Ein Bild, das Diagramm, Plan enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

1. DC-Analyse: , , ,

2. AC-Kleinsignalparameter: , ,

|  |  |
| --- | --- |
| **ohne** | **mit ( wird kleiner)** |
| (ohne !)    🡪 da bzw. :  🡪 da :   🡪 da :    🡪 da :  🡪 da :  🡪 da :      Amplitudengang zeichnen: 1. Gerade im Bandpass einzeichnen 2. fallende Gerade 1. Ordnung zw. beiden Grenzfrequ. 3. fallende Gerade 2. Ordnung | 🡪 da :  (Großsignal: , steigende Frequ.: )      🡪 höchster Wert ist untere Grenzfrequenz der Schaltung |

**0. Allgemeines**

,

grundsätzlich:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Eingangsimpedanz | Ausgangsimpedanz |
| Emitterschaltung ohne CE: | sehr hoch | hoch |
| Emitterschaltung mit CE: | hoch | hoch |
| Kollektorschaltung: | hoch | niedrig |
| OPV | hoch | niedrig |

Ein Bild, das Text enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**1. Emitterschaltung**

bei einer T-Erhöhung von 1°C erhöht sich oder um 6,5% 🡪 Verdoppelung bei   
🡪 Ziel: Spannung verkleinern wenn T steigt, damit stabil bleibt

|  |  |
| --- | --- |
| Mgl. 1: Spannungsgegenkopplung | Mgl. 2: Stromgegenkopplung |
| Ein Bild, das Diagramm, Plan enthält.  Automatisch generierte Beschreibung | Ein Bild, das Diagramm, Plan enthält.  Automatisch generierte Beschreibung |
| sinkt bei steigendem , da Teil der Ausgangsspannung über rückgekoppelt wird | steigt bei steigendem ,  damit sinkt  T-Abhängigkeit:  🡪 wenn steigt, sinkt T-Abhängigkeit |

Reihenfolge Synthese:

1. Transistor-Daten sind bekannt
2. festlegen
3. DC-Analyse (Ziel: hohes ):
   1. und
4. untere Grenzfrequenz wissen + dominanten C bestimmen

🡪 Entweder Eingangs- od. Ausgangshochpass dominant, Verschiebung untere Grenzfrequ. um Faktor 10 nach links

(wenn 🡪 Hochpass 2. Ordn. 🡪 )

**2. Systemmodell / AC-Kopplung**

Eingangsimpedanz ist Belastung der Signalquelle (möglichst groß)

Ausgangsimpedanz ist v. Ersatzquelle u. damit Maß für Treiberfähigkeit (möglichst klein)  
🡪 Schaltung idR nicht rückwirkungsfrei, d.h. von Last abhängig u. von Generator abh.

DC-AC-Kopplung

Ein- u. Ausgangssignale sollten DC-frei vorliegen 🡪 Koppelkondensatoren für Hochpass

Ein Bild, das Diagramm enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**Wirkungsgrad**

Ein Bild, das Text, Screenshot, Schrift, Reihe enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Leistung am Verbraucher:

Leistung der Stromquelle: (mit = DC-Betriebsspannung)

Leistung +Spannungsquelle:

Leistung -Spannungsquelle:

Verlustleistung Transistor:   
🡪 bei Vernachlässigung ergibt sich:   
🡪 wird maximal bei 🡪 🡪   
🡪 Stromquelle max. aussteuerbar bis 🡪   
**🡪 sehr niedrig!!** (typ. bei Klasse-A-Verstärkern max. 25%) 🡪 Lösung: Gegentakt-Endstufe

**3. Kollektorschaltung / Endstufe**

A-Betrieb:

**🡪 evtl. inkl. u. berücksichtigen**

Ein Bild, das Diagramm, technische Zeichnung, Plan, Text enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ein Bild, das Diagramm, Text, Plan, technische Zeichnung enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**Gegentakt-Endstufe** (Klasse-B-Verstärker) **AC-Analyse nicht geeignet!**

(außer wenn 🡪 Übernahmeverzerrung)

Voraussetzung:

Aussteuerbarkeit:

Großsignal-Eingangswiderstand: (je für npn u. pnp; bei Übernahme:

Großsignal-Ausgangswiderstand: (je für npn u. pnp; bei Übernahme:

Leistungsberechnung: nur wenn kann Übernahmebereich vernachlässigt werden!

(Transistor-Verstärkungen müssen gleich sein!)

🡪

🡪 maximal bei   
🡪   
🡪 (maximaler Wirkungsgrad

mögliche Lösung, um Übernahmeverzerrung zu vermeiden: Klasse AB 🡪 für )

Ein Bild, das Diagramm, Reihe, technische Zeichnung, Plan enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**Emitterschaltung + Kollektorschaltung** *(nötig wenn Last kleiner als )*

für hohe Spannungsverstärkung (auf Seiten Emittersch.) muss

Ein Bild, das Text, Diagramm, Plan, technische Zeichnung enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Stromeinstellung über

**Aussteuerbarkeit**

nach oben bis: (da sein muss)

nach unten bis:   
🡪 Betragsmäßig kleinster Wert zählt 🡪 **Problem**: untere Grenze von abhängig  
🡪 Option 1: erhöhen 🡪 Problem: höhere Verluste an   
🡪 Option 2: durch hochohmige Stromquelle ersetzen 🡪 Emitterschaltung od. Stromspiegel

**Mittlere Verstärkerstufe**

kleiner Signal-Strom Eingangsstufe in hohe Ausgangsspannung umgesetzt:

C für interne Frequenzgang-Kompensation (damit g irgendwann wird), v.a. Einstellung dominanter der U-Verstärkung 🡪 garantiert Stabilität bei externer Gegenkopplung

**Endstufe**

meist Gegentakt-Endstufe; ; sehr kleiner Ausgangswiderstand

**4. Operationsverstärker**

**Grundlagen**

Vorteile: hochohmiger Eingang u. niederohmiger Ausgang; als IC; geringer Platzbedarf  
Nachteile: Bandbreite begrenzt; hohes Rauschen bei hohen Frequ.; nicht als Schalter geeignet

Ein Bild, das Diagramm, Text, Plan, technische Zeichnung enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**Gegenkopplung**

im Linear-Bereich: (da sehr hoch, nur mit Gegenkopplung realisierbar)

OPVs zeigen meistens PT1-Verhalten mit sehr kleiner Eckfrequenz

Transitfrequenz = Frequenz, bei der Verstärkung auf 1 abgefallen ist

nur allgemein und für nicht-invertierend gültig:  
 Übertragungsfunktion:

(mit )  
 🡪 wenn :

Grenzfall: 🡪 definiert Betriebsgrenzfrequenz (je nach unterschiedl)  
🡪 (da bei 🡪 ) 🡪

allgemein: ( ist Impedanz im Rückkopplungspfad!)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **nicht-invertierend** | **invertierend** |
|  |  |  |
| Normalbetr. (): |  |  |
| Vorwärtsbetr. (): |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

Stabilität: offene Schleifenverstärk. betrachten 🡪 bei Phasendrehung 🡪 Mitkopplung  
Stabilitätsuntersuchung: Durchtrittsfrequenz (wo ) ermitteln, dort muss   
robust stabil =   
schneller OPV kann schlecht sein da Gefahr der Instabilität durch Phasendrehung

Ein Bild, das Diagramm, Reihe, parallel, Kreis enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ein Bild, das Diagramm, Plan, technische Zeichnung, Text enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ein Bild, das Diagramm, Text, Plan, technische Zeichnung enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**Differenzstufe**

Voraussetzung:   
Q1 u. Q2 sowie RC1 und RC2 ideal identisch

Differential Mode:

Ein Bild, das Diagramm, Plan, technische Zeichnung, Reihe enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Differenzverstärkung: (Herleitung über Knoten C1 u. C2)

Eingangswiderstand: (da fließt dort kein Strom)

Common Mode:

Gleichtaktverstärkung:   
 (da 🡪 )

Eingangswiderstand:

Qualität der Gleichtaktsignalunterdrückung:

„Common Mode Rejection Ratio“:

Ein Bild, das Text, Reihe, Diagramm, Zahl enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**OPV: Schaltungssynthese**

1. Wenn gegeben, u. bestimmen (zw. u. , um Ruheströme zu minimieren)  
2. Eingangsimpedanz prüfen (invertierende Schaltung für hohes nicht so gut)  
3. Bandbreite prüfen (invertierend nicht-invert., da durch Spannungsteiler minimiert)  
4. Offset-Fehler prüfen = Ruhestromkompensation = gleiches an beiden Eingängen:   
 🡪 sollte möglichst gering sein!

Ein Bild, das Reihe, Diagramm, Text, Screenshot enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

|  |  |
| --- | --- |
| Integrierer Frequenzbereich:  Zeitbereich: |  |
| Integrierer mit Parallelwiderstand 🡪 anpassen der Integrationszeit, sodass OPV nicht so schnell in Begrenzung geht 🡪 bei kleinen Frequenzen: invert. Verstärk.  Duty-Cycle:  Schaltfrequenz muss größer als  Ausgangsrippel über Integral u. Flächeninhalt berechenbar |  |
| U-I-Wandler (invertierend)  Nachteil:  Quelle wird mit Laststrom belastet |  |
| U-I-Wandler (nicht-invertierend) |  |

**Fortsetzung: Nicht-lineare OPV-Schaltungen**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Aktiver Gleichrichter 1    Nachteil:  OPV bei negativer Halbwelle übersteuert  🡪 wenig Bandbreite/schlechtes Zeitverhalten | Aktiver Gleichrichter 2  neg. : invertierender U-U mit  pos. : D2 sperrt 🡪  Vorteil: mehr Bandbreite, da n. übersteuert  Nachteil: invertierend; 2 Dioden nötig; geringer | |
| Komparator  Vergleich mit  wenn 🡪  Problem: falls linearen Bereich langsam durchläuft u. verrauscht ist, unplanmäßiges hin- u. herschalten |  | |
| Schmitt-Trigger unplanmäßiges hin- u. herschalten wird durch Hysterese vermieden  🡪 realisiert durch Mitkopplung | |  |

**Achtung! OPV Komparator:**  
Komp. kennt nur high u. low an Ausgang, keine Frequenzkompensation (C in mittlerer Stufe) für hohe Flankensteilheit, daher nicht mit Gegenkopplung betreibbar!  
OPVs sind für Gegenkopplung ausgelegt, bei Betrieb ohne Gegenkopplung langsame Schaltzeiten u. erhöhter Stromverbrauch

|  |  |
| --- | --- |
| I-U-Wandler (Transimpedanzwandler)  Transimpedanz    Vorteile:   * kleiner Eingangswiderstand 🡪 große Bandbreite * Fotostrom fließt durch 🡪 hohe Empfindlichkeit |  |

**Nicht-lineare OPV-Schaltungen (keine AC-Analyse, da nur Großsignalverhalten relevant)**🡪 nicht mehr durch lineare ÜFK beschreibbar  
🡪 Variante 1: OPV in linearem Bereich (Gegenkopplung, Prinzip d. virtuellen Masse), Rückkopplung nicht linear (zB Diode)  
🡪 Variante 2: OPV nicht mehr linear, sondern in Begrenzung (Komparator, Schmitt-Trigger)

|  |  |
| --- | --- |
| Logarithmierer |  |
| Exponentierer |  |

**TP Multible Feedback (MFB) (= 2. Ordnung)**

: Sallen-Key besser, da sehr exakt 1  
: MFB besser, da Güte wenig Toleranz

Ein Bild, das Diagramm, Reihe, technische Zeichnung, Plan enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ein Bild, das Reihe, Diagramm, Text, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**TP Sallen-Key (= 2. Ordnung)**

(Bild oben)

(Bild unten)

(Bild oben: mit )

hohe Frequenzen: C’s als Kurzschluss 🡪   
Ein Bild, das Text, Reihe, Diagramm, Zahl enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ein Bild, das Diagramm, Reihe, technische Zeichnung, Plan enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ein Bild, das Diagramm, Reihe, technische Zeichnung, Plan enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**Aktive Filter (idR nötig für < 1 MHz)**  
Hintergrund: TP2 durch 2x RC-TP in Reihe 🡪 Belastung des ersten TP durch zweiten  
🡪 wäre Lösung, Schaltung allerdings schnell sehr hochohmig  
🡪 besser: OPV als Impedanzwandler dazwischen  
Ein Bild, das Diagramm, Reihe, technische Zeichnung, Plan enthält.

Automatisch generierte Beschreibung  
🡪 Problem: **nur Güte < 0.5 möglich**, da keine konj. komplexen Polpaare möglich

Ein Bild, das Diagramm, Reihe, parallel, technische Zeichnung enthält.

Automatisch generierte Beschreibung  
DB = Durchlassbereich, SB = Sperrbereich

*Bessel:* flacher Übergang DB zu SB, dafür linearer Phasengang im DB 🡪 geringe Phasenverzerrung

*Butterworth:* mäßig steiler Übergang DB zu SB, maximal flacher Amplitudengang im DB, schwach schwingende Sprungantwort (Güte = 0,7)

*Tschebyscheff:* sehr steiler Übergang DB zu SB, dafür stark schwingende Sprungantwort (Resonanzüberhöhung)

**5. Filter**

**Normalformen jeder passive RC-Filter 1. Ord. hat Güte = 0,5, ab 2. Ord. < 0,5**

Tiefpass 1. Ord.: (mit = Verstärk. bei f = 0Hz, = charakt. Fr.)

TP 2. Ord.: (Q beschreibt Reson.überhöh. @ )  
🡪 Transformation TP-HP durch Spiegelung Frequenzgang an u. Ersetzen durch in ÜFK

HP 1. Ord.: (mit = Verstärk. bei )

HP 2. Ord.: (Q beschreibt Reson.überhöh. @ )  
  
für HP/TP 2. Ordnung gilt:

Überhöhung bei Resonanzfrequenz:   
Phase bei Resonanzfrequenz: HP2: +90°, TP2: -90°

Zusammenhang u. :   
TP2: HP2:

|  |  |
| --- | --- |
| Ein Bild, das Reihe, Text, Diagramm, Schrift enthält.  Automatisch generierte Beschreibung | Ein Bild, das Reihe, Diagramm, Text, Steigung enthält.  Automatisch generierte Beschreibung |

**Aktive Bandsperre**Addition von HP u. TP:

Mittenfrequenz: (geometr. AVG)

Güte:

einfache Version mit Q < 0,2:

Ein Bild, das Diagramm, Plan, technische Zeichnung, Reihe enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

für Q > 0,5 Sallen-Key- od. MFB-Konfiguration nötig

zur Unterdrückung einzelner Frequenzen 🡪 Notch-Filter:

Ein Bild, das Diagramm, Plan, technische Zeichnung, Reihe enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ein Bild, das Reihe, Diagramm, Text, parallel enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**HP Sallen-Key / MFB**🡪 R und C vertauschen  
Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, parallel enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**Aktiver Bandpass-Filter (immer 2./4./6./… Ordnung!)**Kaskadierung von HP u. TP:

Mittenfrequenz: (geometr. AVG)

Güte:

einfache Version mit Q < 0,5:

Ein Bild, das Diagramm, Reihe, technische Zeichnung, Plan enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

für Q > 0,5 Sallen-Key- od. MFB-Konfiguration nötig:

Ein Bild, das Diagramm, Reihe, Plan, technische Zeichnung enthält.

Automatisch generierte Beschreibung (hier MFB)

ÜFK:   
  
Verstärkung bei :   
 (mit

**Aktive Filter höherer Ordnung** (Kaskadierung!)  
Filter n-ter Ord. wird in konj. komplexe Polpaare aufgeteilt, welche dann mit Sallen-Key od. MFB realisiert werden  
🡪 n/2 Filterstufen nötig  
Notwendiges GBW:   
Ein Bild, das Text, Reihe, Diagramm, Zahl enthält.

Automatisch generierte Beschreibung(x100 da Phase früh abfällt)

**mit MOSFET**

Kleinsignal-ESB/MOSFET-Betriebsarten:

Ein Bild, das Text, Screenshot, Diagramm, Reihe enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ein Bild, das Diagramm, Text, Reihe, Plan enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Schaltverhalten:

Bereich 1: aufladen (Totzeit – 2,5nC)

Bereich 2: entladen (6,5nC)

Bereich 3: weiter aufladen bis minimal (22nC)  
  
Stromquelle: Einschaltzeit   
Spannungsquelle mit :   
(mit mittlerer berechnen)  
  
 (Näherung durch Dreieck)  
   
Wirkungsgrad:   
Fazit: prop. zu ; je geringer , desto schneller / u. desto geringer

Ein Bild, das Text, Reihe, Diagramm, Quittung enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**mit BJT**

Ein Bild, das Diagramm, Reihe, technische Zeichnung, Plan enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Sättigungsbereich beginnt wenn 🡪   
Vorteil: Transistor sehr niederohmig, da

Übersteuerung: (2..6)  
Synthese: ü 🡪 🡪 🡪 🡪

Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, parallel enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Verkürzung Schaltzeit:   
- negativ statt   
- Diode parallel zu (Anode Richtung Basis)   
(schnelleres Ausräumen v. Überschussladungsträgern)  
- Miller-Effekt: Kondensator über

**!!!**

**6. Transistor als Schalter**

**Linear geregelte DC-DC-Wandler**

Vorteil: keine Oberwellen im stationären Betr., kaum Störung auf , einfache Implement.

Nachteil: Differenzspannung als Verlust, nur für kleine Leistungen, schlechter Wirkungsgrad

**Getaktete DC-DC-Wandler**

zB OPV als Integrierer mit und Puls als

**Getaktete DC-DC-Wandler (Step-Down)**

Ein Bild, das Text, Diagramm, Plan, parallel enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

(nur gültig im **nicht-lückenden** Betrieb, da u. vernachlässigbar!)  
   
 (je größer bzw. , desto geringer Welligkeit)  
🡪 (typ. (0,5 Untergrenze damit L nicht zu groß))  
 (je größer , desto kleiner muss sein)  
🡪 🡪

CCM (Continuous Conduction Mode): stets 🡪   
DCM (lückender Betrieb): wird während Null 🡪

**Synchron DC-DC-Wandler**Diode durch MOSFET ersetzen 🡪 geringer u. damit besser

**Effizienzbetrachtung**

* je höher , desto kleiner und möglich (Platzbedarf)
* je höher , desto kleiner Welligkeiten (wenn und unverändert)
* je höher , desto größer Verluste (MOSFETs, Diode, , ) 🡪 sinkt
* für hohen : kleiner , kleiner , schnelles Durchschalten MOSFET

**7. DC-DC-Wandler**