

## 1. Motivation

- Schaltungsfamilien

## 2. Transistoren in analogen Schaltungen

- Inverter
- Kleinsignalverhalten
- Differenzstufe
- Transistor als Widerstand
- Stromquellen
- Inverter und Differenzstufe mit Stromspiegel
- Ausgangsstufen
- Kapazitäten eines Transistors
- Frequenzgang

## 3. Verstärker

- Aufbau einstufiger Verstärker
- Wirkung der Kapazitäten
- Aufbau zweistufige Verstärker
- Pole und Nullstellen
- CMRR
- PSRR
- Slew Rate

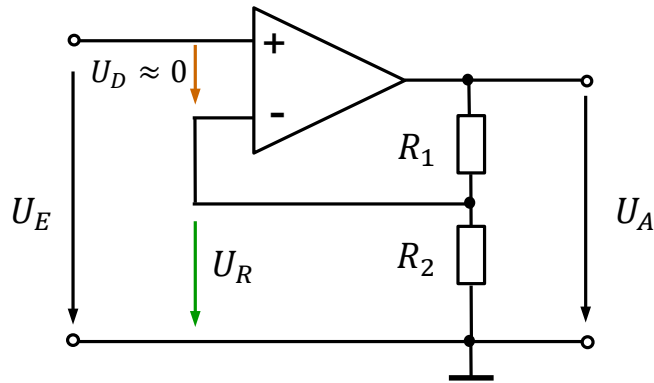
## 4. Anwendungen des OPV

- Invertierender Verstärker
- Übertragungsfunktion
- Frequenzgang (Bode-Diagramm)
- Verstärkungs-Bandbreite-Produkt
- Bandbreite eines gegengekoppelten OPV
- Summierer/ Subtrahierer
- Logarithmierer/ Integrierer
- Aktiver Tiefpass/ Hochpass 1. Ordnung
- Integrierer/ Differenzierer
- Komparator mit Hysterese

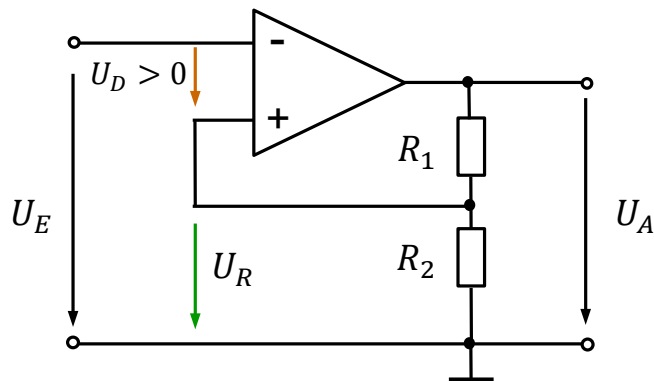
## 5. Gegen- und Mittkopplung

- Einfluss auf Eingangswiderstand
- Einfluss auf Ausgangswiderstand
- Frequenzgang
- Astabile Kippschaltung

# Rückgekoppelte OPs



nicht invertierender Spannungsverstärker



invertierender Schmitt-Trigger

- Rückkopplung bedeutet, dass die Ausgangsgröße oder ein Bruchteil davon auf den Eingang zurückgeführt wird.
- Man unterscheidet dabei zwei Arten der Rückkopplung:

**Gegenkopplung** (GK, *negative feedback*): Subtraktion am Eingang

- Die Ausgangsgröße wirkt der Ursache ihrer Entstehung (d. h. der Eingangsgröße) entgegen
- Gesamtverstärkung des Systems nimmt ab.

**Mitkopplung** (MK, *positive feedback*): Addition am Eingang

- Die Ausgangsgröße wirkt gleichsinnig auf die Eingangsgröße zurück
- Gesamtverstärkung des Systems nimmt zu.

# Gegenkopplung vs. Mitkopplung

- **Gegenkopplung bedeutet einen Verlust an Verstärkung.  
Wozu also Gegenkopplung?**
  - Die Gesamtverstärkung wird reduziert, aber zugleich auch stabilisiert.
  - Der Arbeitspunkt wird ebenfalls stabilisiert.
  - Die Ein- und Ausgangswiderstände werden positiv beeinflusst.
  - Die Grenzfrequenz wird erhöht.
  - Die Linearität des Verstärkers wird verbessert (Signalverzerrungen nehmen ab).

**Harold Stephen Black**  
(1898-1983)  
US-amerikanischer  
Elektronikingenieur.  
Erfinder des gegengekoppelten  
Verstärkers (1927)

- **Wozu Mitkopplung?**

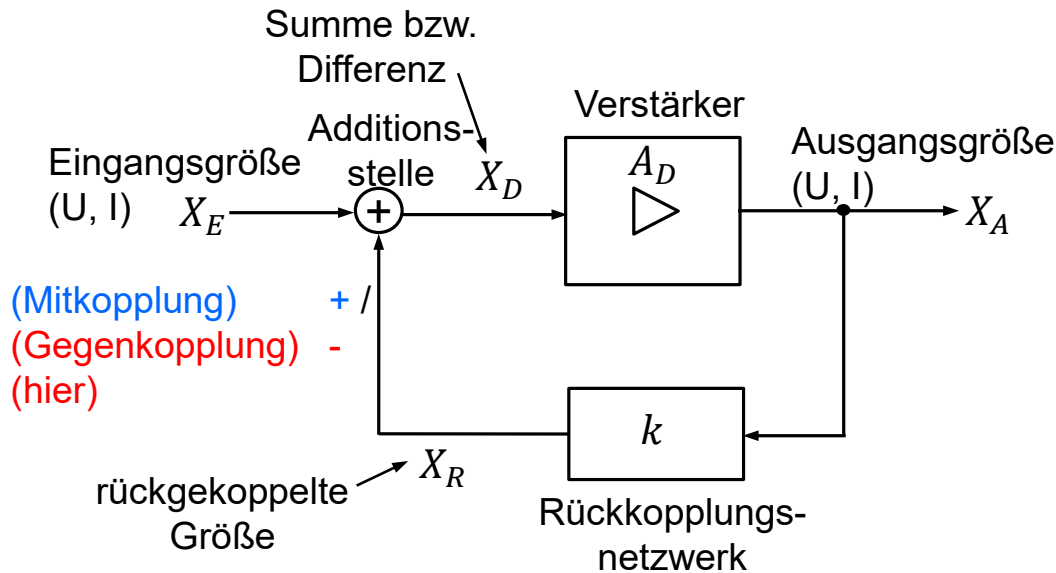
Mitkopplung erhöht zwar die Verstärkung, macht jedoch das System in der Regel instabil. Bei bestimmten Schaltungen ist diese Instabilität jedoch erwünscht:

- Oszillatoren (→ Selbsterregung)
- Komparatoren
- Kippstufen.



Aufgrund der frequenzbedingten Phasendrehung in einem Verstärker kann eine GK in eine ungewollte MK umschlagen. Der Verstärker schwingt dann!

# Allgemeine Darstellung der Gegenkopplung



$$A = \frac{X_A}{X_E} \quad \text{Gesamtverstärkung mit GK (Signalverstärkung) (closed loop gain)}$$

$$A_D = \frac{X_A}{X_D} \quad \text{Leerlaufverstärkung, (open loop gain)}$$

$$k = \frac{X_R}{X_A} \quad \text{Rückkopplungsfaktor (k ≤ 1) (feedback factor)}$$

$$k \cdot A_D = \frac{X_R}{X_D} \quad \text{Schleifenverstärkung (loop gain)}$$

O. B. d. A. seien  $A_D, k$  positiv reelle Zahlen ( $\rightarrow$  frequenzunabhängige GK).  
Aus dem Blockschaltbild lässt sich die Gesamtverstärkung  $A$  wie folgt bestimmen:

$$X_D = X_E - X_R \quad X_R = k \cdot X_A \quad X_A = A_D \cdot X_D$$

$$\Rightarrow X_A = A_D \cdot (X_E - k \cdot X_A)$$

$$\Rightarrow A = \frac{X_A}{X_E} = \frac{A_D}{1 + k \cdot A_D} = \frac{1}{1/A_D + k}$$

Ist die Schleifenverstärkung  $k \cdot A_D \gg 1$ , bzw. gilt  $\frac{1}{A_D} \ll k$ , dann ergibt sich als Näherung:

$$A \approx \frac{1}{k}$$

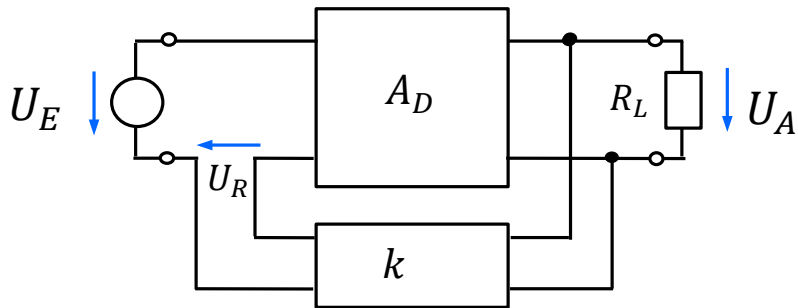
Die Signalverstärkung  $A$  wird in diesem Fall fast nur noch durch die Widerstände des Rückkopplungsnetzwerks ( $k = \text{const.}$ ) bestimmt (siehe Berechnung für den nicht invertierenden Verstärker)

# Die 4 Arten der Gegenkopplung

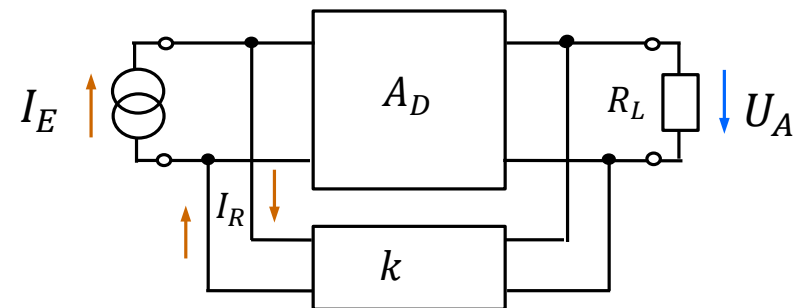
Eingangssignal - Ausgangssignal



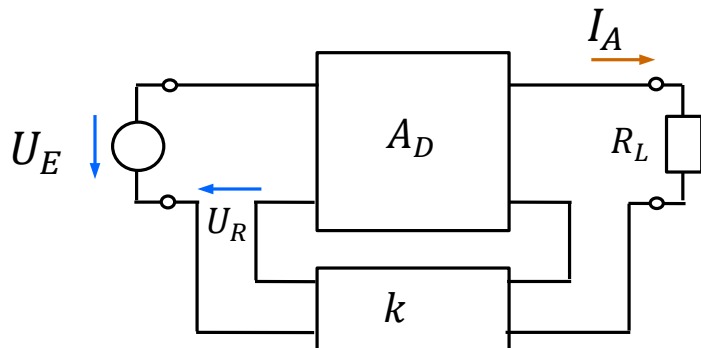
## 1. Spannungs-Spannungs-Gegenkopplung



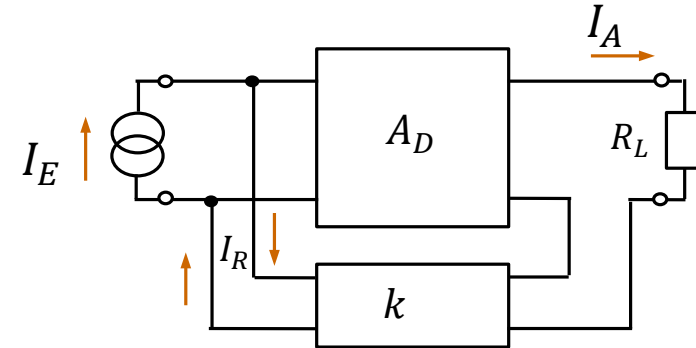
## 2. Strom-Spannungs-Gegenkopplung



## 3. Spannungs-Strom-Gegenkopplung

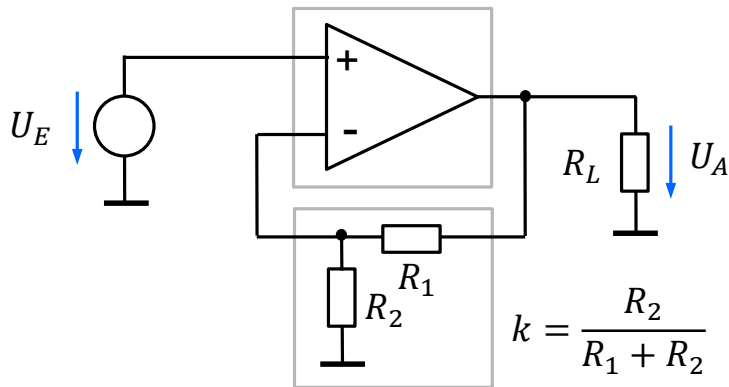


## 4. Strom-Strom-Gegenkopplung



# Gegenkopplungsarten beim OP

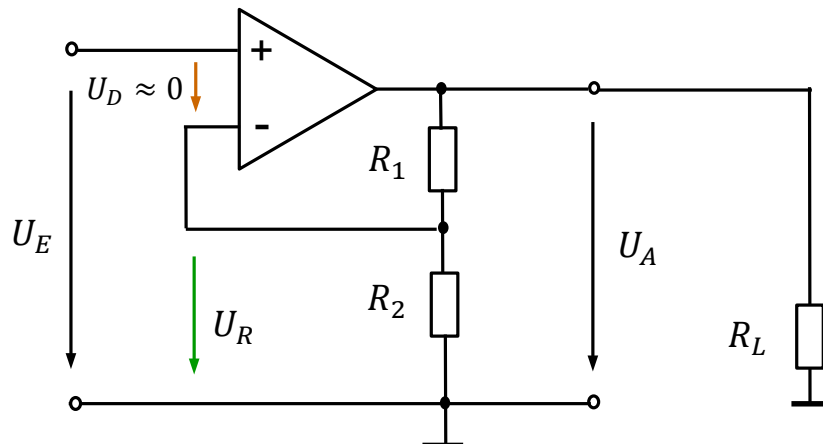
## 1. Spannungs-Spannungs-Gegenkopplung



- ❖ Primärer Effekt der GK:  
Stabilisierung der Spannungsverstärkung
- ❖ Verstärkertyp: Spannungsverstärker

$$A_U = \frac{U_A}{U_E} \approx \frac{1}{k} = \frac{R_1}{R_2} + 1$$

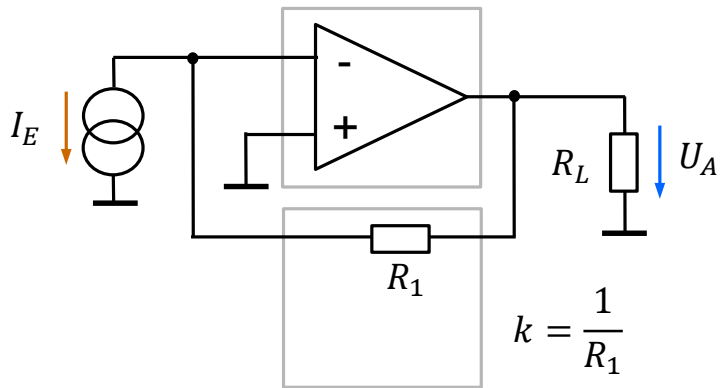
### Beispiel: nicht invertierender Spannungsverstärker



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

# Gegenkopplungsarten beim OP (2)

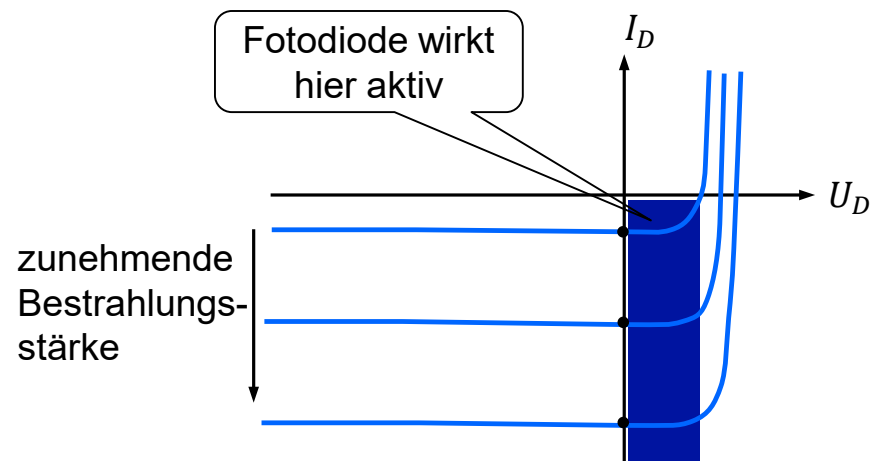
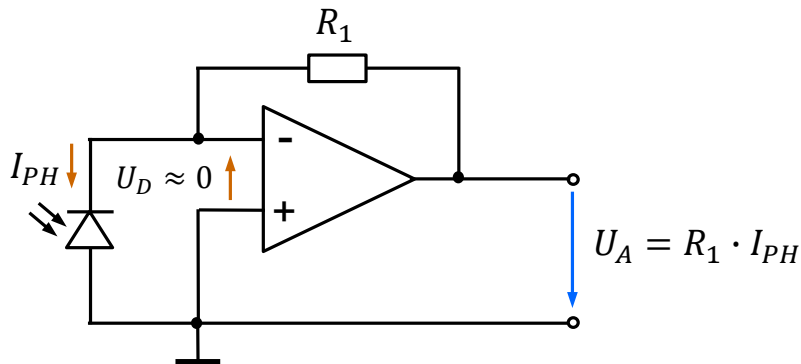
## 2. Strom-Spannungs-Gegenkopplung



- ❖ Primärer Effekt der GK:  
Stabilisierung des Übertragungswiderstands
- ❖ Verstärkertyp: Transimpedanzverstärker, Strom-Spannungs-Wandler

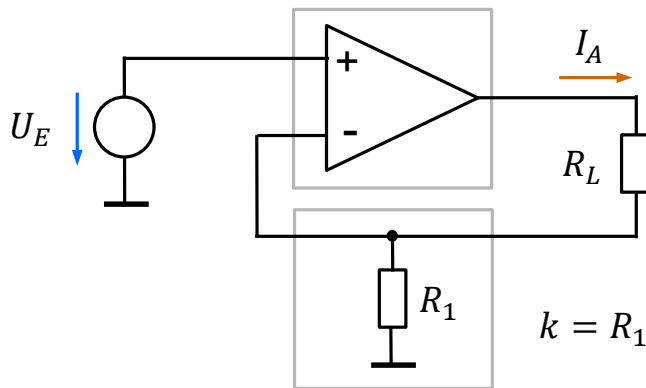
$$R_M = \frac{U_A}{I_E} \approx \frac{1}{k} = R_1$$

Beispiel: Umsetzung des Fotostroms einer Fotodiode in eine Spannung



# Gegenkopplungsarten beim OP (3)

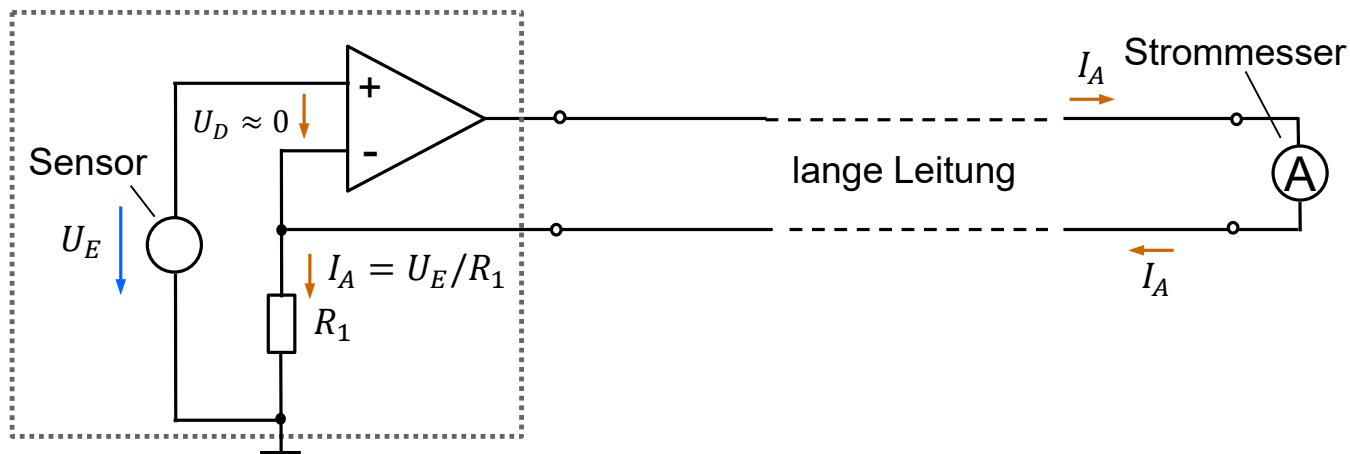
## 3. Spannungs-Strom-Gegenkopplung



- ❖ Primärer Effekt der GK:  
Stabilisierung des Übertragungsleitwerts
- ❖ Verstärkertyp: Transkonduktanzverstärker,  
Steilheitsverstärker,  
Spannungs-Strom-Wandler

$$G_m = \frac{I_A}{U_E} \approx \frac{1}{k} = \frac{1}{R_1}$$

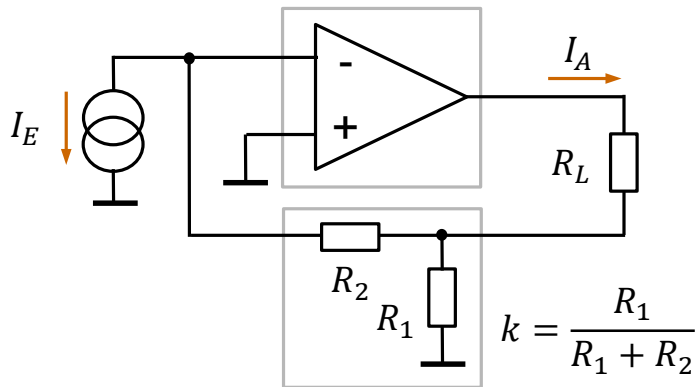
## Beispiel: Messverstärker für die Fernmessung





# Gegenkopplungsarten beim OP (4)

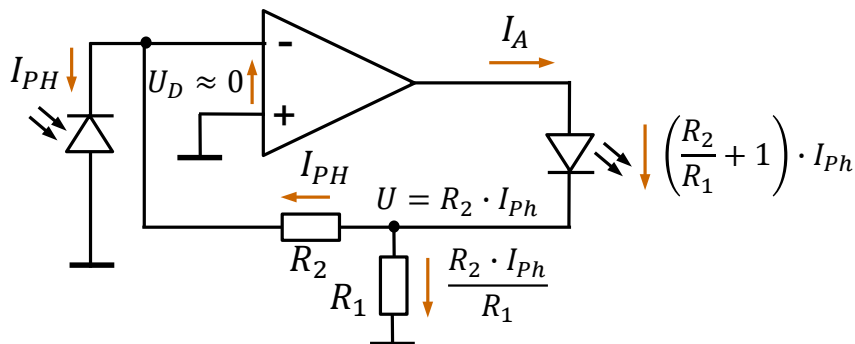
## 4. Strom-Strom-Gegenkopplung



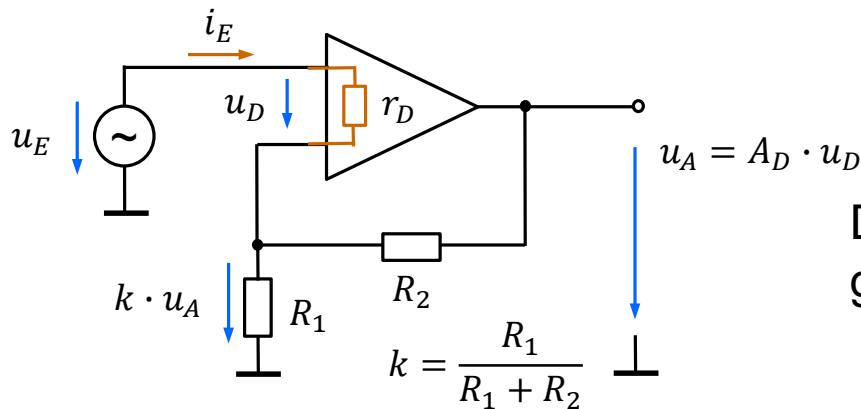
- ❖ Primärer Effekt der GK:  
Stabilisierung der Stromverstärkung
- ❖ Verstärkertyp: Stromverstärker

$$A_1 = \frac{I_A}{I_E} \approx \frac{1}{k} = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

Beispiel: Regelung für die Hintergrundbeleuchtung eines Displays



## Beispiel: Spannungs-Spannungs-GK (nicht invertierender Verstärker)



Der Eingangswiderstand des nicht gegengekoppelten Verstärkers beträgt:

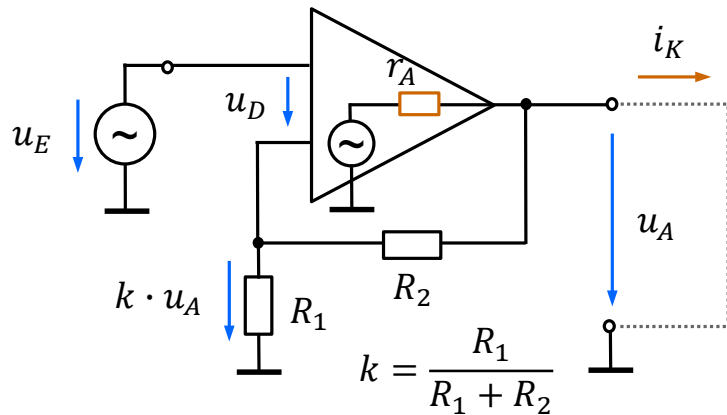
$$r_D = \frac{u_D}{i_E}$$

Mit GK ergibt sich: 
$$Z_{Ein} = \frac{u_E}{i_E} = \frac{u_D + k \cdot u_A}{i_E} = \frac{u_D + k \cdot A_D \cdot u_D}{i_E} = \frac{u_D(1 + k \cdot A_D)}{i_E}$$

$$\Rightarrow Z_{Ein} = r_D \cdot (1 + k \cdot A_D)$$

- Der Eingangswiderstand des OP wird durch die Spannungs-Spannungs-GK um den Gegenkopplungsgrad multiplikativ erhöht.

## Beispiel: Spannungs-Spannungs-GK (nicht invertierender Verstärker)



Der Ausgangswiderstand des nicht gegengekoppelten Verstärkers ist  $r_A$ . Mit GK gilt:

$$Z_{Aus} = \frac{\text{Leerlaufspannung}}{\text{Kurzschlussstrom}} = \frac{u_A}{i_K}$$

$$u_A = u_E \cdot \frac{A_D}{1 + k \cdot A_D}$$

$$i_K = \frac{A_D \cdot u_D}{r_A} = \frac{A_D \cdot u_E}{r_A}$$

Bei Kurzschluss ist wegen  $u_A = 0$  auch die rückgekoppelte Spannung  $u_R = k \cdot u_A$  null. Daher gilt hier  $u_D = u_E$

$$\Rightarrow Z_{Aus} = \frac{u_A}{i_K} = \frac{r_A}{(1 + k \cdot A_D)}$$

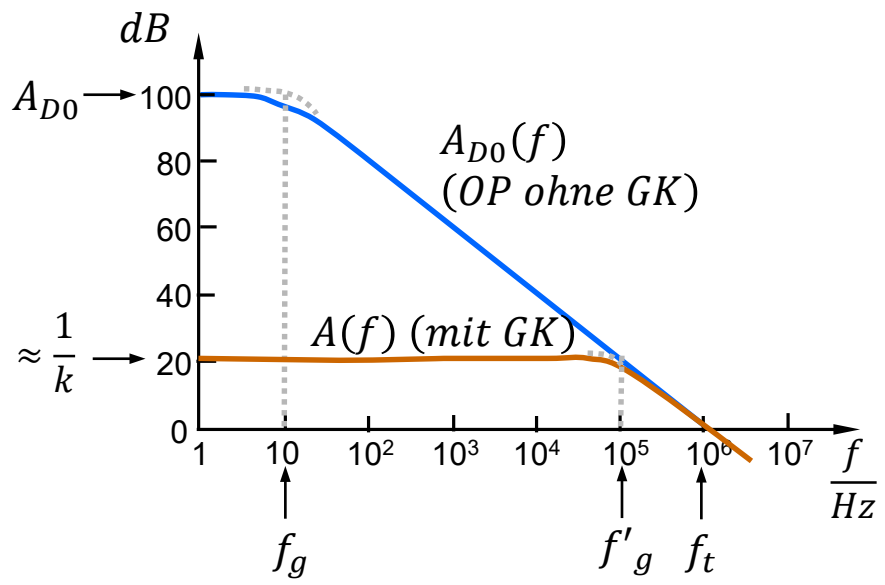
- Der Ausgangswiderstand des OP wird durch die Spannungs-Spannungs-GK um den Gegenkopplungsgrad multiplikativ reduziert.

Art der Gegenkopplung	$\frac{Z_{Ein}}{r_{Ein}}$	$\frac{Z_{Aus}}{r_{Aus}}$
Spannungs-Spannungs-GK	$1 + k \cdot A_D$	$\frac{1}{1 + k \cdot A_D}$
Strom-Spannungs-GK	$\frac{1}{1 + k \cdot A_D}$	$\frac{1}{1 + k \cdot A_D}$
Spannungs-Strom-GK	$1 + k \cdot A_D$	$1 + k \cdot A_D$
Strom-Strom-GK	$\frac{1}{1 + k \cdot A_D}$	$1 + k \cdot A_D$

- Gegenkopplung wirkt sich auf den Ein- und Ausgangswiderstand immer günstig aus!

Andere Bezeichnungen für die Gegenkopplungen:

1. Reihen-Parallel
2. Parallel-Parallel
3. Reihen-Reihen
4. Parallel-Reihen



- Solange die OP-Leerlaufverstärkung  $A_D \gg 1/k$  ist, gilt für die Signalverstärkung  $A \approx 1/k = const.$
- Ist  $A_D$  bis auf die Größenordnung von  $1/k$  abgesunken, geht die Stabilisierung der Verstärkung verloren.
- Die 3-dB-Grenzfrequenz mit GK liegt offensichtlich deutlich über der, ohne GK:  $f'_g \gg f_g$

Für den Frequenzgang eines OP mit TP-Verhalten 1. Ordnung gilt:  $A_D(f) = \frac{A_{D0}}{1 + j \cdot \frac{f}{f_g}}$

Mit GK gilt für die Gesamtverstärkung:  $A(f) = \frac{A_D(f)}{1 + k \cdot A_D(f)}$

Wir setzen ein und bringen zunächst den Ausdruck in die Normalform:

$$A(f) = \frac{\frac{A_{D0}}{1 + j \cdot \frac{f}{f_g}}}{1 + k \cdot \frac{A_{D0}}{1 + j \cdot \frac{f}{f_g}}} = \frac{A_{D0}}{1 + k \cdot A_{D0} + j \cdot \frac{f}{f_g}} \Rightarrow$$

# Einfluss der GK auf den Frequenzgang (2)

$$A(f) = \frac{A_{D0}}{1 + k \cdot A_{D0} + j \cdot \frac{f}{f_g}}$$

Nach Erweiterung mit  $1/(1 + k \cdot A_{D0})$  erhalten wir wieder die Standard-Tiefpass-Form:

$$A(f) = \underbrace{\frac{A_{D0}}{1 + k \cdot A_{D0}}}_{DC\text{-Verstärkung}} \cdot \underbrace{\frac{1}{1 + j \cdot \frac{f}{f_g} \cdot \frac{1}{1 + k \cdot A_{D0}}}}_{\text{Frequenzgang des TP}} \quad A(f) \approx \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{1 + j \cdot \frac{f}{f_g(1 + k \cdot A_{D0})}}$$

Daraus folgen zwei Feststellungen für den Betrieb mit GK:

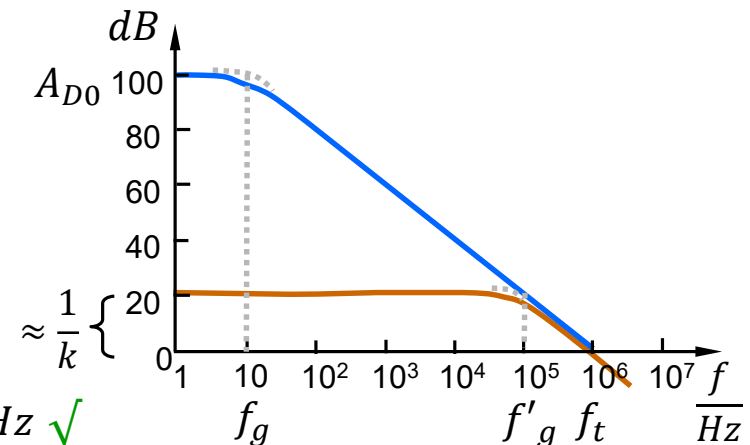
1. Die Verstärkung wird um den Gegenkopplungsgrad kleiner (wie bereits bekannt).
2. Die Grenzfrequenz (und damit auch die 3-dB-Bandbreite) wird um den Gegenkopplungsgrad  $(1 + k \cdot A_{D0})$  erhöht:

$$f'_g = (1 + k \cdot A_{D0}) \cdot f_g$$

Beispiel: Wir überprüfen diese Aussage anhand des rechten Schaubilds.  $A_{D0} = 100 \text{ dB} \triangleq 10^5$   $f_g = 10 \text{ Hz}$

Mit GK ist bei tiefen Frequenzen:  $A = 20 \text{ dB} \triangleq 10 \Rightarrow k = 0,1$

$$\Rightarrow f'_g = (1 + 0,1 \cdot 10^5) \cdot 10 \text{ Hz} \approx 10^4 \cdot 10 \text{ Hz} = 100 \text{ kHz} \checkmark$$



- Schmitt-Trigger mit RC-Glied:  
→ selbstschwingende Kippschaltung.  
Anwendungen: Rechteckgenerator, Blinkschaltungen.
- Der Kondensator C wird über den Widerstand R von der Spannung  $u_A$  aufgeladen.
- Sobald  $u_C$  einen Triggerpegel erreicht, kippt der Ausgang um, und der Kondensator wird umgeladen.

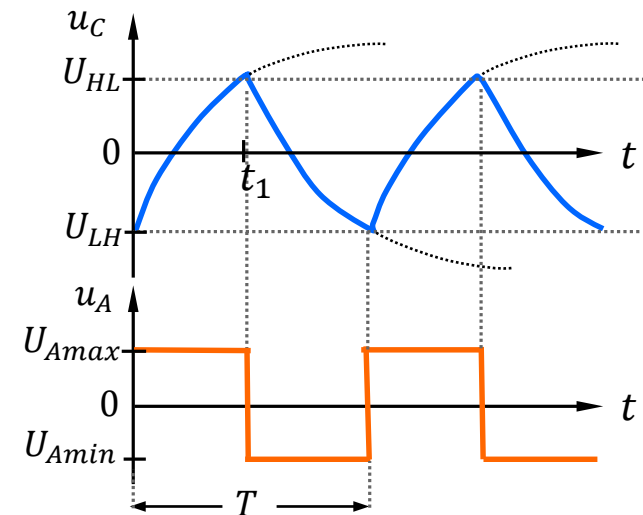
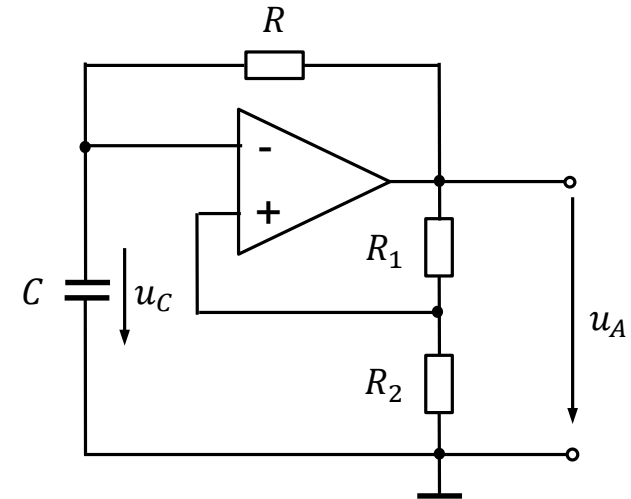
Wir bestimmen  $t_1 = 1/2 T$ . Für den Ladevorgang mit Anfangswert gilt bekanntlich:

$$u_C(t) = \underbrace{U_{Amax}}_{\text{Endwert}} - \left( U_{Amax} - \underbrace{U_{LH}}_{\text{Anfangswert}} \right) \cdot e^{-t/RC}$$

Mit  $u_C(t_1) = U_{HL}$  folgt  $t_1 = -RC \cdot \ln \frac{U_{HL} - U_{Amax}}{U_{LH} - U_{Amax}}$

Da  $U_{HL} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{Amax}$ ,  $U_{LH} = \frac{R_2}{R_1 - R_2} \cdot \underbrace{U_{Amin}}_{=-U_{Amax}}$

$$\Rightarrow T = 2 \cdot t_1 = 2 \cdot RC \cdot \ln \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) \quad \text{Periodendauer der Rechteckschwingung}$$



# Funktionsgenerator

- Funktionsgenerator: Selbstschwingende Schaltung zur Erzeugung elementarer Signalformen, z. B.



Rechteck



Dreieck



Sägezahn



Sinus

- Rechteck und Dreieck lassen sich z. B. wie folgt erzeugen:

