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

**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 | T-Abhängigkeit:  🡪 wenn steigt, sinkt T-Abhängigkeit |
| sinkt bei steigendem , da Teil der Ausgangsspannung über rückgekoppelt wird |  |  |

Reihenfolge Synthese:

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

Ein Bild, das Diagramm, Plan enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

1. DC-Analyse: , , ,

2. AC-Kleinsignalparameter: , ,

**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

🡪 Entweder Eingangs- od. Ausgangshochpass dominant, Verschiebung untere Grenzfrequ. um Faktor 10 nach links (wenn 🡪 HP 2. Ord. 🡪 )

**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 )

**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

**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

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

Automatisch generierte Beschreibung

**7. DC-DC-Wandler**

**Wirkungsgrad**

Leistungsbilanz: Wirkungsgrad:

Leistung am Verbraucher: Leistung der Stromquelle:

Leistung Spannungsquellen:

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

**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)**

(nur gültig im **nicht-lückenden** Betrieb, da u. vernachlässigbar!)

(je größer bzw. ,   
desto geringer Welligkeit)  
🡪   
(typ.   
(> 0,5 damit L nicht zu groß))  
  
   
(je größer , desto kleiner muss sein)   
🡪 🡪

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

Automatisch generierte Beschreibung

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

**4. Operationsverstärker**

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 Instabilität durch Phasendrehung

|  |  |
| --- | --- |
| 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  für hohe Frequenzen: |  |
| U-I-Wandler (invertierend)  Nachteil: Quelle wird mit Laststrom belastet | U-I-Wandler (nicht-invertierend) |

**Grundlagen**

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

**Differenzstufe**

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

Differential Mode:

Differenzverstärkung: (Herleitung über Knoten C1 u. C2)

Eingangswiderstand: (da fließt dort kein Strom)

Common Mode:

Gleichtaktverstärkung: (da 🡪 )

Eingangswiderstand:

Qualität der Gleichtaktsignalunterdrückung:

**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

**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 :

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

Automatisch generierte Beschreibung

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

Automatisch generierte Beschreibung

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

Automatisch generierte Beschreibung

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

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 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 |  |

**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!

**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 |
| 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 | |

**5. Filter**

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)

**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

**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 |

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

**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

**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

Schaltverhalten:

Bereich 1: aufladen (Totzeit – 2,5nC)

Bereich 2: entladen (6,5nC)

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

**..Fortsetzung Aktive Bandsperre**

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

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

**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

**6. Transistor als Schalter**

**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 🡪 🡪 🡪   
🡪

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

**!!!**

**Aktive Bandsperre 🡪** Addition:

Mittenfrequenz: (geometr. AVG)

Güte:

einfache Version mit Q < 0,2:

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

Automatisch generierte Beschreibung