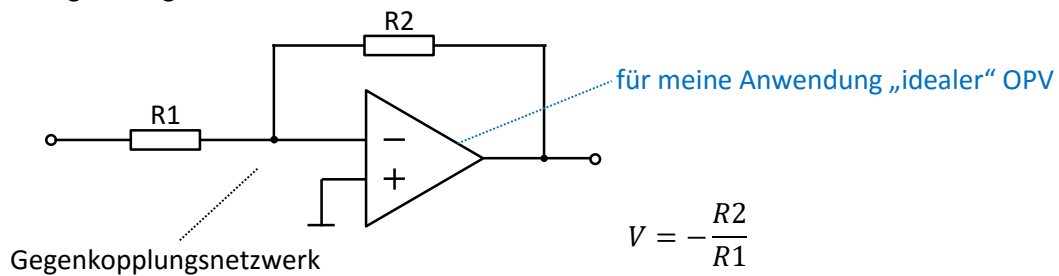


6. Operationsverstärker

6.1. Allgemeines

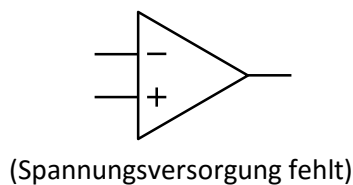
Ursprüngliche Anwendung des OPV als analoge Rechenschaltung (Addieren, Subtrahieren, Integrieren analoger Signale). Der Operationsverstärker ist ein Verstärker, der so optimiert ist, dass seine Funktion im beschalteten Zustand nicht vom Verstärker selbst, sondern nur von der äußeren Beschaltung abhängt.



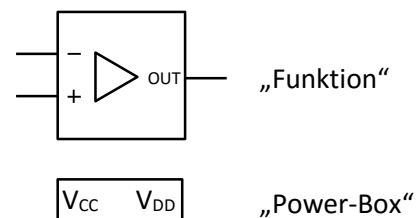
Anwendungen: Rechenschaltungen, Breitbandverstärker, komplexe Filter, Verstärkeranwendungen, Gleichrichter, Komparatoren, ...

Schaltsymbole:

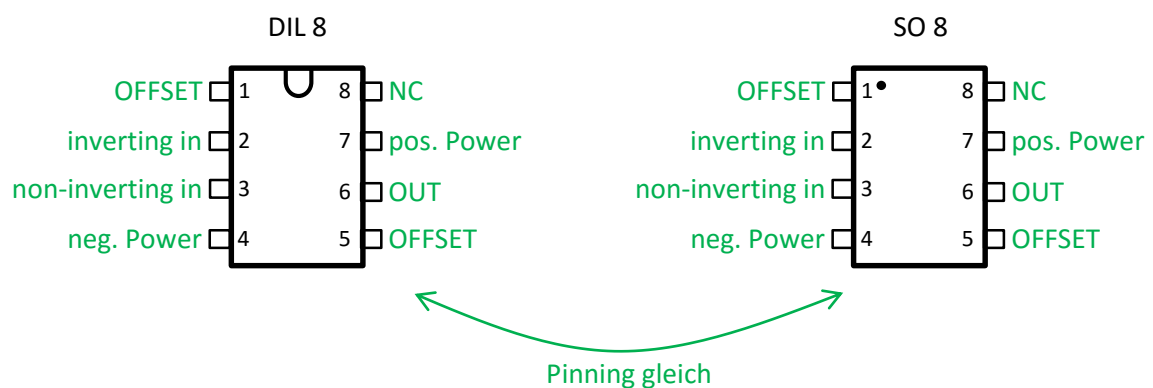
händisch:

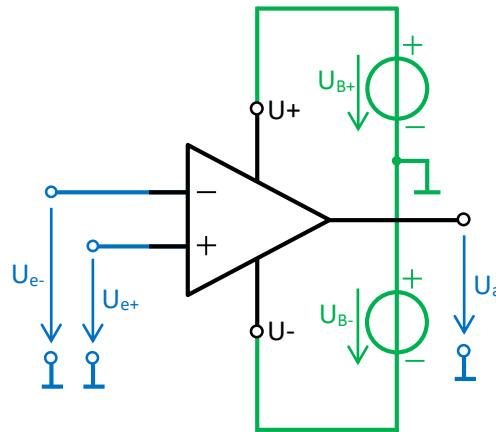


CAD:



Typisches Pinning:





Designzyklus:

- Idealer OPV: ideal für jede Anwendung
Nachweis, ob eine bestimmte Funktion mit OPVs realisierbar ist.
- Idealisierter / linearisierter OPV:
Simulationsmodell, Berechnung welche Eigenschaften beim Einsatz des OPVs für eine bestimmte Anwendung „ideal“ sein müssen.
- Realer OPV: Kaufbares Bauteil, ist ideal für eine bestimmte Anwendung

6.2. Idealer OPV

6.2.1. Eigenschaften

- Spannungsverstärkung (Leerlaufverstärkung, Differenzverstärker, Open-Loop-Gain)

$$V_g = \frac{du_a}{du_{ed}} \rightarrow \infty$$

- Spannungsverstärkung ist frequenzunabhängig
- Gleichtaktverstärkung (common-mode-gain):

$$V_{gt} = \frac{du_a}{du_{egt}} \rightarrow 0$$

- (differentieller Differenz-) Eingangswiderstand

$$r_{ed} \rightarrow \infty$$

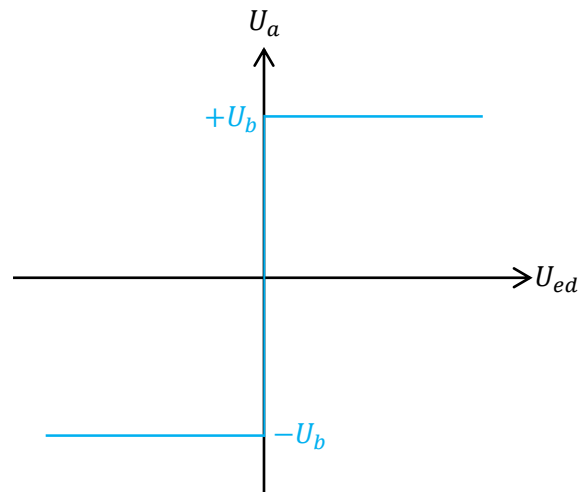
- Gleichtakt-Eingangswiderstand

$$r_{gt} \rightarrow \infty$$

- (differentieller) Ausgangswiderstand:

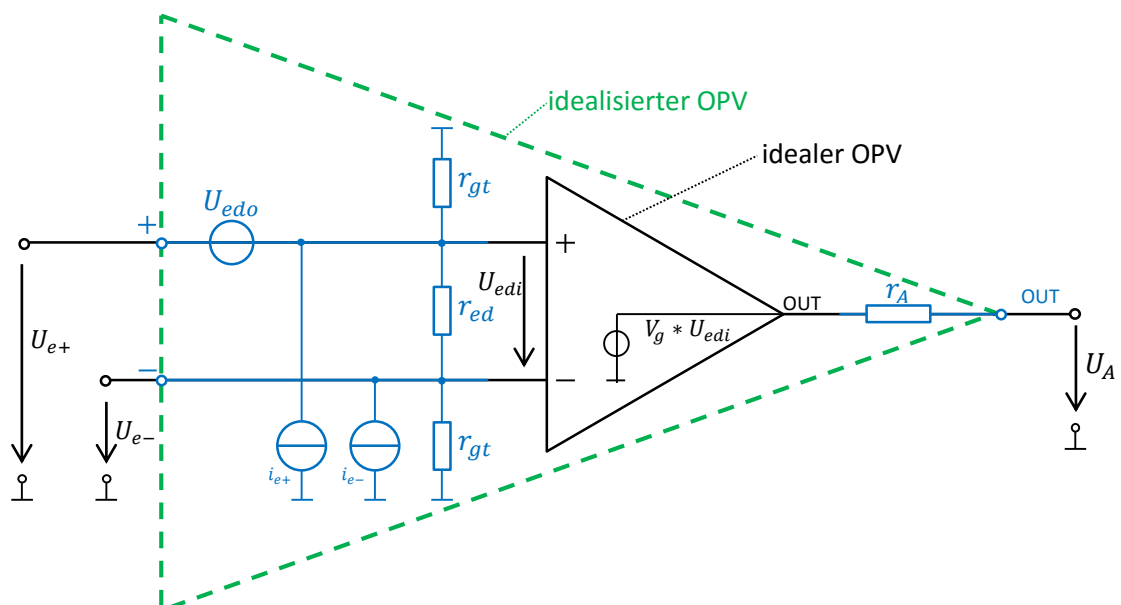
$$r_a \rightarrow 0$$

6.2.2. Ausgangskennlinie



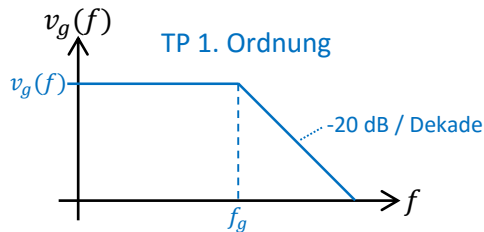
6.3. Idealisierter / Linearisierter OPV

6.3.1. Simulationsmodell (minimal)



6.3.2. Eigenschaften

- Open loop gain $v_g \dots$ typ: 10^4 bis 10^7
- v_g ist frequenzabhängig



$$\underline{v_g(f)} = \underline{v_g(0)} * \left[\frac{1}{1 + j \frac{f}{f_g}} \right]$$

$f_g \dots$ Grenzfrequenz TP 1. Ordnung
 komplexe open loop gain bei DC
 komplexe open loop gain über der Frequenz

- (Gleichtaktverstärkung $v_{gt} \dots$ typ: 1 bis 10)
- Gleichtaktunterdrückung (**Common Mode Rejection Ratio**)

CMRR ... typ: 10^4 bis 10^7

$$CMRR = \frac{v_{gt}}{v_g}$$

- (differentieller Differenz-) Eingangswiderstand:

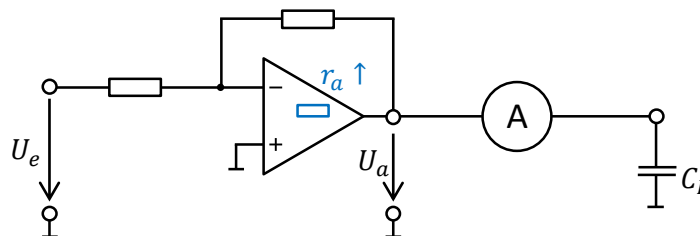
$r_{ed} \dots$ typ: 10^5 bis $10^{13} \Omega$

- (differentieller) Gleichtaktwiderstand:

$r_{gt} \dots$ typ: 10^9 bis $10^{15} \Omega$

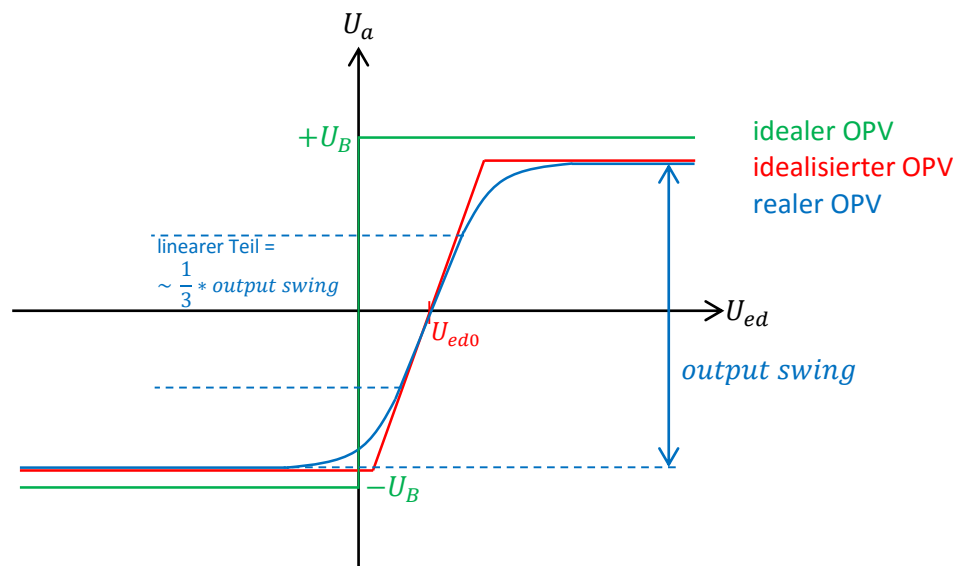
Daumenregel: $r_{gt} > 100 \cdot r_{ed}$, dann bei Simulation üblicherweise vernachlässigbar

- Differentieller Ausgangswiderstand:



$r_a \dots$ typ: 10Ω bis $1 \text{ k}\Omega$, gilt für $I_{OUT} \leq 20 \text{ mA}$ (50 mA)

Achtung: Kurzschlussfester Ausgang ist ein Überlastschutz, wo beim Erreichen des maximalen Ausgangsstromes der Ausgangswiderstand verändert / erhöht wird. Der typische Ausgangsstrom eines OPVs liegt bei ca. 20 mA, für „Leistungstreiber“ bei ca. 50 mA.

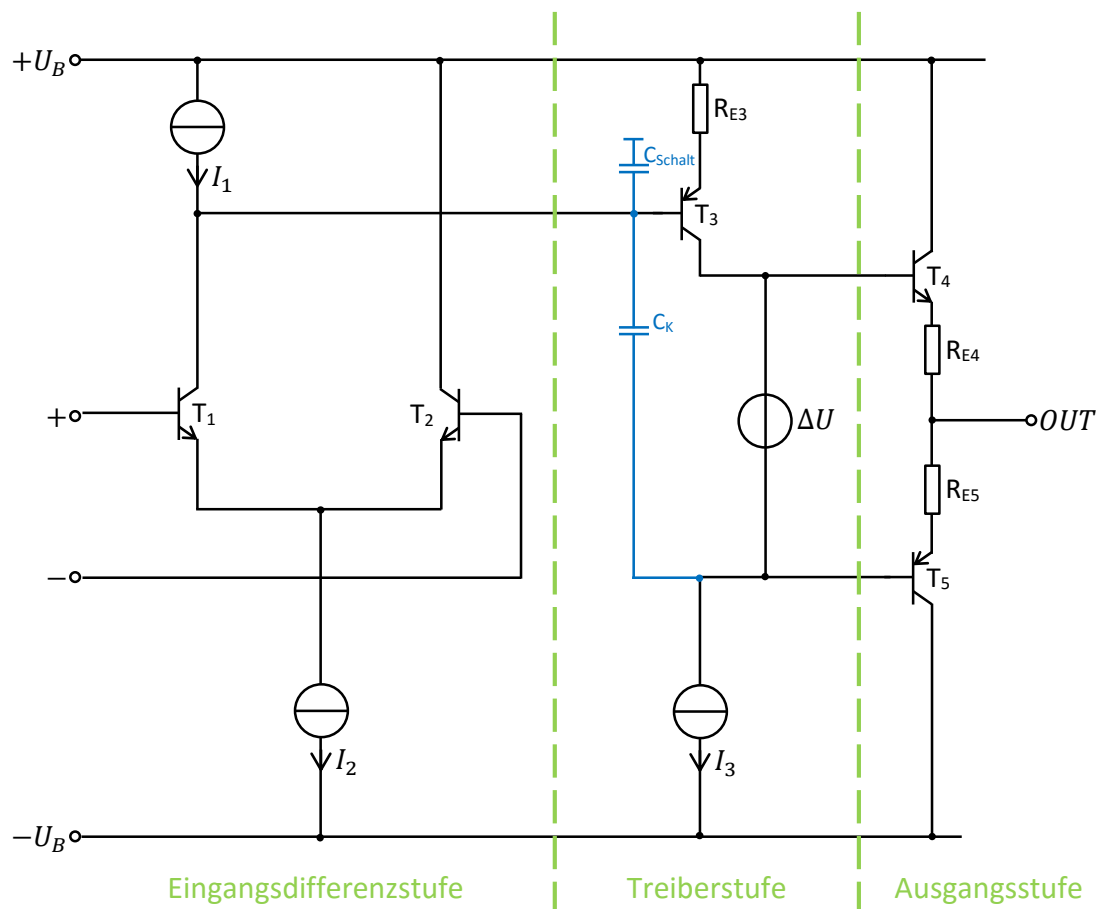


6.4. realer OPV

- **Prinzipieller Aufbau:**

Trotz der Vielzahl unterschiedlicher OPVs ähneln sich die inneren Grundschaltungen. Um die Signallaufzeit durch den OPV möglichst gering zu halten, beschränken sich die meisten Designs auf 3 Stufen:

- Eingangsstufe
- Treiberstufe (Pufferstufe)
- Ausgangsstufe (komplementäre Endstufe)



Eingangsdifferenzstufe:

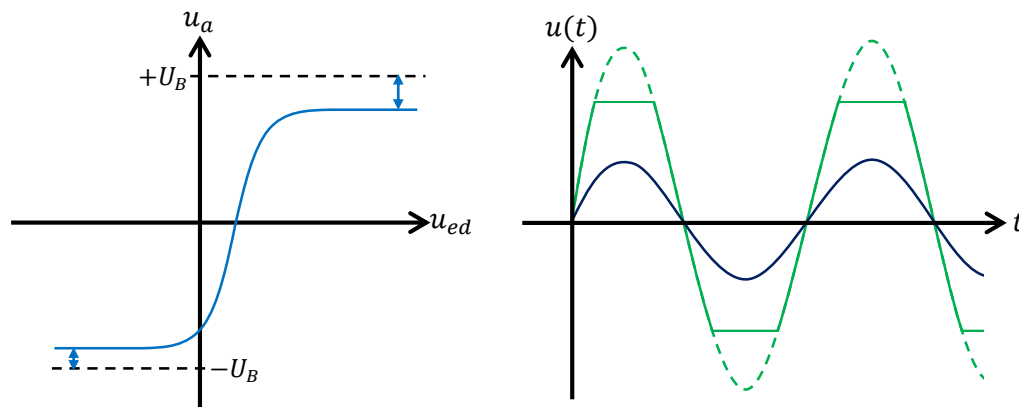
Ein geeignetes Chip-Layout versucht die Temperatureinflüsse in der Eingangsstufe möglichst gering zu halten, wodurch der Temperatur-Drift und die Offsetspannung klein werden. Zur Erhöhung des Eingangswiderstandes werden bei manchen OPVs Transistoren mit extrem hoher Stromverstärkung verwendet („Super beta Transistor“, SBT). Ebenfalls für geringere Eingangsströme werden FETs verwendet, welche jedoch ein schlechteres Offset- und Temperatur-Drift-Verhalten zeigen (als Bipolartransistoren). Mit einer entsprechenden Hilfesaltung (Stromregelung) können auch bei Bipolartransistoren ein hoher Eingangswiderstand bzw. geringe Eingangsströme erreicht werden. Die Eingangsstufe ist optimiert für möglichst geringes Rauschen und einen möglichst großen Gleichtakt-Eingangsbereich.

Treiberstufe:

Die Treiberstufe ist für die gesamte Verstärkung des OPVs zuständig und üblicherweise ebenfalls als Differenzverstärker aufgebaut. Weiters besitzt er eine Frequenzkompensation C_K . Die Parallelschaltung von C_K und C_{Schalt} bestimmt die Spannungsanstiegsgeschwindigkeit am Ausgang des OPV, mit der Vorspannung ΔU werden die Übernahmeverzerrungen in der Ausgangsstufe optimiert.

Ausgangsstufe:

Komplementäre Emitterfolger-Schaltung als rückwirkungsarme strombegrenzende Ausgangsstufe.



Die Differenz zwischen maximaler positiver / negativer Ausgangsspannung und positiver / negativer Betriebsspannung ist nicht konstant und hängt von der Betriebsspannung, dem Ausgangsstrom und der Temperatur ab.

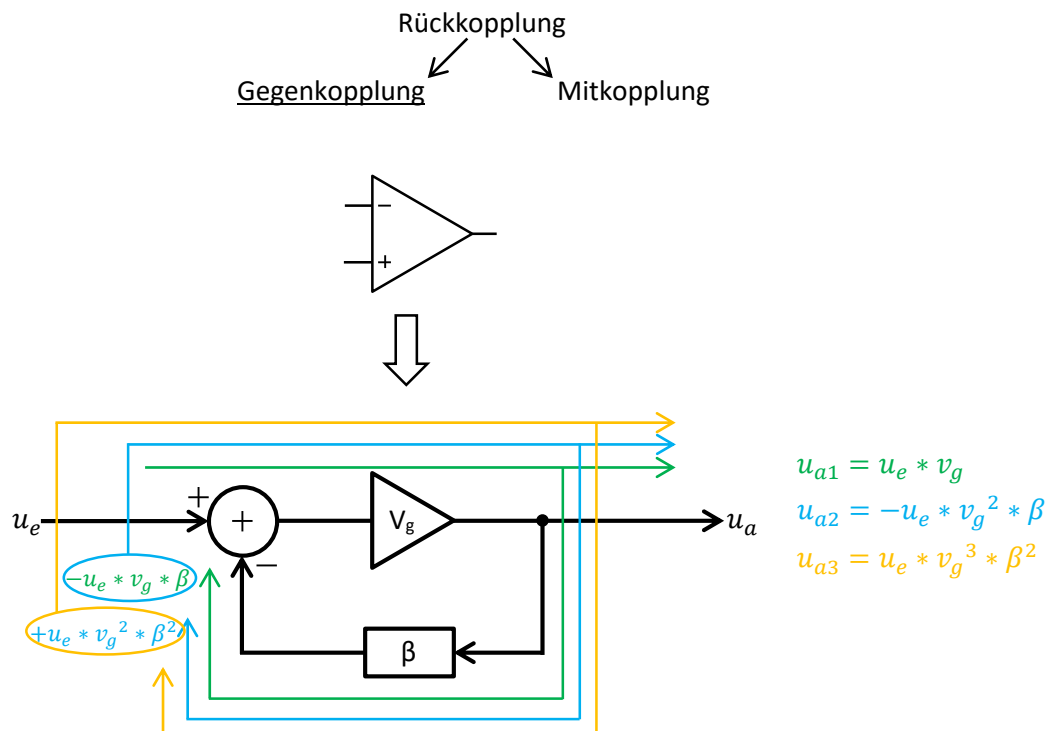
- **Zusammenfassung grundlegender Eigenschaften**

Die Typenvielfalt ergibt sich an der Tatsache, dass nicht alle Parameter gleichzeitig optimiert werden können (idealer OPV existiert nicht). Durch die teils widersprüchlichen Forderungen ist das Ziel bei der Auswahl eines realen OPV, dass dieser „ideal“ für eine bestimmte Anwendung ist.

Anwendung:

- „Universalverstärker“: „ausgewogener Kompromiss“ der grundlegende Eigenschaften
- „Präzisionsverstärker“: Geringe Grenzfrequenz
- „schneller Verstärker“: deutlich schlechtere Daten bei den Eingangsgrößen, verbunden mit meist hohem Stromverbrauch
- Spezial-OPV:
 - Automotive
 - Mobile Anwendungen
 - Medizintechnische Produkte

6.5. Gegengekoppelte OPV-Schaltung



$$u_a = u_e * v_g - u_e * v_g^2 * \beta + u_e * v_g^3 * \beta^2 - \dots$$

$$u_a = u_e * v_g * \sum_{n=0}^{\infty} v_g^n * \beta^n * (-1)^n$$

$$u_a = u_e * v_g * \sum_{n=0}^{\infty} (-v_g * \beta)^n = \frac{u_e * v_g}{1 + \beta * v_g}$$

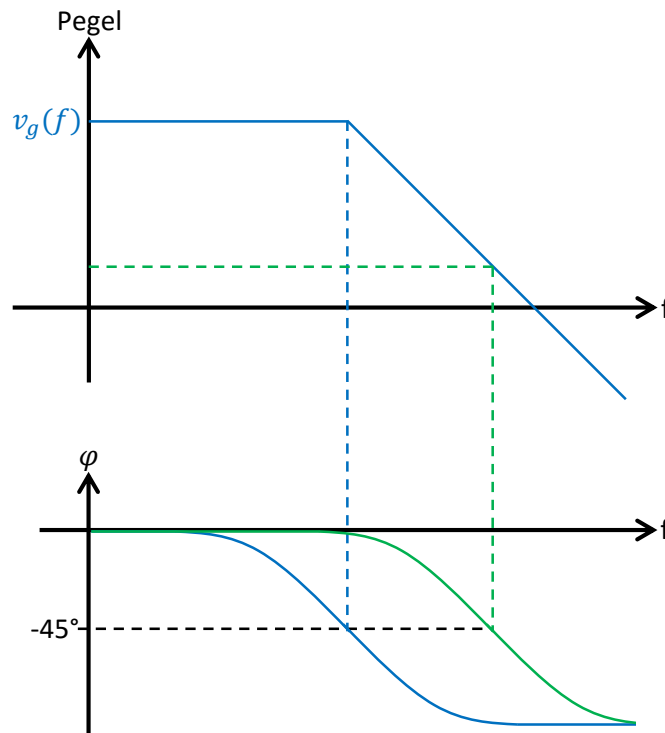
$$u_a = \underline{\underline{u_e * \frac{v_g}{1 + \beta * v_g}}}$$

Idealer OPV: $v_g \rightarrow \infty$

$$u_a = u_e * \lim_{v_g \rightarrow \infty} \frac{v_g}{1 + \beta * v_g} = u_e * \lim_{v_g \rightarrow \infty} \frac{\frac{v_g}{v_g}}{\frac{1 + \beta * v_g}{v_g}}$$

$$u_a = u_e * \lim_{v_g \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{v_g} + \beta} = \underline{\underline{u_e * \frac{1}{\beta}}} \rightarrow \text{„Die Eigenschaften des OPVs hängen nur von der Außenbeschaltung ab“}$$

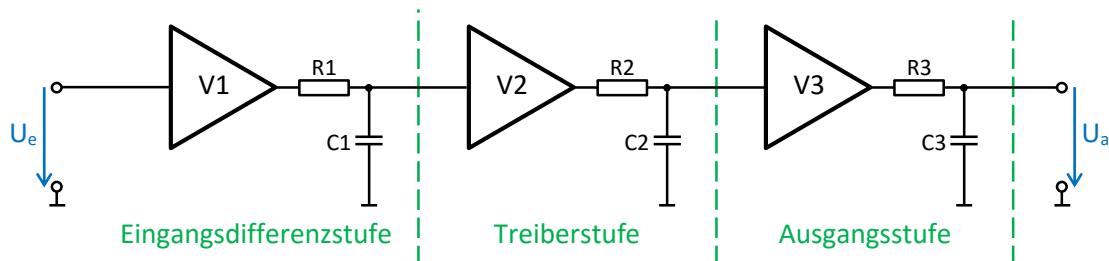
Die Ausgangsspannung einer gegengekoppelten Schaltung hängt nur mehr von der Eingangsspannung u_e und von der Übertragungsfunktion β des Rückkopplungsnetzwerkes ab (gilt nicht nur für idealen OPV, sondern auch für endlich große Werte von v_g).



Die gegengekoppelte Verstärkung hat also im Idealfall den Wert $\frac{1}{\beta}$. Daraus folgt, dass die Genauigkeit, die Linearität, die Stabilität und die Bandbreite durch eine Verringerung der Verstärkung erkauft wird. Das Maß für die Verbesserung der OPV-Eigenschaften ist die sogenannten Schleifenverstärkung v_s (reiner Rechenwert, keine wirklich auftretende Verstärkung)

$$v_s = v_g * \beta$$

6.6. Dynamisches Verhalten



Zur besseren Beurteilung einer Verstärkerschaltung benötigt man einerseits ein Modell für das statische Verhalten und ein weiteres Modell für das dynamische Verhalten. Das Verhalten eines Verstärkers wird durch folgende OPV-Eigenschaften bestimmt:

- Frequenzabhängigkeit der Geradeaus-Verstärkung
- Anstiegsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung (slew rate)
- Verzögerung zwischen Ein- und Ausgangssignal

Für die Simulation des dynamischen Verhaltens nimmt man als Basis das Modell des 3-stufigen OPVs.

