{C2} = I_E/2 \rightarrow$ genau beide richtigen $U_{BE1} = U_{BE2} = U_{E1/2} + U_{bat} - U_E$
- Vergrößerung von $U_{E1} = U_{E2} \rightarrow$ weiterhin gleiche Aufteilung von I_E (U_E stellt sich entsprechend ein!)
- **vermittels gemeinsamen I_E stellt sich das Gleichgewicht ein**
- Nur U_{E1} vergrößert \rightarrow andere Aufteilung von I_E (besser leitender Transistor bekommt mehr) I_{C1} steigt I_{C2} wird verringert $\rightarrow I_{C2} \cdot R_{C2}$ sinkt bei **Vergrößerung von $U_{E1} \rightarrow U_A$ größer** (U_E stellt sich entsprechend ein!)
- bei **Vergrößerung von $U_{E2} \rightarrow U_A$ kleiner** (U_E stellt sich entsprechend ein!)
- Strom I_E des Gleichgewichts verändert sich nicht, **teilt sich** aber auf beide Transistoren **entsprechend U_{E1} und U_{E2} auf**

- Ein **Eingang**, der am Ausgang **gleichsinnig** verstärkt und
- Ein **Eingang**, der am Ausgang **gegensinnig** verstärkt
- Prinzip **ermöglicht** durch „nachgeführten Arbeitspunkt“ auch **Gleichsignale**
- Funktioniert (mit geringem Abstand ca. 0,7 V) **von $-U_{\text{Bat}}$ bis $+U_{\text{Bat}}$**

Aus dem Differenzverstärker (+ Gegentaktendstufe) entwickelte sich der **Operationsverstärker**. Für Regelungstechnik insbesondere Analogrechner schon mit Röhren. Erst billige integrierte Schaltkreise ermöglichten enorme Verbreitung.



Durch seine **fast idealen** Eigenschaften wird der Operationsverstärker (OV) als **Bauelement betrachtet** (ohne seine innere Struktur näher zu beachten).

Der Operationsverstärker selbst benötigt **in der Regel keinen Masseanschluss**, die **Batterie muss in der Mitte auf Masse liegen**

Grundlagen der Halbleiterbauelemente, Analyse analoger und digitaler Schaltungen

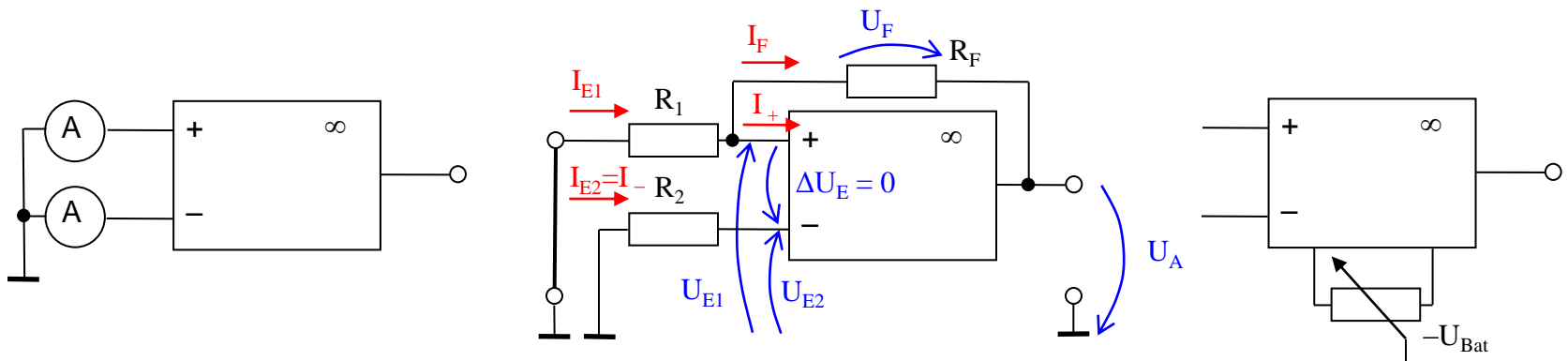
	idealer OV	Standardtyp z.B. $\mu\text{A} 741$	MOS Eingänge z.B. CA 3140	Präzisionstyp z.B. $\mu\text{A} 714$
Eigenverstärkung v_0	∞	200 000	100 000	500 000
Eingangswiderstand	∞	2 M Ω	1,5 T Ω	50 M Ω
Ausgangswiderstand	0	75 Ω	60 Ω	60 Ω
max. Ausgangsstrom	unbegrenzt	20 mA	22 mA	20 mA
Eingangsspannungsdifferenz (Offsetspannung U_{i0})	0	1 mV	8 mV	30 μV
Eingangsruhestrom	0	80 nA	5 pA	1,2 nA
Eingangsruhestromdifferenz (Offsetstrom I_{i0})	0	20 nA	0,5 pA	0,5 nA
Offsetspannungsdrift	0	6 $\mu\text{V}/\text{K}$	10 $\mu\text{V}/\text{K}$	0,3 $\mu\text{V}/\text{K}$
Gleichtaktunterdrückung	∞	90 dB	90 dB	123 dB
Transitfrequenz	unbegrenzt	1 MHz	4,5 MHz	0,6 MHz

zu den Parametern:

1. Eigenverstärkung $v_0 \approx \infty \rightarrow$ Differenzspannung $U_{E1} - U_{E2} \approx 0$, sonst hohes $v_0 \rightarrow U_A \rightarrow \infty$. ($U_E = 75 \mu\text{V}$, $v_0 = 200000$, $U_{\text{Bat}} = 15 \text{ V} \rightarrow$ Aussteuergrenze erreicht; weniger als 1/10 Offsetspannung)

Das heißt auch, dass die Eigenverstärkung v_0 **nicht direkt nutzbar** ist.

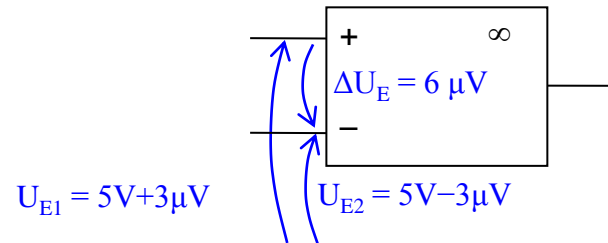
2. Eingangsruhestrom $I_i = (I_+ + I_-)/2$



Niederohmige $R_1, R_2 \rightarrow$ **Offsetstrom** $I_{i0} = I_+ - I_-$ unbedeutend ($I_{i0} \cdot R \ll U_{i0}$ der **Offsetspannung**), hochohmig Wirkung des Offsetstromes bedeutend. Richtwert $R_{1/2} < \text{bis} \approx U_{i0}/I_{i0}$ ($1 \text{ mV}/20 \text{ nA} = 50 \text{ k}\Omega$).

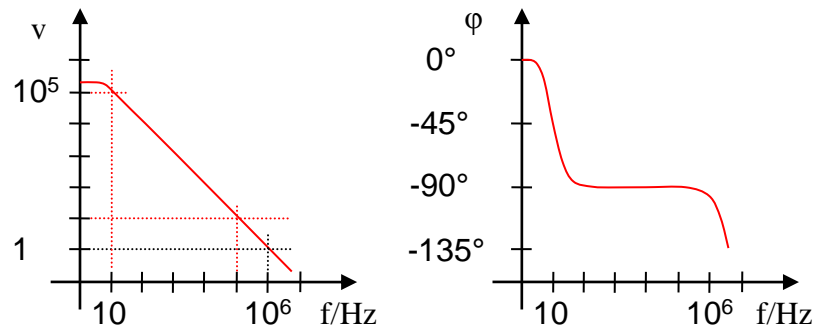
3. Offsetspannungsdrift \rightarrow Ausgangsspannungsänderung ohne Eingangsspannungsänderung (durch Temperaturabhängigkeit)

4. Gleichtaktverstärkung: Es geht um die Unterdrückung der Verstärkung der Gleichtaktspannung.



Differenzspannung $6 \mu\text{V}$, Gleichtaktspannung $(U_{E1} + U_{E2})/2 = 5 \text{ V}$. Leider wird Gleichtaktspannung ebenfalls geringfügig verstärkt ($v_{\pm} = U_{A\pm}/U_{E\pm}$). Gleichtaktspannung in der Regel relativ groß \rightarrow Störungen
Gleichtaktunterdrückung $k_{\text{CMR}} = v_u - v_{\pm}$ (jeweils in dB gemessen)

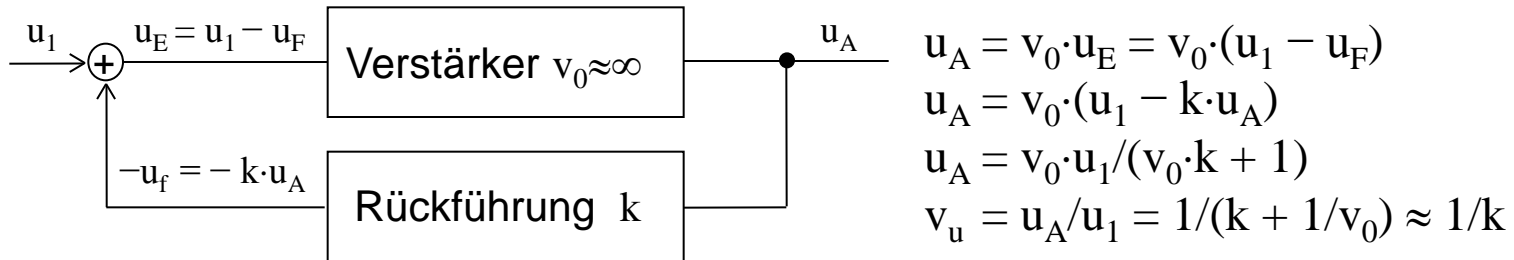
5. Frequenzgang Produkt aus Verstärkung und Bandbreite ist konstant. Grenzfrequenz, bei der Verstärkung 1 erreicht wird \rightarrow **Transitfrequenz**



Phasengang wichtig für Rückführung vom Aus- zum Eingang

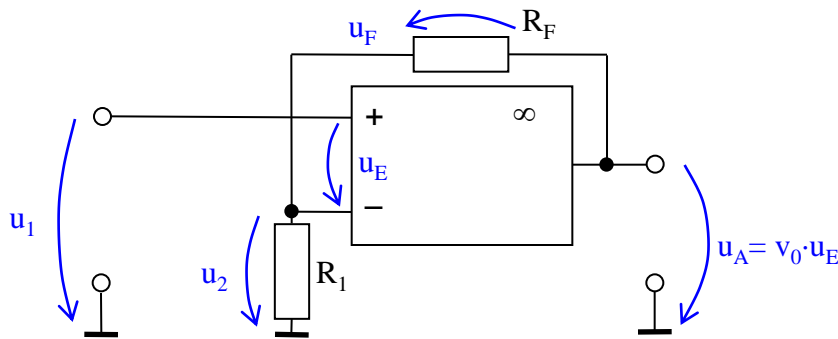
Kleinsignalbetrachtung für Operationsverstärker **nicht** explizit erforderlich.

Mit- und **Gegenkopplung** wurden nach physikalischen Wirkungsweisen früh genutzt, regelungstechnische Betrachtungsweise brachte Erklärung.



Verstärkung $v_0 \approx \infty \rightarrow$ **Gesamtverstärkung v_u nur von Gegenkopplung abhängig** (Rückführung mit $0 < k < 1$)

Ausgangsspannung an „-“ Eingang zurückgeführt – Spannungsgegenkopplung.



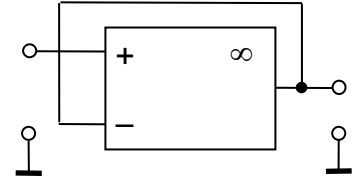
$$u_2 = u_A \frac{R_1}{R_1 + R_F} = \frac{u_A}{1 + R_F / R_1}$$

$$u_E = u_1 - u_2 = u_1 - \frac{u_A}{1 + R_F / R_1}$$

$$v_u = \frac{u_A}{u_1} = \frac{u_A}{u_E + u_A / (1 + R_F / R_1)} = \frac{u_A}{u_A / v_0 + u_A / (1 + R_F / R_1)} \approx 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad \text{für } v_0 \rightarrow \infty .$$

Grundlagen der Halbleiterbauelemente, Analyse analoger und digitaler Schaltungen

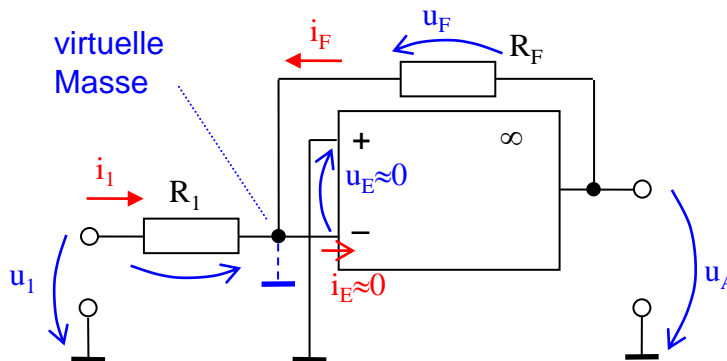
- Leerlaufspannungsverstärkung ist durch **Verhältnis R_F und R_1** genau bestimmt. (bei $v_0 \gg 1 + R_F/R_1$).
- Fall $R_F = 0$ **Sonderfall $v_u = 1$** (R_1 kann ∞ sein).
- **Eingangswiderstand $v_u = 100 \rightarrow$**
 $R_{Eges} = 2 \text{ M}\Omega \text{ bis } 1,5 \text{ T}\Omega \cdot 2000 = 4 \text{ G}\Omega \text{ bis } 3000 \text{ T}\Omega$



$$R_{Eges} = \frac{u_1}{i_1} = \frac{u_E + u_A / (1 + R_F / R_1)}{i_1} = \frac{u_E}{i_1} \left(1 + \frac{v_0}{1 + R_F / R_1} \right) \approx R_E \frac{v_0}{v_u} .$$

- hoher **Eingangswiderstand** \rightarrow Hauptanwendung **nichtinvertierenden Verstärkers** (Elektrometerverstärker)
- Spannungsteiler $R_F, R_1 \rightarrow$ Querstrom $\rightarrow 10 \cdot (I_1 + I_{i0})$ nicht größer als 95% I_{Amax}
- **Gleichtaktverstärkung** zeigt Problem, dass Einfluss störend und **keine Verbesserung durch Gegenkopplung**

Strom i_F vom Ausgang zum „-“ Eingang zurückgeführt – Stromgegenkopplung.



Knotensatz:

$$i_1 = i_E - i_F \approx -i_F$$

mit $u_E \approx 0$, $i_E \approx 0$ und

$$i_1 = \frac{u_1}{R_1} \quad \text{sowie} \quad i_F = \frac{u_A}{R_F}$$

$$V_u = \frac{u_A}{u_1} = \frac{u_A / -i_F}{u_1 / i_1} = -\frac{R_F}{R_1} \quad \rightarrow \quad R_{Eges} = \frac{u_1}{i_1} = R_1$$

- **Gesamtverstärkung** negativ somit Ausgangsspannung invertiert (negiert oder 180° phasenverschoben)
- wiederum nur das **Verhältnis** der Widerstände **R_F und R₁**
- Minuszeichen → **Gleichtaktverstärkung** in gleichem Maße **verringert**
- **Eingangswiderstand** findet dagegen **keine Verbesserung**.
- Viele Anwendungen → **Eingangswiderstand** ausreichend und **Invertieren behindert nicht** (durch zweite Stufe beheben)
- → **Schaltung hauptsächlich angewandt**

- durch **Gegenkopplung** in gleichem Maße **verbessert Temperaturdrift, Frequenzgang, Ausgangswiderstand** oder **Nichtlinearitäten** in Kennlinie
- Gesamtverstärkung einer Stufe **nicht wesentlich über 100** liegen. (heutige Preisen → zweite Verstärkerstufe)

Die **Dimensionierung** soll an einem Beispiel erörtert werden.

Aufgabe: Signal eines Sensors auf Standarteingangssignal einer SPS oder einer PC-I/O-Karte verstärken.

- Sensor **Ausgangsspannung** $u_{\text{sen}} = 0 \dots \pm 100 \text{ mV}$ bei **Innenwiderstand** des Sensors $R_{\text{sen}} = 500 \Omega$
 - **Ausgangssignal** soll $u_a = 0 \dots \pm 10 \text{ V}$
 - Operationsverstärker ein **Standardtyp**

 - **Schaltung dimensionieren** (Schaltungsvariante, Verstärkung, Steuerkennlinie sowie R_1 , R_2 und R_F),
 - Eingangswiderstand
 - Ausgangswiderstand
 - Frequenzgang
 - Drift
- } überprüfen
oder kontrollieren

Bestimmung der Verstärkung:

Verstärkung \leftarrow maximale Eingangsspannung und maximale Ausgangsspannung

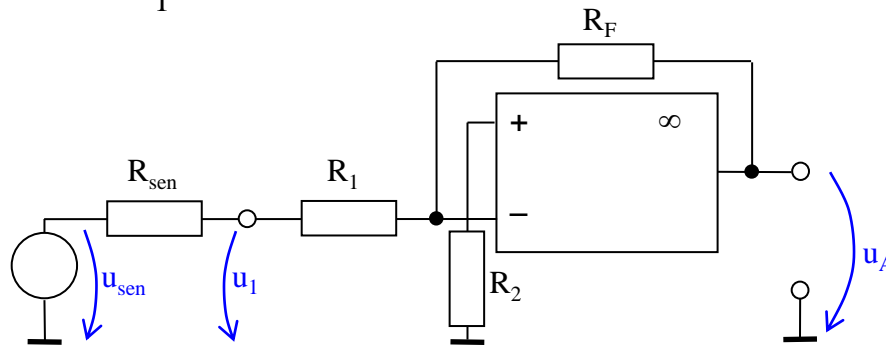
$$V_u = \frac{u_{A \text{ SollMax}}}{u_{1 \text{ IstMax}}} = \frac{10 \text{ V}}{100 \text{ mV}} = 100 \quad \text{invertierende Verstärker } v_u = -100$$

Bestimmung der Schaltungselemente (beide Schaltungen):

- $R_{1/2} < \text{bis } \approx U_{i0}/I_{i0} = 50 \text{ k}\Omega$ (In der Praxis wählt man 10 bis 20 k Ω .)
- Eingangswiderstand groß gegenüber Innenwiderstand Sensor ($R_E \gg R_{\text{sen}}$), damit u_{sen} vollständig am Verstärkereingang

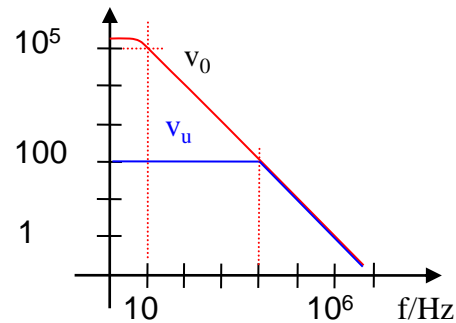
- 1. Test: invertierenden Verstärker** $R_E \equiv R_1 = 10 \dots 20 \text{ k}\Omega \gg 500 \Omega \rightarrow$ Spannungsverlust 5% ... 2,5% in der Praxis vertretbar (ev. durch Justierung der Verstärkung ausgleichen)
- 2. Es wird gewählt:** Variante **invertierender Verstärker** und $R_1 = R_2 = 20 \text{ k}\Omega$
- 3. Nun R_F bestimmen:**

$$v_u = -\frac{R_F}{R_1} \quad \text{d.h.} \quad R_F = -v_u R_1 = -(-100) 20 \text{ k}\Omega = 2 \text{ M}\Omega$$



- 4. Verstärkungskennlinie** im Bereich $\pm 10 \text{ V}$ linear \rightarrow die Batteriespannung mindestens $+12 \text{ V}$ und -12 V wählen
- 5. Kontrolle des Ausgangswiderstandes:**
Ausgangswiderstand **des Signals** durch Gegenkopplung noch verkleinert beträgt $R_{Ages} \approx R_A v_u/v_0 = 75 \Omega \cdot 100/200000 = 38 \text{ m}\Omega$.

6. Kontrolle des Frequenzganges:

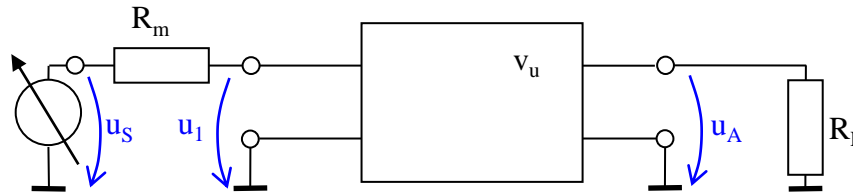


- Frequenzgang von 0 bis 10 kHz
- Wenn höher erforderlich: zwei Stufen jeweils Verstärkung 10 hintereinander nutzen

7. Kontrolle der Drift:

- Betrachtung der Drift über gesamten Einsatztemperaturbereich (z.B. 0 °C bis 50 °C) → mit $6 \mu\text{V/K}$ und $v_u = 100$ Spannungsunsicherheit $u_A = 30 \text{ mV}$.
- Kurzzeitige Temperaturschwankungen des Chips ca. 5 K → Spannungsschwankung $u_A = 3 \text{ mV}$
- → entweder Spannungsfehler von 30 mV ($30 \text{ mV}/10\text{V} = 3 \text{ ‰}$ des Endwertes) → verkraftbar oder Nullpunktkorrektur
- → Spannungsungenauigkeit von 3 mV ($0,3 \text{ ‰}$ des Endwertes)

Für **praktischen Einsatz** sind **Parameter** des Verstärkers durch **Messungen** zu bestätigen und eventuell zu justieren.



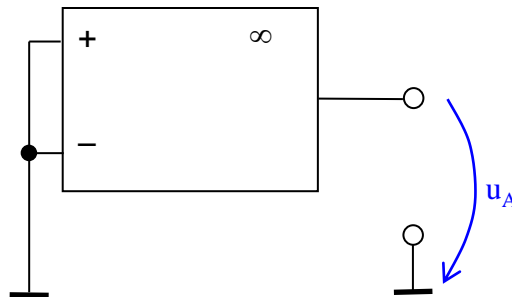
1. **Verstärkung:** $v_{u\text{leer}}$ bei $R_L = \infty$ messen dazu **Testsignale** (am sinnvollsten Sinussignale mit dem Oszilloskop als u_{ss} messen)
2. **Verstärkungskennlinie** \rightarrow 1. für den gesamten **Aussteuerbereich**
3. **Frequenzgang** \rightarrow 1. für den gesamten **Frequenzbereich**
(Kurvenform kontrolliert wegen Verzerrungen)
4. **Messung des Eingangswiderstandes für Signale** \rightarrow Signalspannung u_s und Eingangsspannung u_1 messen bei bekanntem R_m

$$R_{\text{Eges}} = \frac{u_1}{i_1} = \frac{u_1 R_m}{u_s - u_1}$$

5. **Messung des Ausgangswiderstandes:** Ausgangsspannung einmal für Leerlauf u_{A1} zweitens für Lastwiderstand u_{A2} messen bei bekanntem R_L (solange lineare Verhältnisse).

$$R_{\text{Ages}} = \frac{u_{RA2}}{i_{A2}} = \frac{u_{A1} - u_{A2}}{i_{A2}} = \frac{u_{A1} - u_{A2}}{u_{A2}} R_L$$

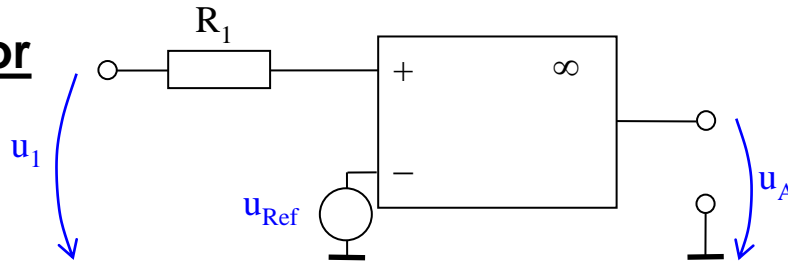
- 6. Messung der Drift:** Die Drift kann nur durch präzise Messungen im Temperaturschrank und Beobachtung über längere Zeit ermittelt werden.



- Eingänge beide **direkt auf Masse** (ohne Gegenkopplung, volle Verstärkung)
- **Nullpunkt justieren** und die Ausgangsspannung beobachten
- Bei sehr schlechten Exemplaren Nullabgleich nicht möglich
- Bei den besseren läuft Ausgangsspannung nach wenigen Sekunden bis Minuten weg erreicht meist positive oder negative Sättigung
- Nur bei relativ guten Exemplaren (die nicht in die Sättigung laufen) können Schwankungen brauchbare Rückschlüsse geben.

3.3 Schaltungsbeispiele mit Operationsverstärkern

Komparator

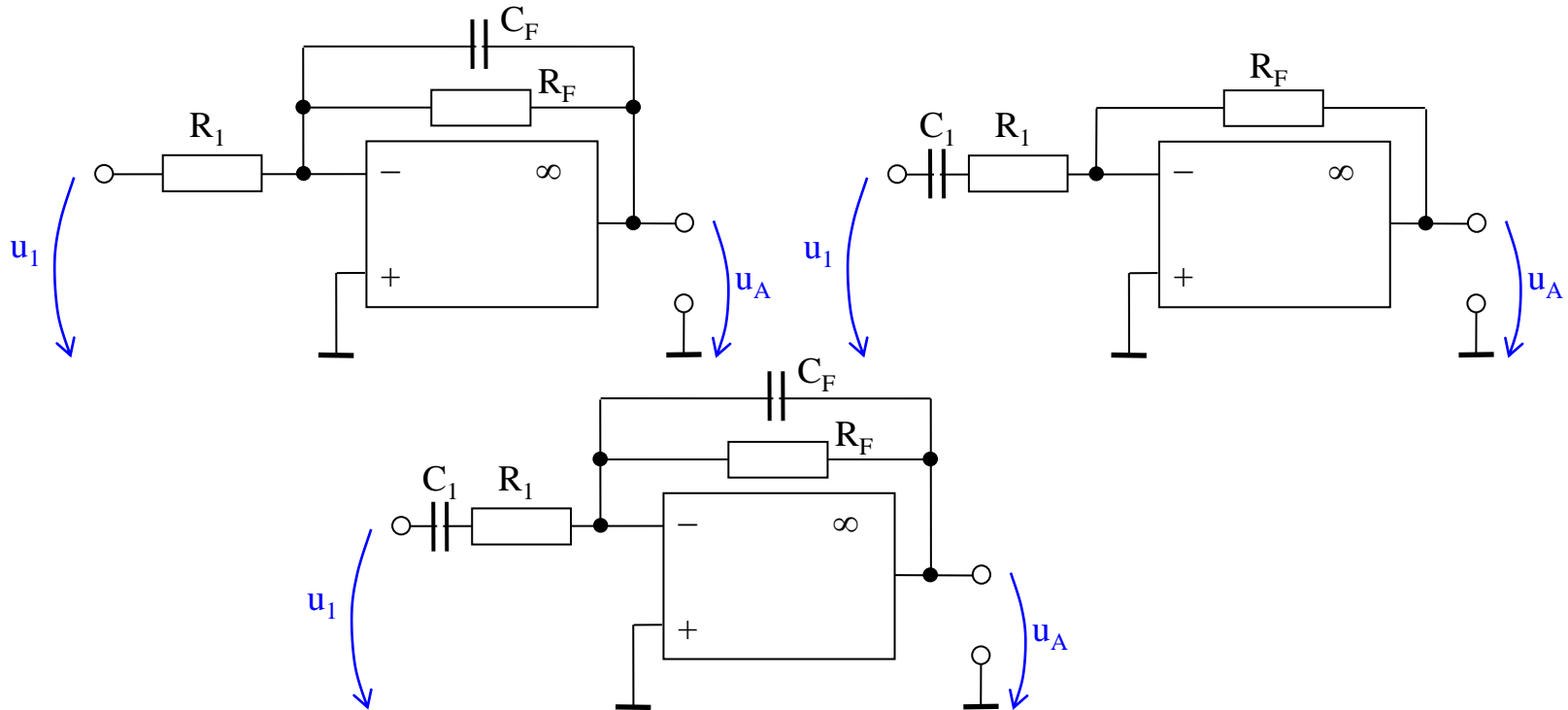


mit hoher $v_0 \rightarrow$

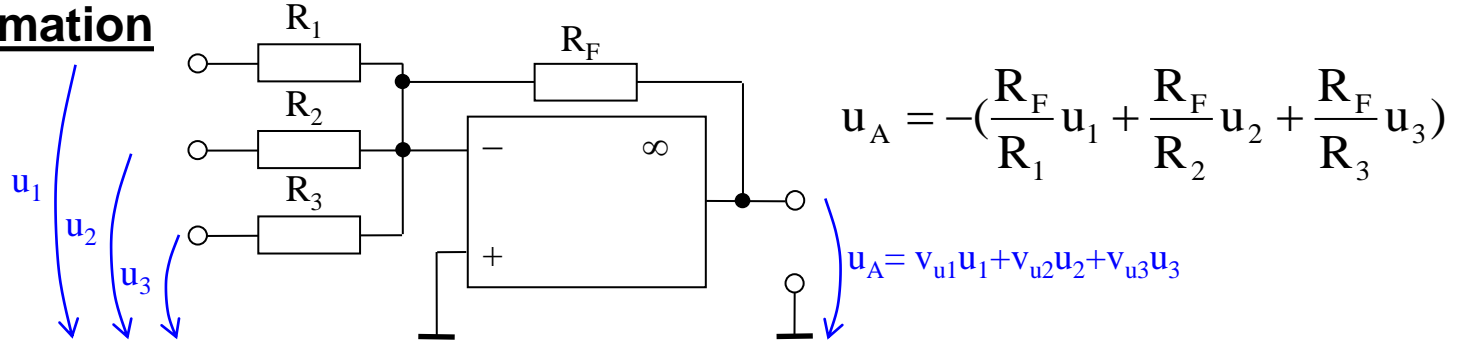
$u_1 > u_{Ref} \rightarrow u_A \approx +U_{Bat}$ für

$u_1 < u_{Ref} \rightarrow u_A \approx -U_{Bat}$

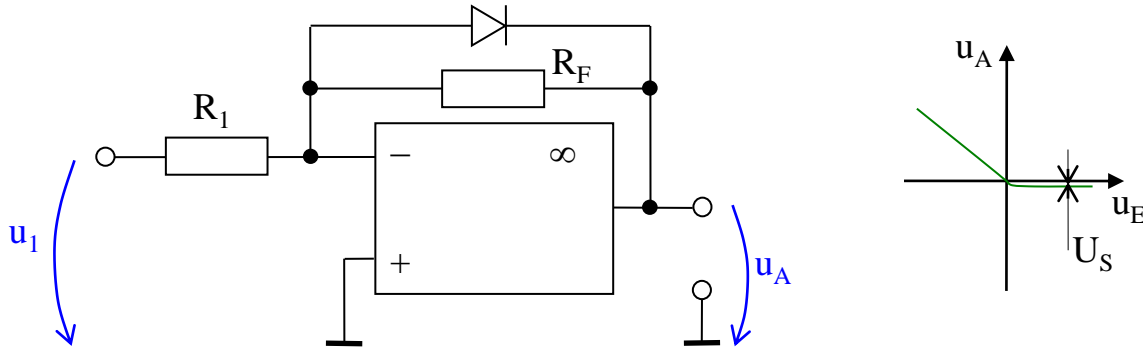
Verstärker mit Tief-, Hoch- und Bandpassverhalten



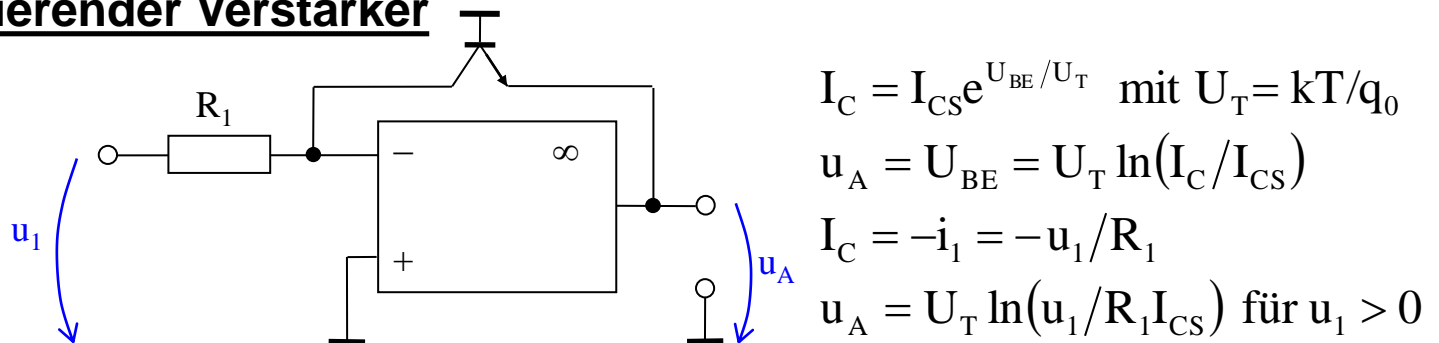
Summation



Beispiel der Wirkung nichtlinearer Bauelemente



Logarithmierender Verstärker



Aufgabe 3.2.1

Ein Messverstärker ist mit dem Operationsverstärkerschaltkreis TBA 221B (kompatibel mit μA 741) aufzubauen und zu erproben. **Gegeben:**

- Eingangsspannung (Leerlaufspannung des Messwandlers) = 0 bis 250 mV
- Innenwiderstand des Messwandlers = $200\ \Omega$ und
- Ausgangsspannung entsprechend dem Standardsignal = 0 bis 10 V.

Frage 1: Kann der invertierende Verstärker verwendet werden?

Frage 2: Welche Werte wählen sie für R_1 und R_2 ?

Frage 3: Wie groß muss v_u sein?

Frage 4: Was ergibt sich für R_F ?

Frage 5: Welche Versorgungsspannungen sollten für die notwendige Aussteuerbarkeit gewählt werden?

Frage 6: Wie groß werden der Eingangs-, der Ausgangswiderstand, der Frequenzgang und die Drift?

