Audioschaltungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Sven Tschirley

Version 16. Mai 2024

Mehrstufige Verstärker

Berliner Hochschule für Technik

Notizen

Aufbau von mehrstufigen Verstärkern

Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld

Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen

Miller-Effekt in Transistorschaltungen

Eingangsstufen

Treiberstufen

Leistungsendstufen

Literatur

Notizen

Ziele

Aufbau von mehrstufigen Verstärkern
Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld
Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen
Miller-Effekt in Transistorschaltungen
Eingangsstufen
Treiberstufen
Leistungsendstufen
Literatur

Lernziele

- Realisierung von Verstärkerschaltungen für verschiedene Anwendungen
- Funktionsweise von Verstärkerschaltungen für Kleinsignal- und Großsignalanwendungen
- Aufbau mehrstufiger Verstärkerschaltungen
  - Realisierung von Eingangsstufen
  - Realisierung von Leistungsendstufen
- Innerer Aufbau von Operationsverstärkern

Notizen

Literaturtipps

Aufbau von mehrstufigen Verstärkern
Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld
Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen
Miller-Effekt in Transistorschaltungen
Eingangsstufen
Treiberstufen
Leistungsendstufen
Literatur

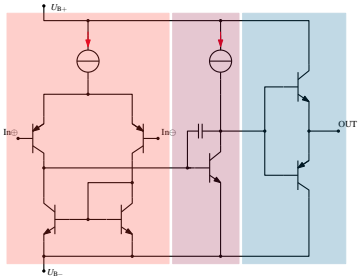
Hilfreiche Literatur

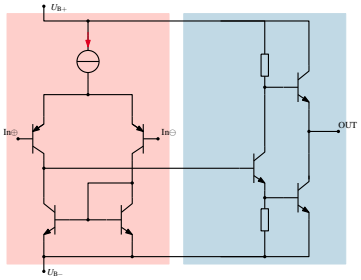
- [Goßner 2019] behandelt die Grundschaltungen für Klein- und Großsignalanwendungen
- [Göbel 2006a] beschreibt den Aufbau von Differenz- und Endstufen und geht detailliert auf die aus dem Aufbau resultierenden Eigenschaften ein
- [Tietze und Schenk 2011] bietet einen Überblick.
- [Self 2010] und [Self 1998] sind umfassend für den Bereich der Schaltungstechnik für Audioapplikationen
- [Slone 1999] beinhaltet komplette Endstufenprojekte in allen Leistungsklassen.

Notizen

Rückblick: Grundlegender Aufbau von mehrstufigen Verstärkern

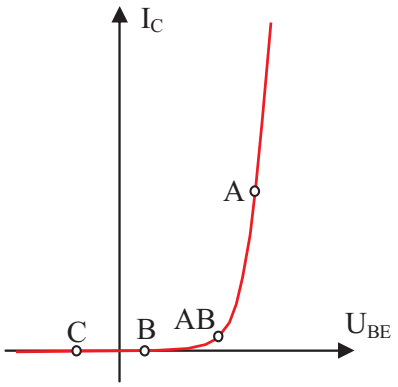
- Großsignalverstärker werden mehrstufig ausgeführt
  Warum?
- Die dreistufige Struktur ist am weitesten verbreitet
  - Eingangsstufe als differenzielle Transkonduktanzsstufe:
    Eingangsspannung wird zu Ausgangsstrom
  - Treiberstufe als spannungsverstärkende Transimpedanzstufe:
    Strom wird in Spannung umgesetzt
  - Endstufe mit Spannungsfolgern zur Stromverstärkung



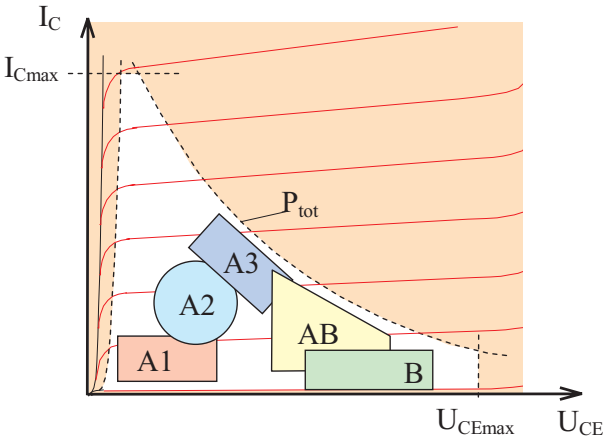


Notizen

Rückblick: Verschiedene Verstärkerbetriebsarten und ihre Arbeitspunkte



Arbeitspunkte auf der Spannungssteuerkennlinie



Lage der Arbeitspunkte im Ausgangskennlinienfeld

Notizen

Rückblick: Verstärkerarten

Aufbau von mehrstufigen Verstärkern
Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld
Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen
Miller-Effekt in Transistorschaltungen
Eingangsstufen
Treiberstufen
Leistungsendstufen
Literatur

Kleinsignalverstärker

- Vorverstärker, Signalaufbereitung
- der Arbeitspunkt liegt weit von Verlustleistungshyperbel entfernt
- es fliessen kleine Ströme
- thermische Probleme meist vernachlässigbar

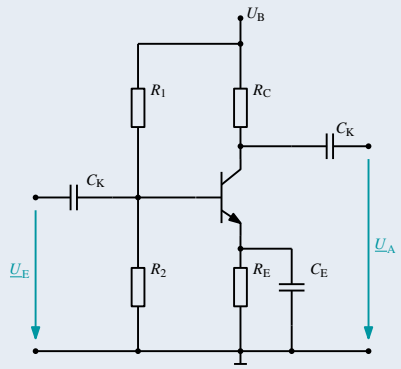
Großsignalverstärker

- Endstufen
- Arbeitspunkt liegt in der Nähe der Verlustleistungshyperbel
- es fließen große Ströme
- thermische Probleme müssen unbedingt berücksichtigt werden
- Volle Aussteuerung führt möglicherweise zu Nichtlinearitäten

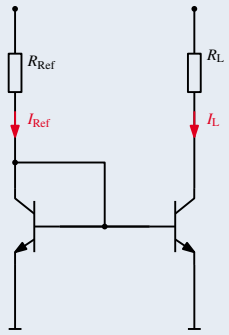
Notizen

Rückblick: Funktionsblöcke

Emitterschaltung

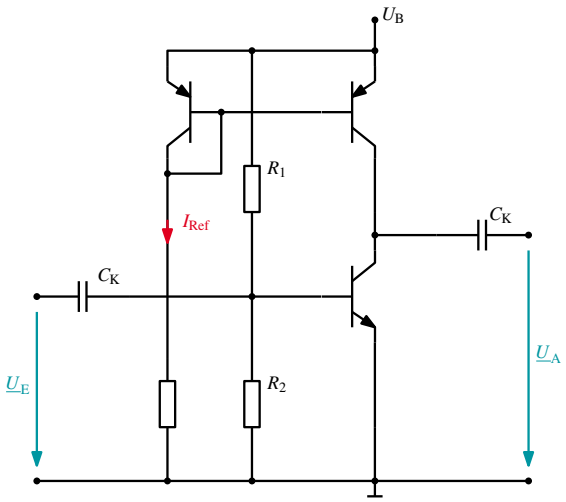


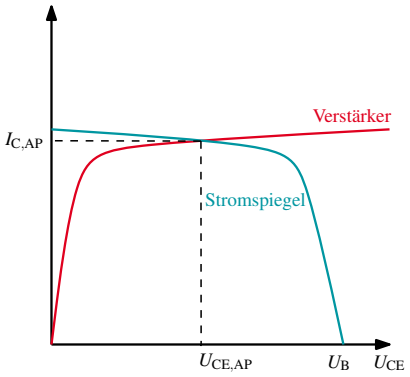
Stromspiegel



Notizen

Rückblick: Stromspiegel bei der Arbeitspunkteinstellung

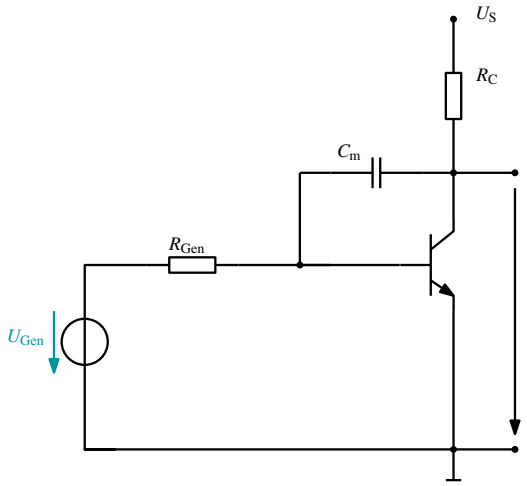




Wie wird ein möglichst *guter* Stromspiegel realisiert?

Notizen

Der Miller-Effekt in Transistorschaltungen



- C_m steht stellvertretend für die Kapazitäten zwischen Kollektor und Basis
  bzw. Drain und Gate beim MOSFET
  bzw. Kollektor und Gate beim IGBT

Notizen

Rückblick in die Netzwerktheorie: Satz von Miller

Aufbau von mehrstufigen Verstärkern
Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld
Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen
Miller-Effekt in Transistorschaltungen
Eingangsstufen
Treiberstufen
Leistungsendstufen
Literatur

Geschichtliches

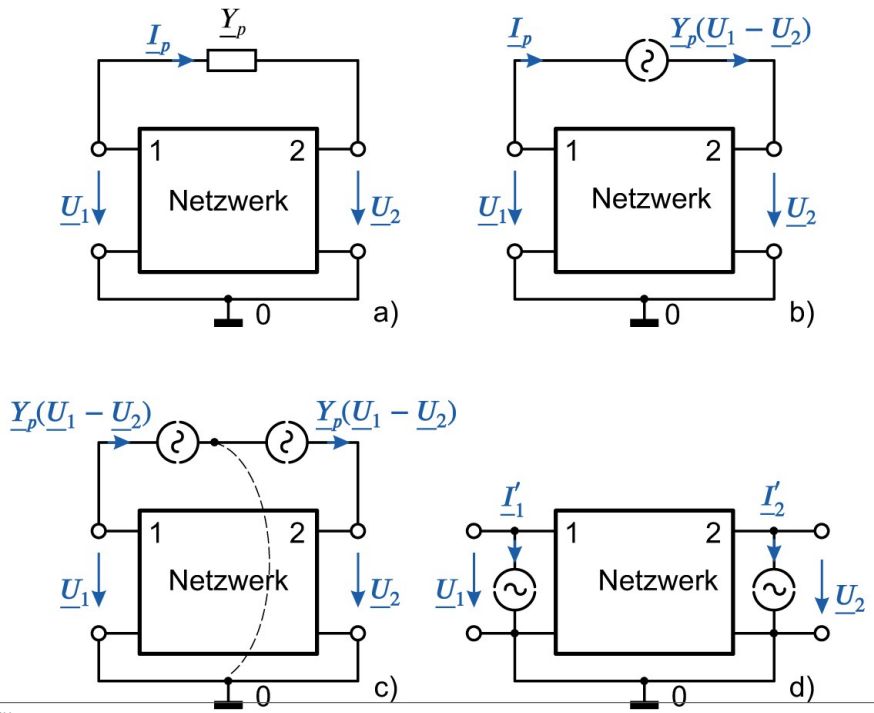
- Miller wies 1919 Zusammenhang zwischen Eingangskapazität und Spannungsverstärkung an Verstärkern mit Elektronenröhren nach
- Effekt kann durch Maschen- und Knotensätze beschrieben werden (1968, Cherry und Hooper)

Rückblick in die Netzwerktheorie: Anwendung

- Beschreibung der Wirkung einer in jedem Verstärker auftretenden Kapazität zwischen Ein- und Ausgang
- Beschreibung der Wirkung einer Streuinduktivität einer gemeinsamen Masseleitung

Notizen

Rückblick in die Netzwerktheorie: Ersatz einer Paralleladmittanz $\underline{Y}_p$



Notizen

Rückblick in die Netzwerktheorie: Ersatz einer Paralleladmittanz $\underline{Y}_\mathrm{p}$

Schrittweise:

1. Ersetzen der Paralleladmittanz $\underline{Y}_\mathrm{p}$ durch eine spannungsgesteuerte Stromquelle $\underline{Y}_\mathrm{p}(\underline{U}_1 - \underline{U}_2)$
2. Teilen der Stromquelle in zwei gleiche Stromquellen $\underline{Y}_\mathrm{p}(\underline{U}_1 - \underline{U}_2)$
3. Verlagern des Verbindungsknotens auf das Erdpotenzial

➡ Resultat ist eine Schaltung mit zwei gesteuerten Stromquellen je am Eingang und am Ausgang, die Verbindung zwischen Ein- und Ausgang ist aufgehoben

Notizen

Rückblick in die Netzwerktheorie: Betrachtung der Ströme

Für die Ströme gilt

$$\begin{aligned}\underline{I}_1' &= \underline{Y}_\mathrm{p}(\underline{U}_1 - \underline{U}_2)\\ &= \underline{Y}_\mathrm{p}(1 - \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1})\underline{U}_1\\ &= \underline{Y}_\mathrm{p}(1 - \underline{V}_U)\underline{U}_1\end{aligned}$$

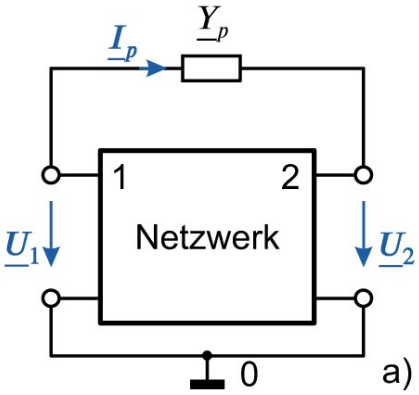
$$\begin{aligned}\underline{I}_2' &= -\underline{Y}_\mathrm{p}(\underline{U}_1 - \underline{U}_2)\\ &= \underline{Y}_\mathrm{p}(1 - \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2})\underline{U}_2\\ &= \underline{Y}_\mathrm{p}(1 - \frac{1}{\underline{V}_U})\underline{U}_2\end{aligned}$$

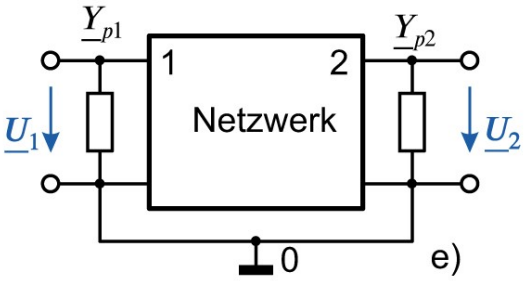
Definition (Spannungsvestärkung)

Der Ausdruck $\underline{V}_U = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1}$ ist die komplexe Spannungsverstärkung

Notizen

Rückblick in die Netzwerktheorie: Ersatz einer Paralleladmittanz $\underline{Y}_p$





Notizen

Rückblick in die Netzwerktheorie: Betrachtung der Admittanzen

Admittanzen

$$\underline{Y}_{p1} = \frac{\underline{I}_1'}{\underline{U}_1} = \underline{Y}_\mathrm{p}(1 - \underline{V}_U) \quad \text{und} \quad \underline{Y}_{p2} = \frac{\underline{I}_2'}{\underline{U}_2} = \underline{Y}_\mathrm{p}(1 - \frac{1}{\underline{V}_U}) \tag{1}$$

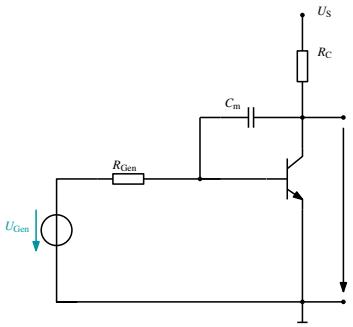
Rückblick in die Netzwerktheorie: Zusammenfassende Betrachtungen

➡ Ist $\underline{Y}_\mathrm{p} = j\omega C_P$ und $V_\mathrm{U} \approx 100$, so wird am Eingang des Netzwerkes eine Parallelkapazität wirksam, die um den Faktor V_U größer ist als die Kapazität zwischen Ein- und Ausgang.

- Die Parallelkapazität wird auch als Rückwirkungskapazität bezeichnet

Notizen

Der Miller-Effekt in Transistorschaltungen



- Die Eingangskapazität C_{in} ist

$$C_{in} = C_m \cdot (1 - V_U) = C_m \cdot (1 + |V_U|) \tag{2}$$

  wobei $V_U < 0$ gilt.
- Resultat ist
  - die Begrenzung der Bandbreite in Verstärkern (wird im Operationsverstärker aber bewusst eingesetzt)
  - die Verlängerung der Schaltzeiten im Schaltbetrieb
  - ➡ Abhilfe: Kaskodenschaltung

Notizen

Eingangsstufe eines Verstärkers

Aufbau von mehrstufigen Verstärkern
Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld
Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen
Miller-Effekt in Transistorschaltungen
Eingangsstufen
Treiberstufen
Leistungsendstufen
Literatur

Rolle der Eingangsstufe

- Eingangsstufe realisiert die Differenzbildung von Eingangssignal und rückgekoppeltem Signal
- Verarbeitung von kleinen Signalen muss gewährleistet werden
- Rauscharmes Design ist notwendig
- Realisiert eine Anpassung an Signalquelle
- ggf. mit geringstem Eingangsstrom (Operationsverstärker)

➡ Differenzverstärker

Notizen

Einfacher Differenzverstärker

Aufbau von mehrstufigen Verstärkern

Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld

Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen

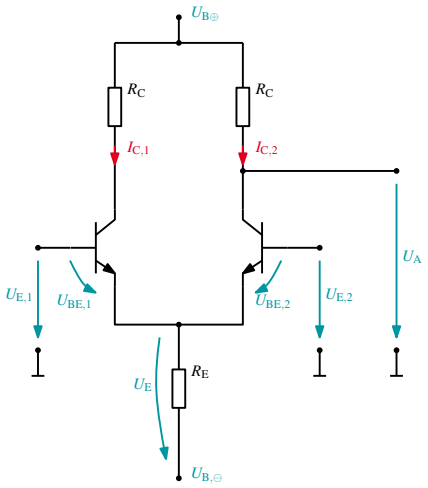
Miller-Effekt in Transistorschaltungen

Eingangsstufen

Treiberstufen

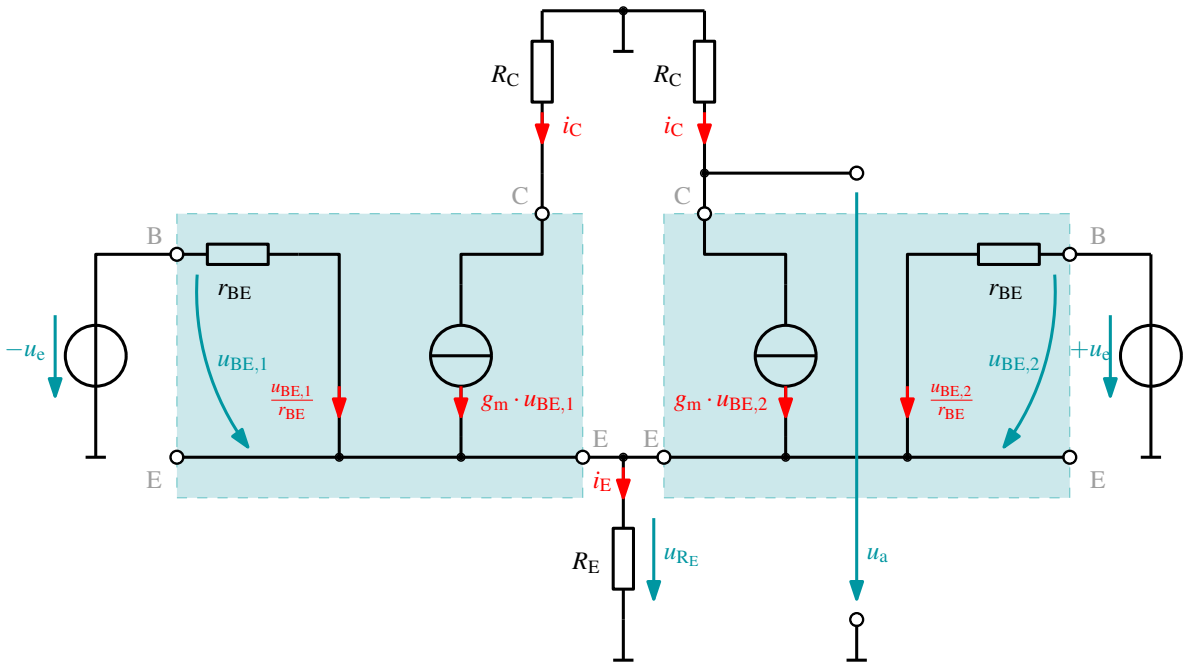
Leistungsendstufen

Literatur



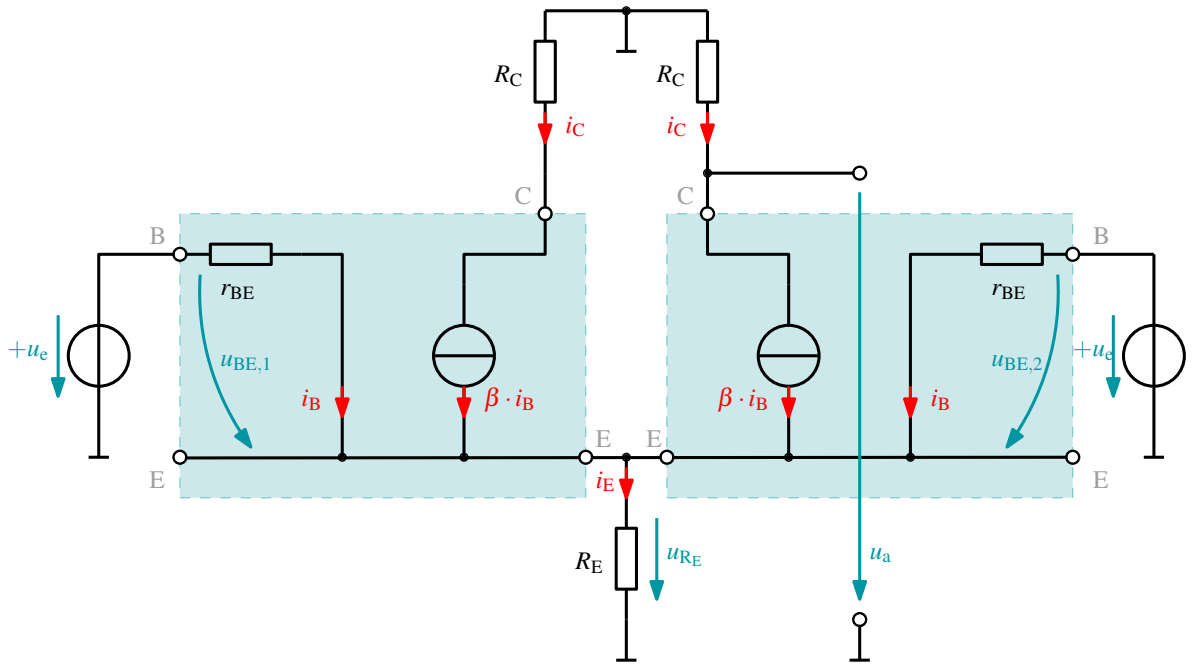
Notizen

Rückblick: Differenzverstärker – Bestimmen der Differenzverstärkung $V_{\mathrm{U,D}}$



Notizen

Rückblick: Differenzverstärker – Bestimmen der Gleichtaktverstärkung $V_{\mathrm{U,G}}$



Notizen

Zusammenfassung

Aufbau von mehrstufigen Verstärkern
Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld
Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen
Miller-Effekt in Transistorschaltungen
Eingangsstufen
Treiberstufen
Leistungsendstufen
Literatur

Differenzverstärkung

$$V_{\mathrm{U,D}} = -g_{\mathrm{m}} \cdot R_{\mathrm{C}}$$

Gleichtaktverstärkung

$$V_{\mathrm{U,G}} = -\frac{R_{\mathrm{C}}}{2\,R_{\mathrm{E}}}$$

Gleichtaktunterdrückung

$$V_{\mathrm{CMRR}} = \frac{V_{\mathrm{U,D}}}{V_{\mathrm{U,G}}} = 2\,g_{\mathrm{m}}\,R_{\mathrm{E}}$$

Notizen

Weitere Strukturen von Differenzverstärkern

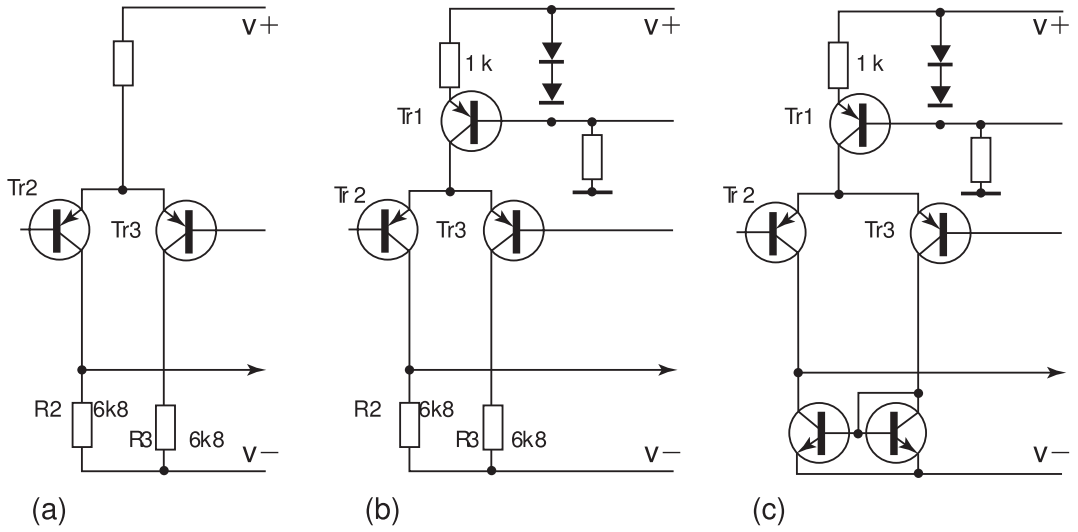


Bild [Self 1998]

Notizen

Weitere Strukturen von Differenzverstärkern

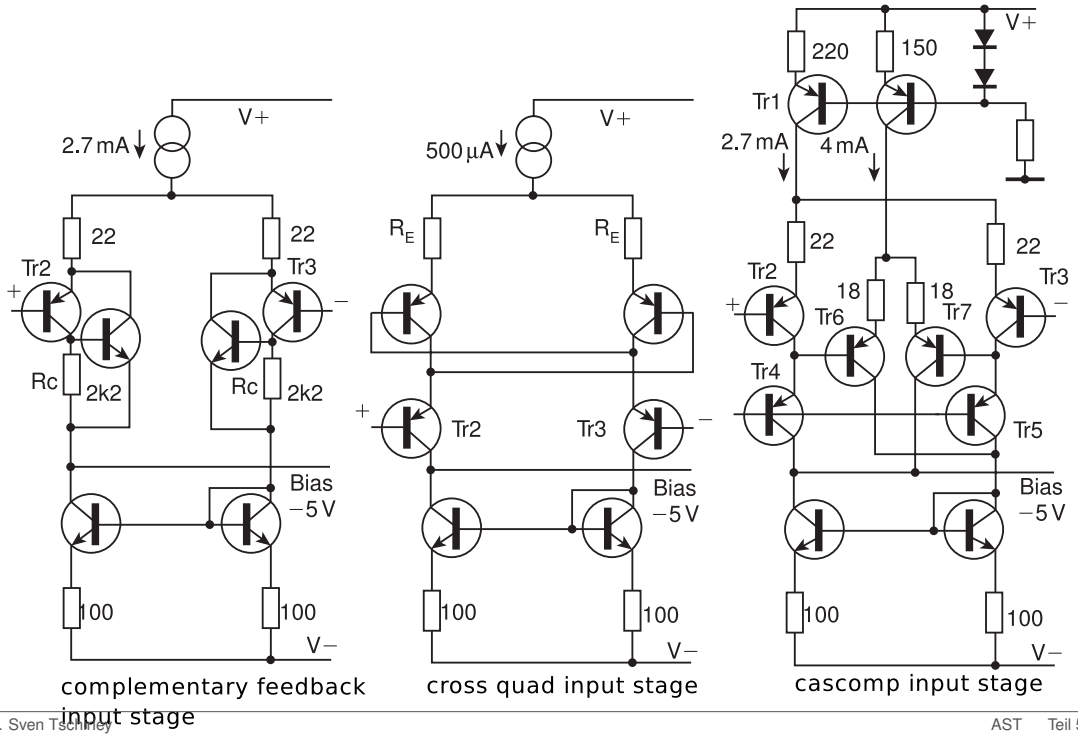
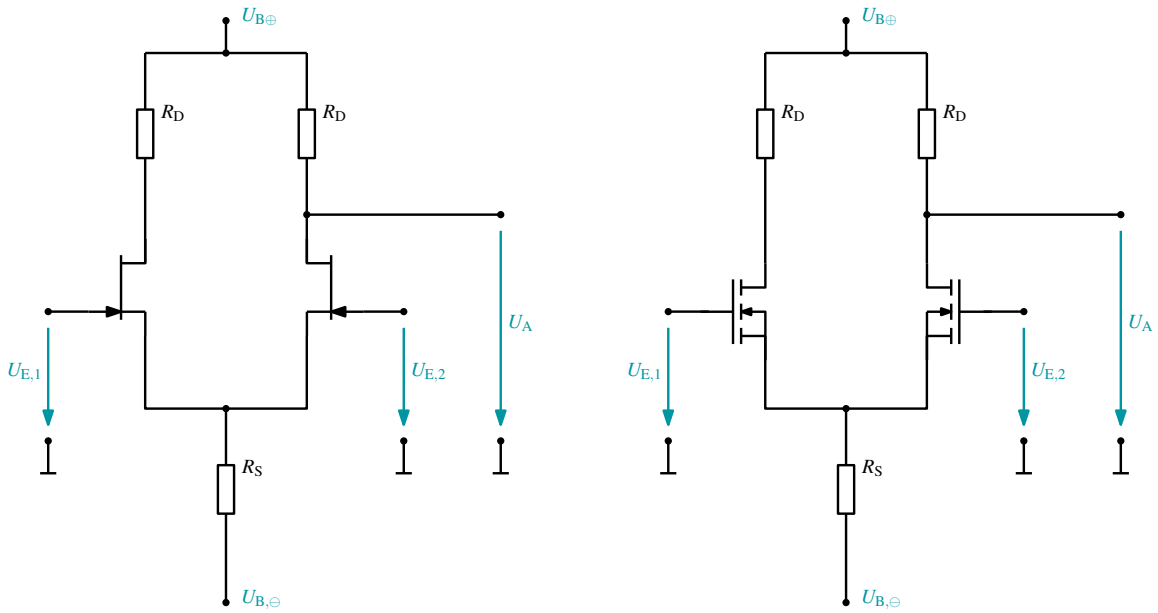


Bild [Self 1998]

Notizen

Eingangsstufen mit anderen Transistoren



Aufbau von mehrstufigen Verstärkern
Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld
Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen
Miller-Effekt in Transistorschaltungen
Eingangsstufen
Treiberstufen
Leistungsendstufen
Literatur

Notizen

Realisierung der Teiberstufe

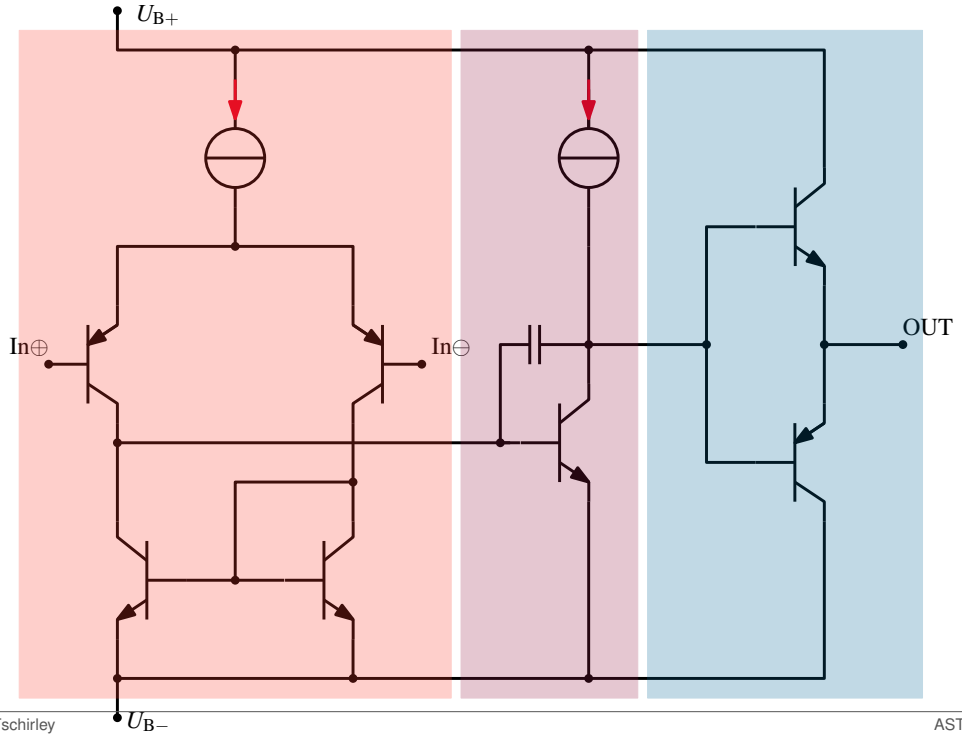
Aufbau von mehrstufigen Verstärkern
Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld
Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen
Miller-Effekt in Transistorschaltungen
Eingangsstufen
Treiberstufen
Leistungsendstufen
Literatur

Anforderungen

- Realisierung der Spannungsverstärkung
- Design darf kein Rauschen und keine Verzerrungen einbringen
  ➡ die Linearität der Schaltung wird hier stark beeinflusst
- die Ansteuerung der Endsstufe wird hier realisiert

Notizen

Treiberstufe – Beeinflussung des Frequenzganges



Aufbau von mehrstufigen Verstärkern
Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld
Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen
Miller-Effekt in Transistorschaltungen
Eingangsstufen
Treiberstufen
Leistungsendstufen
Literatur

Notizen

Treiberstufe – Beeinflussung des Frequenzganges

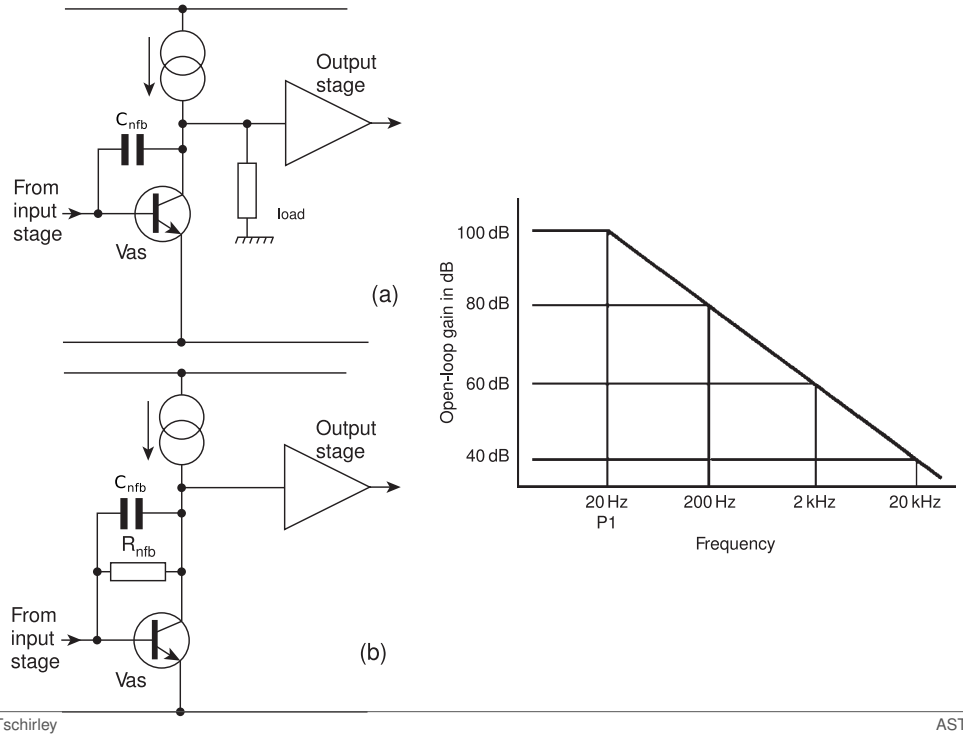


Bild [Self 1998]

Notizen

Strukturen von Treiberstufen

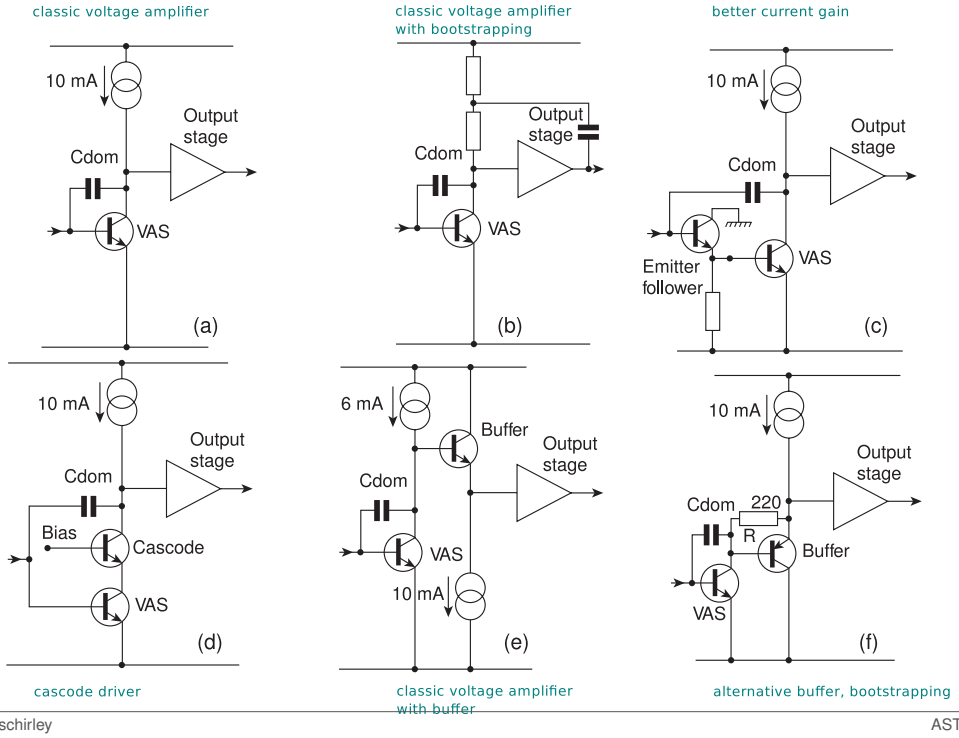


Bild [Self 1998]

Notizen

Strukturen von Treiberstufen

Aufbau von mehrstufigen Verstärkern

Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld

Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen

Miller-Effekt in Transistorschaltungen

Eingangsstufen

Treiberstufen

Leistungsendstufen

Literatur

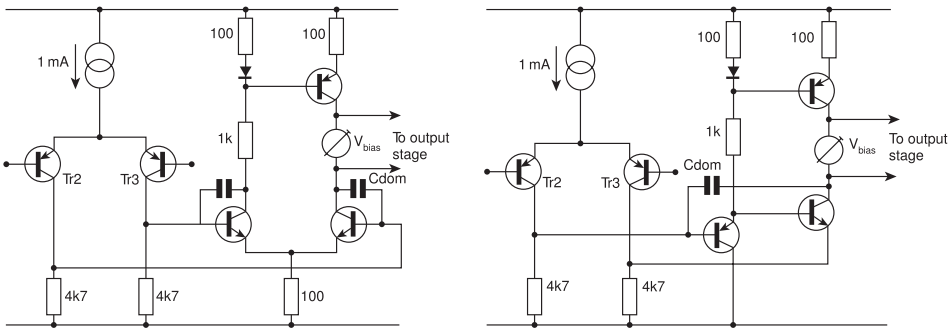


Bild [Self 1998]

Notizen

Aufbau von mehrstufigen Verstärkern
Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld
Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen
Miller-Effekt in Transistorschaltungen
Eingangsstufen
Treiberstufen
Leistungsendstufen
Literatur

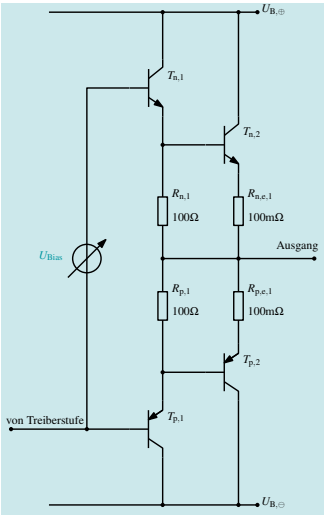
Anforderungen an Leistungsendstufen

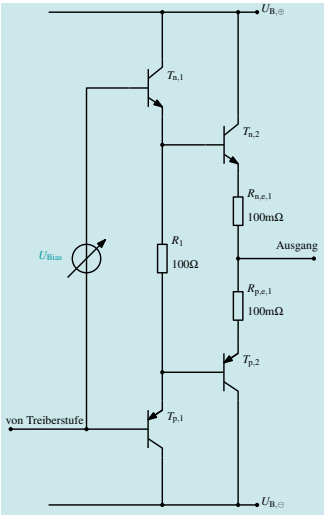
- Bereitstellen des Ausgangsstromes
- Design sollte keine unnötige Verlustleistung einbringen
- Das Ausgangssignal soll verzerrungsfrei sein
- Die Endstufe hat kleinen Innenwiderstand

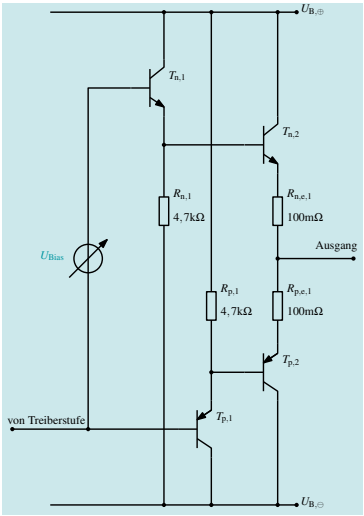
- Basis sind Gegentaktendstufen
- Die Kühlung der Endstufentransistoren ist zwingend notwendig (vergl. [**?**, Kap. 21])

Notizen

Emitterfolger als Ausgangsstufen

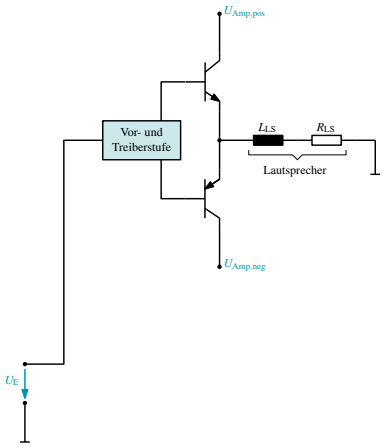






Notizen

Brückenschaltung von Endstufen



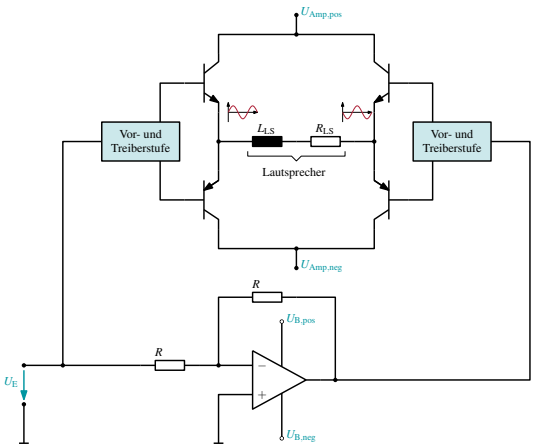
- Last wird einseitig an Masse angeschlossen

Vertiefung (Pflicht)

Welche maximale Leistung kann theoretisch an einem rein ohmschen Lastwiderstand R_{L} umgesetzt werden, wenn die Versorgungsspannung $\pm 12\,\mathrm{V}$ beträgt? Gehen Sie von $U_{\mathrm{CE,sat}} = 1\,\mathrm{V}$ und einem sinusförmigen Eingangssignal aus.

Notizen

Brückenschaltung von Endstufen



- Last hat keinen Massebezug
- Zwei Endstufenblöcke werden benötigt

Vertiefung (Pflicht)

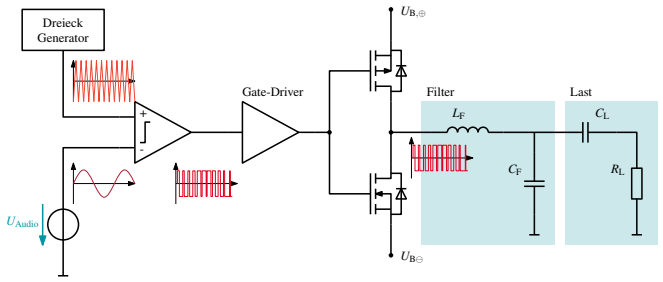
Welche maximale Leistung kann theoretisch an einem rein ohmschen Lastwiderstand R_{L} umgesetzt werden, wenn die Versorgungsspannung $\pm 12\,\mathrm{V}$ beträgt? Gehen Sie von $U_{\mathrm{CE,sat}} = 1\,\mathrm{V}$ und einem sinusförmigen Eingangssignal aus.

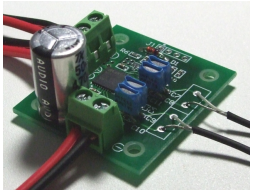
Notizen

Aufbau von mehrstufigen Verstärkern
Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld
Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen
Miller-Effekt in Transistorschaltungen
Eingangsstufen
Treiberstufen
Leistungsendstufen
Literatur

Eigenschaften

- Transistoren arbeiten als Schalter ➡ Nur Schaltverluste
- Ausgangssignal liegt als PWM vor ➡ Filter notwendig
- Schaltfrequenz muss hinreichend hoch sein (Abtasttheorem)
- hohe Leistungsdichte pro Volumen erreichbar





Quelle MaximIC, Class D Amp 10W,

Package 5×5 mm

Das vertiefen wir noch...

Notizen

Literatur

Aufbau von mehrstufigen Verstärkern
Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld
Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen
Miller-Effekt in Transistorschaltungen
Eingangsstufen
Treiberstufen
Leistungsendstufen
Literatur

[Göbel 2006a] Göbel, H., *Einführung in die Halbleiterschaltungstechnik*.
Springer Verlag, 2. Auflage.
ISBN 978-3-540-69288-1.

[Göbel 2006b] Göbel, H., *Übungsaufgaben zur Einführung in die Halbleiterschaltungstechnik*.
Springer Verlag, 2. Auflage.
ISBN 978-3 642-21010-5.

[Goßner 2019] Goßner, S., *Grundlagen der Elektronik*.
Shaker Verlag, 11. Auflage.
ISBN 978-3-8440-6784-2, online unter www.prof-gossner.de.

[Hambley 2002] Hambley, A. R., *Electrical Engineering – Principles and Applications*.
Prentice Hall Inc., 2. Auflage.
ISBN 02-13-0294349-5.

[Self 1998] Self, D., *Power Amplifier Design Handbook*.
Newnes.
ISBN 0-7506-2788-3.

[Self 2010] Self, D., *Small Signal Audio Design*.
Elsevier Ltd.
ISBN 978-0-240-52177-0.

[Slone 1999] Slone, G. R., *High-Power Audio Amplifier Construction Manual*.
Mc Graw Hill.
ISBN 0-07-1341119-6.

[Tietze und Schenk 2011] Tietze, U. und Schenk, C., *Halbleiterschaltungstechnik*.
Springer Vieweg, 19. Auflage.
ISBN 978-3-662-48553-8, https://link.springer.com/de/book/9783662485538.

Notizen

Symbole I

Aufbau von mehrstufigen Verstärkern
Lage des Arbeitspunktes im Ausgangskennlinienfeld
Schaltungstechnische Realisierung der Verstärkerstufen
Miller-Effekt in Transistorschaltungen
Eingangsstufen
Treiberstufen
Leistungsendstufen
Literatur

Notizen