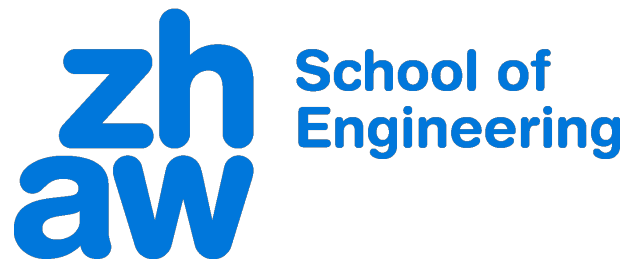


ZHAW Zurich University of Applied Sciences
Winterthur

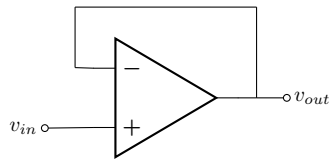


Zusammenfassung EK1

Studienwochen 1-14

Written by: Severin Sprenger
June 17, 2026
Zf. EK1 SW 1-14

1 Impedanzwandler (Spannungsfolger)

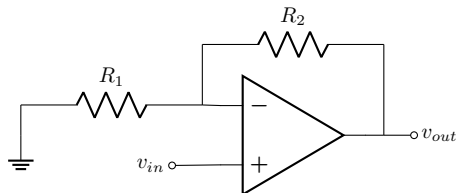


$$R_{in} \rightarrow \infty \Omega$$

$$R_{out} \rightarrow 0 \Omega$$

$$v_{out} = v_{in}$$

2 Nicht-invertierender Verstärker



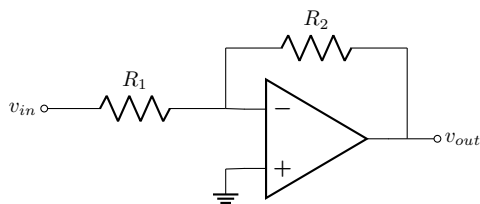
$$R_{in} \rightarrow \infty \Omega$$

$$R_{out} \rightarrow 0 \Omega$$

$$A = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

$$v_{out} = A \cdot v_{in}$$

3 Invertierender Verstärker



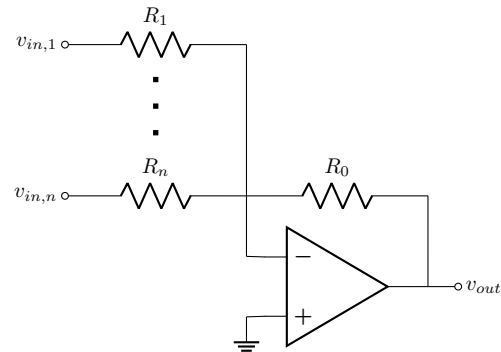
$$R_{in} = R_1$$

$$R_{out} \rightarrow 0 \Omega$$

$$A = \frac{-R_2}{R_1}$$

$$v_{out} = A \cdot v_{in}$$

4 Addierer

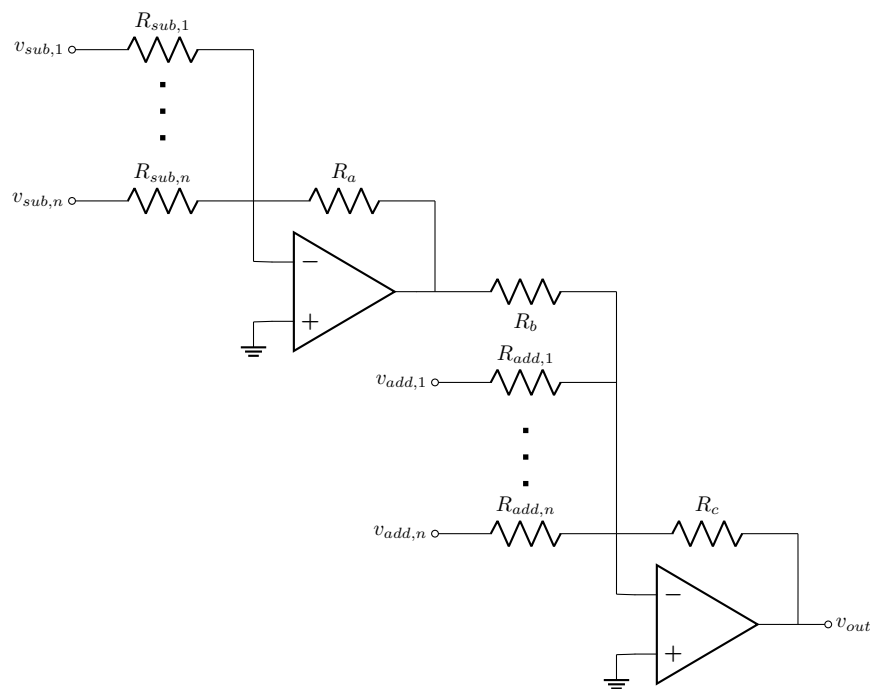


$$R_{in,n} = R_n$$

$$R_{out} \rightarrow 0 \, \Omega$$

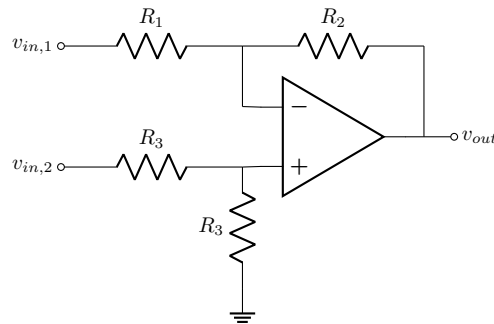
$$v_{out} = -R_0 \cdot \left(\sum_{n=1}^N \frac{v_{in,n}}{R_n} \right)$$

5 Subtrahierer 1



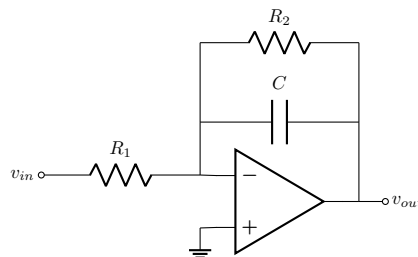
$$v_{out} = -R_c \cdot \left(\sum_{n=1}^{N_{add}} \frac{V_{add,n}}{R_{add,n}} \right) + (R_a \cdot R_c) \cdot \left(\sum_{n=1}^{N_{sub}} \frac{v_{sub,n}}{R_{sub,n} \cdot R_b} \right)$$

6 Subtrahierer 2



$$\begin{aligned}
 v_{out} &= \frac{-R_2}{R_1} \cdot v_{in,1} + \frac{R_4 \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 \cdot (R_3 + R_4)} \cdot v_{in,2} \\
 &= \frac{R_2}{R_1} \cdot (v_{in,2} - v_{in,1})
 \end{aligned}$$

7 Integrator



$$\begin{aligned}
 v_{out}(t) &= \frac{-1}{R_1 \cdot C} \cdot \int_0^t v_{in}(t) dt \\
 H(s) &= \frac{v_{out}(s)}{v_{in}(s)} \\
 &= \frac{-1}{s \cdot R_1 \cdot C} \\
 s &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot j
 \end{aligned}$$

7.1 Reale Schaltung

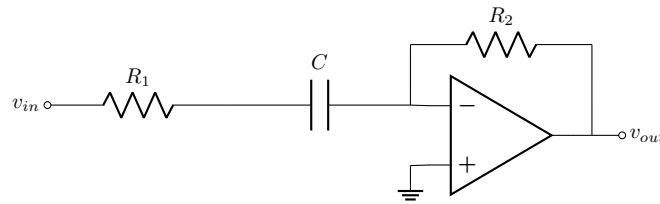
In der realen Integrator Schaltung wird parallel zu C ein Widerstand R_2 geschaltet. Dieser wird aufgrund der Bias Strömen und Offset Spannungen des OP Amp's benötigt.

$$H(s) = \frac{-R_2}{R_1 \cdot (1 + R_2 \cdot C \cdot s)}$$

Der reale Integrator funktioniert als ein aktiver Tiefpass mit den folgenden Eigenschaften.

$$\begin{aligned}
 \omega_G &= \frac{1}{R_2 \cdot C} \\
 \text{Betrieb unter } \omega_G : A &= \frac{-R_2}{R_1} \\
 \text{Betrieb über } \omega_G : &\text{fallend mit } 20 \frac{\text{dB}}{\text{dek.}}
 \end{aligned}$$

8 Differenzierer



$$v_{out} = -R_2 \cdot C \cdot \frac{dv_{in}(t)}{dt}$$

$$H(s) = \frac{-1}{s \cdot R_2 \cdot C}$$

8.1 Reale Schaltung

In der realen Differenzierer Schaltung wird seriell zu C ein Widerstand R_1 geschaltet.

$$H(s) = \frac{-s \cdot R_2 \cdot C}{1 + s \cdot R_1 \cdot C}$$

Der reale Differenzierer funktioniert als ein aktiver Hochpass mit folgenden Eigenschaften.

$$\omega_G = \frac{1}{R_1 \cdot C}$$

$$\text{Betrieb über } \omega_G : A = \frac{-R_2}{R_1}$$

$$\text{Betrieb unter } \omega_G : \text{fallend mit } 20 \frac{\text{dB}}{\text{dek.}}$$

9 Strom-Spannungs-Wandler

$$v_{out} = \frac{-R_2}{I_{in}}$$

10 Spannungs-Strom-Wandler

$$I_L = \frac{v_{in}}{R_1}$$

$$U_1 = v_{in}$$

10.1 Für Last mit GND

$$I_L = \frac{v_{in}}{R_2}$$

11 Unity Gain Bandwidth Product (GDB)

$$A_{@f_{max}} \cdot f_{max} = f_T = \text{GBP} = \text{const.}$$

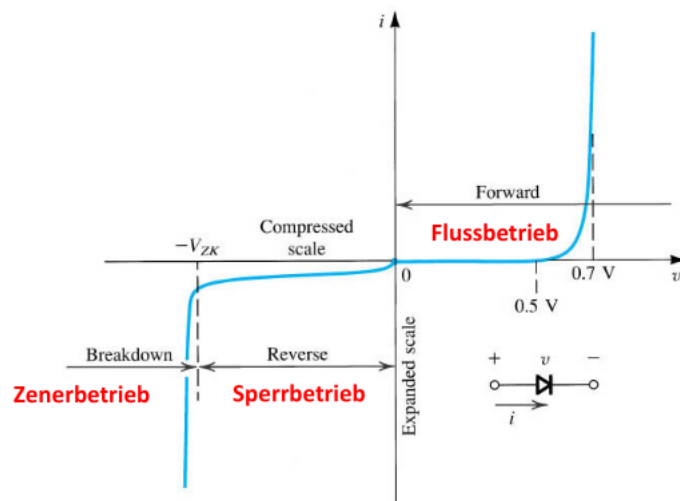
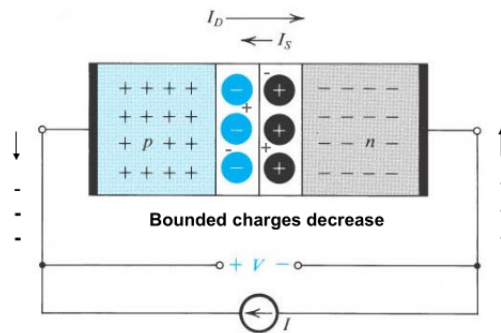
$$A(f) = \frac{\text{GBP}}{f}$$

12 Slew Rate (SR)

$$\text{SR} = \frac{\Delta U}{\Delta t}$$

$$[\text{SR}] = \frac{\text{V}}{\mu\text{s}}$$

13 Diode



$$i_D(v_D) = I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{v_D}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right)$$

$$i_D(v_D) \approx I_S \cdot \exp\left(\frac{v_D}{V_T}\right)$$

$$V_T = \frac{k \cdot T}{q}$$

$$V_{T, @ 20^\circ\text{C}} = 25.3 \text{ mV}$$

$$V_{T, @ 27^\circ\text{C}} = 25.9 \text{ mV}$$

$$q = 1.60 \cdot 10^{-19} \text{ As}$$

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$n \in [1, 2]$$

$$[T] = \text{K}$$

I_S : Sättigungssperrstrom, V_T : Temperaturspannung

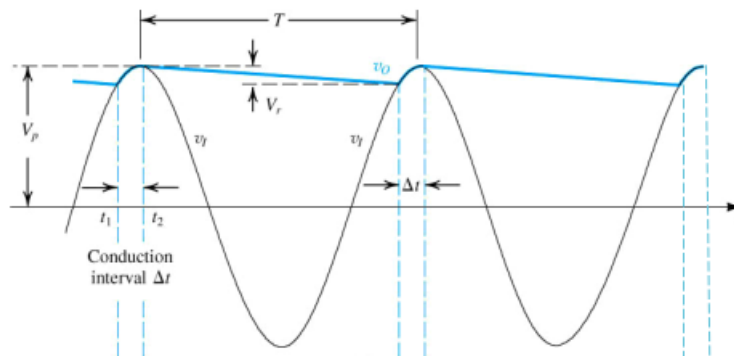
14 Einweg-Gleichrichter

$$V_r = \frac{V_p}{f \cdot R \cdot C} = \frac{V_p \cdot T}{R \cdot C}$$

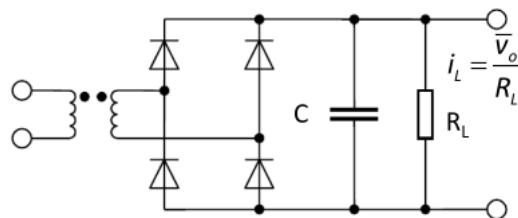
$$\Delta t \approx \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_r}{V_p}}$$

$$i_{D,avg} = i_{L,avg} \cdot \left(1 + \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_p}{V_r}} \right)$$

$$i_{D,max} = i_{L,avg} \cdot \left(1 + 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_p}{V_r}} \right)$$



15 Zweiweggleichrichter - Brückengleichrichter

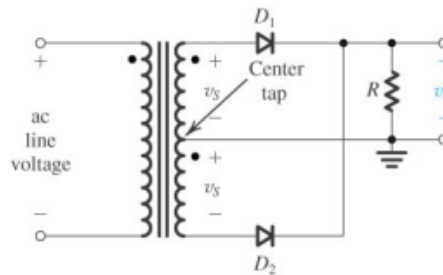


$$V_r = \frac{V_p}{2 \cdot f \cdot R_L \cdot C}$$

$$i_{D,avg} = i_{L,avg} \cdot \left(1 + \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_p}{V_r}} \right)$$

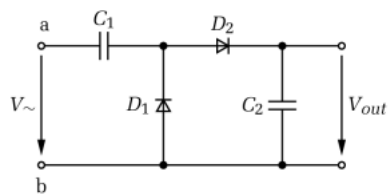
$$i_{D,max} = i_{L,avg} \cdot \left(1 + 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_p}{V_r}} \right)$$

16 Zweiweggleichrichter - Trafo mit Mittelabgriff

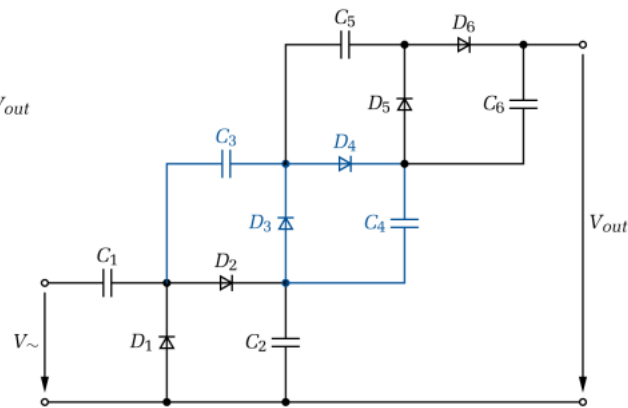


17 Spannungsvervielfachung

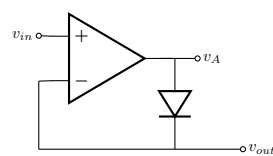
Greinacher-Schaltung:



Kaskade von Greinacher-Schaltungen:

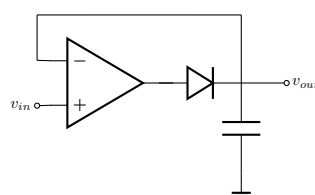


18 Superdiode

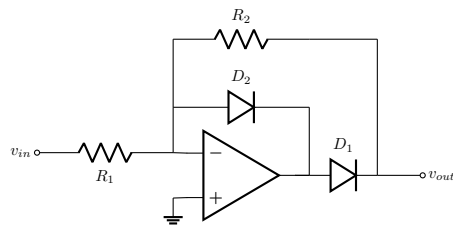


$$v_{out}(v_{in}) = \begin{cases} v_{in} & \text{wenn } v_{in} \geq 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

19 Spitzenwert-Gleichrichter

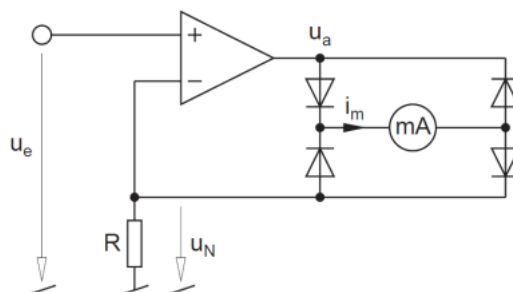


20 Negative Superdiode



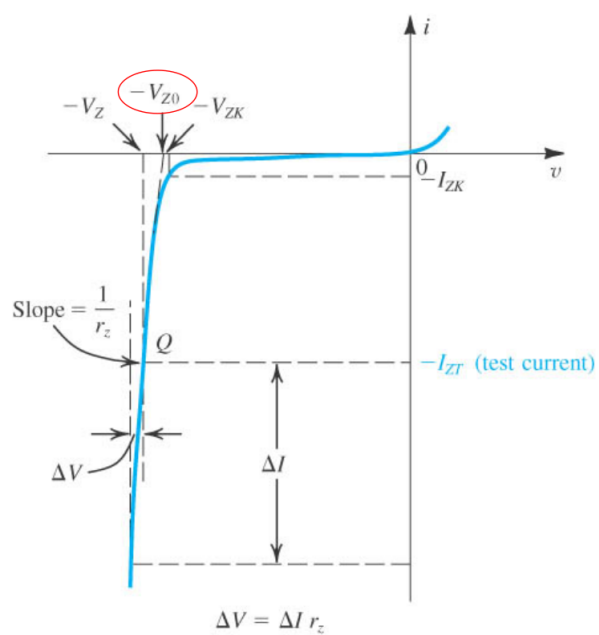
$$v_{out}(v_{in}) = \begin{cases} -v_{in} & \text{wenn } v_{in} \leq 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \iff R_1 = R_2$$

21 Mess-Gleichrichter

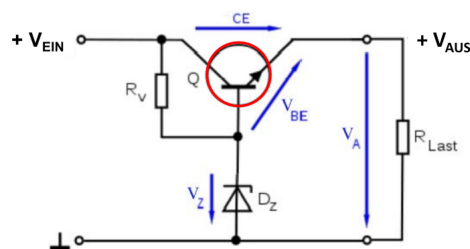


$$i_m = \frac{|u_e|}{R}$$

22 Zener-Diode

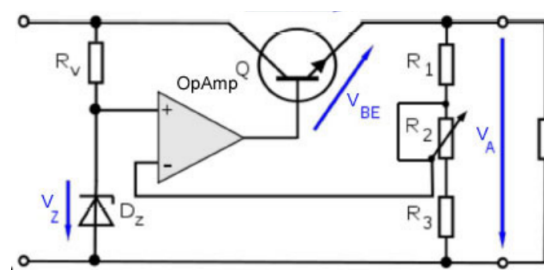


23 Einfacher LDO



$$V_{AUS} = V_Z - 0.7 \text{ V}$$

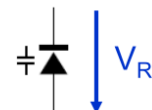
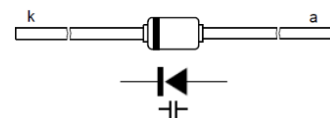
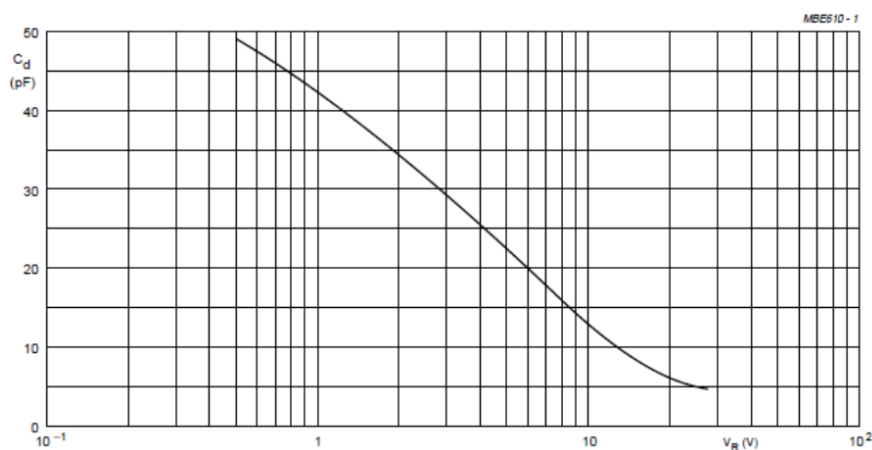
24 Längsregler (LDO)



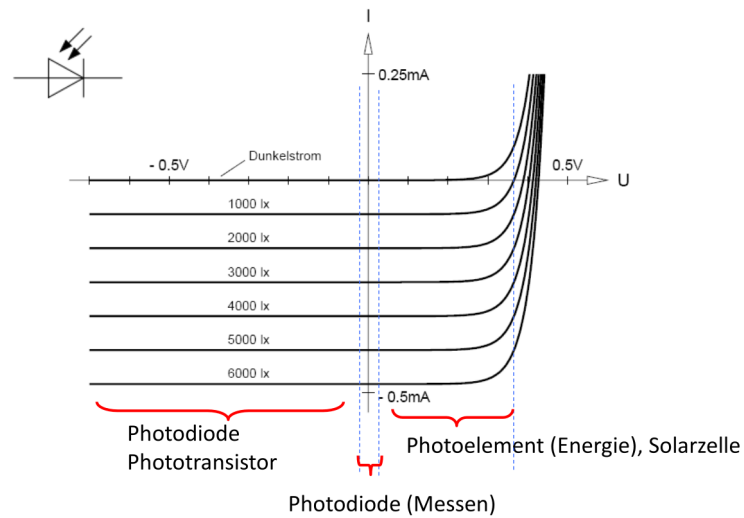
$$V_{out} = V_Z \cdot \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2 + R_3}$$

$$\eta < \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

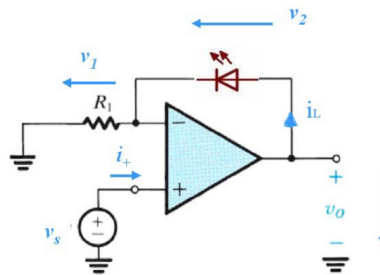
25 Kapazitätsdiode



26 Photodiode



27 Stromgesteuerte LED



$$V_1 = v_s$$

$$i_L = \frac{v_s}{R_1}$$

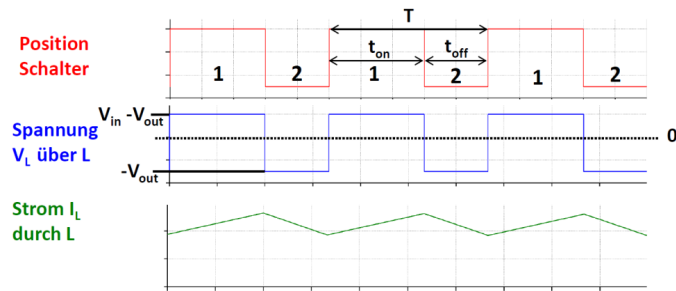
28 Abwärts-/Aufwärtsregler

- $\bar{S}$ ist meist eine Diode (Schottky)
- S ist ein Switcher (FET mit tiefen Schaltzeiten)

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

$$RF \in [2, 10]$$

28.1 Abwärtsregler



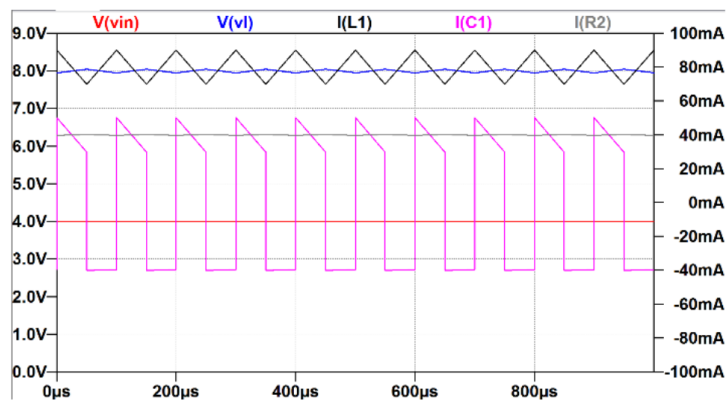
$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

$$L = \frac{R F \cdot (V_{in} \cdot V_{out}) \cdot D}{f_s \cdot I_{out}}$$

$$C = \frac{V_{out} \cdot (1 - D)}{8 \cdot \Delta V_{out} \cdot f_s^2 \cdot L}$$

$$\Delta I_C = \frac{(V_{in} - V_{out}) \cdot D}{f_s \cdot L}$$

28.2 Aufwärtsregler



$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D}$$

$$L = \frac{R F \cdot V_{in}^2 \cdot D}{f_s \cdot I_{out} \cdot V_{out}}$$

$$C = \frac{D \cdot I_{out}}{f_s \cdot \Delta V_{out}}$$

$$\Delta I_C = \frac{V_{in} \cdot D}{f_s \cdot L}$$

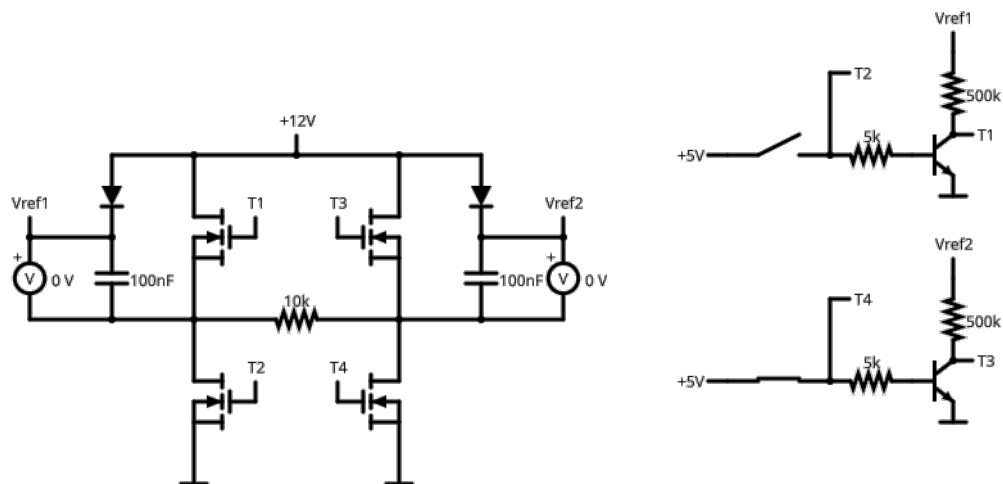
$$\Delta V_{out} = \frac{d \cdot I_{out}}{f_s \cdot L}$$

$$P_D = V_D \cdot I_{avg,in} \cdot (1 - D)$$

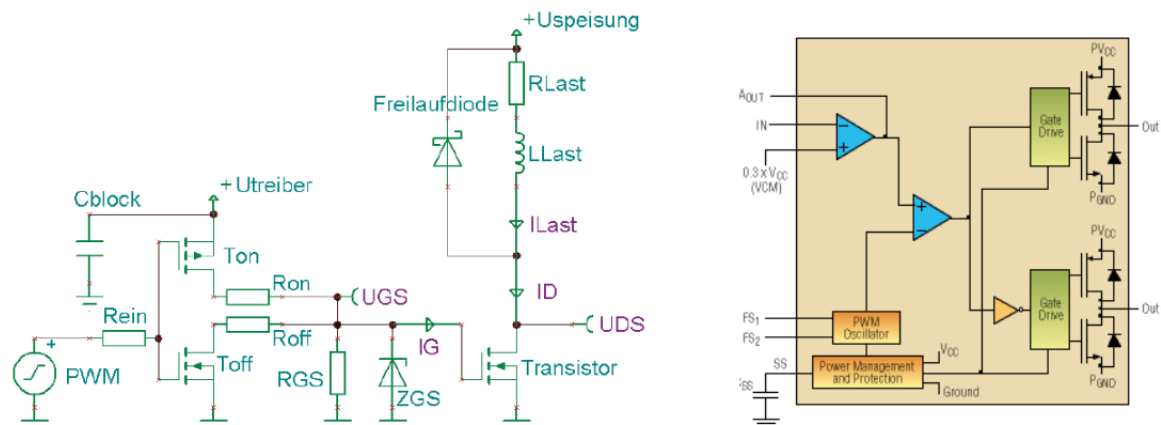
$$P_L = R_{SL} \cdot (I_{avg,in})^2$$

$$\eta = \frac{P_{out} - P_D - P_L}{P}$$

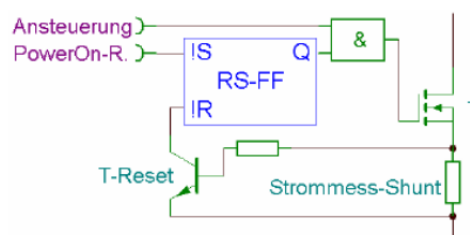
29 H-Brücke



30 Power-FET

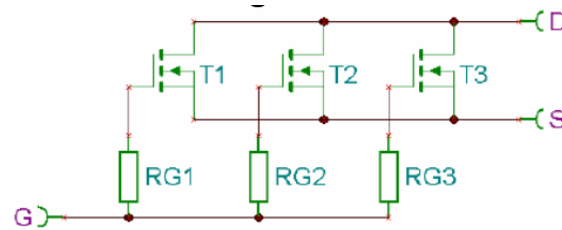


30.1 Überstromschutz



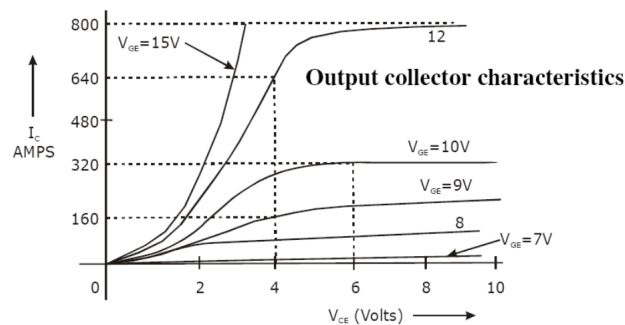
30.2 Parallelschaltung

FETs die in parallel geschaltet sind müssen alle über einen eigenen Vorwiderstand verfügen. Ebenfalls sollte U_{GS} möglichst schnell geschaltet werden und genügen hoch über der Schaltspannung gewählt werden.



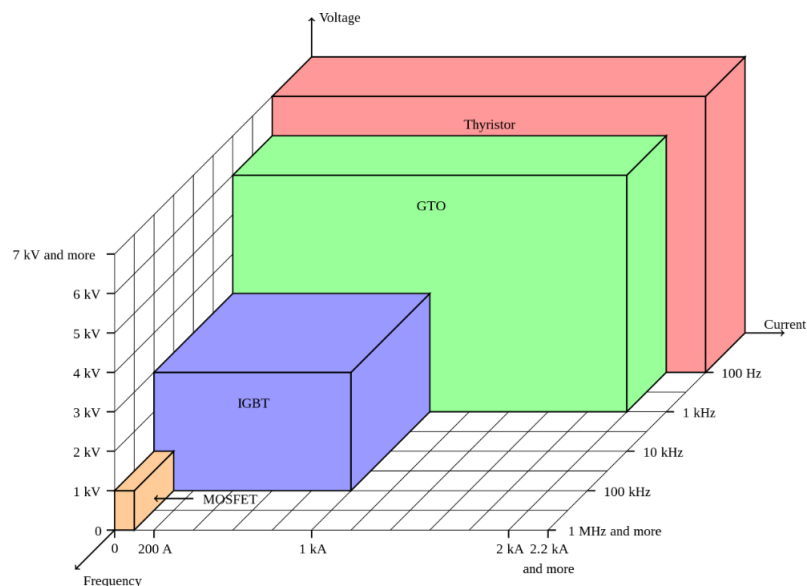
31 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

IGBTs werden hauptsächlich ab $> 600\text{ V}$ eingesetzt, können im Off-Zustand mehrere 1000 V aushalten und im On-Zustand mehrere 100 A leiten bei geringen Spannungsabfällen über dem IGBT ($2\text{ V} - 4\text{ V}$). Jedoch schalten IGBT langsamer im Vergleich zu MOSFETs.

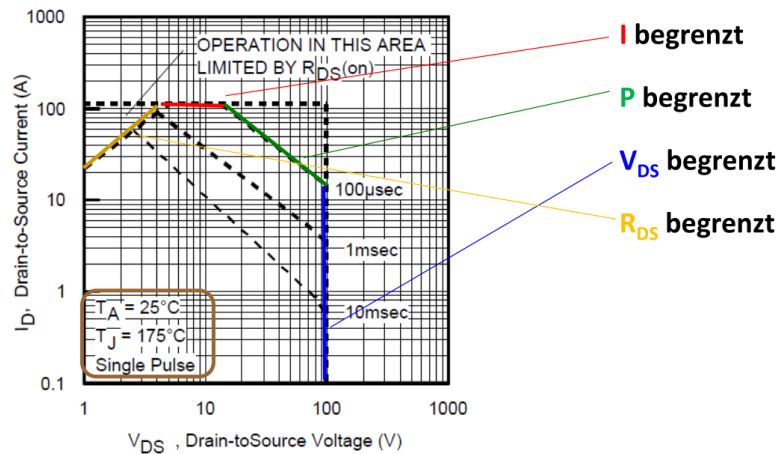


Max. 400 A cont. 1200 V

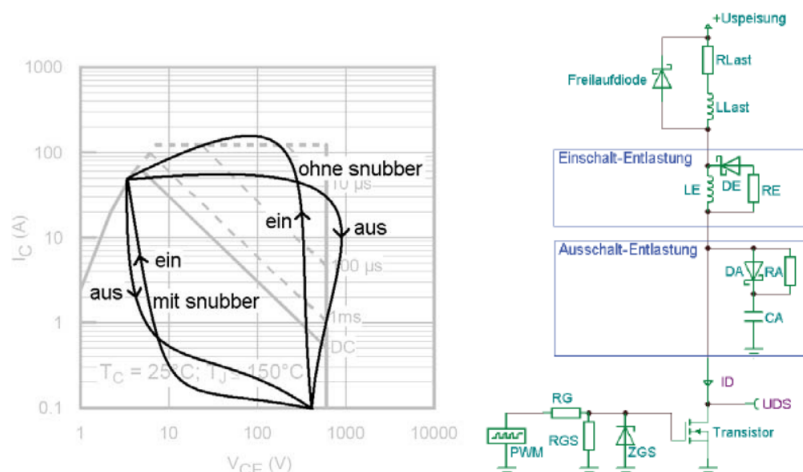
32 Vergleich von Schaltfrequenzen



33 SOA (Safe Operating Area)

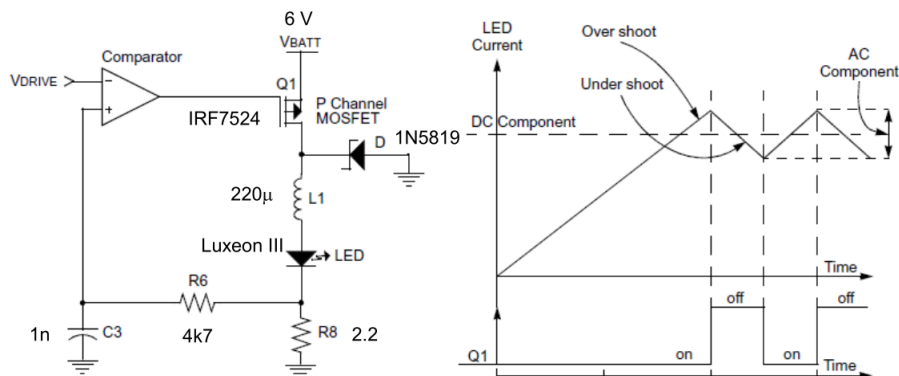


34 Snubber



35 Power-LEDs

Beim betreiben von Power-LEDs ist eine gute Kühlung essenziell. Die Ansteuerung von Power-LEDs basierend auf Boost- oder Buck-Konvertern ermöglicht einen hohen Wirkungsgrad.



36 Kühlung

- Konvektion: $T_S - T_A = P \cdot R_{SA}$
- Wärmestrahlung: $R_{SA} = \frac{T_S - T_A}{3 \cdot 10^{-8} \cdot A \cdot (T_S^4 - T_A^4)}$

Bei Kühlung mittels PCB muss das PCB vertikal befestigt werden um die Konvektion nicht zu blockieren.

$$\begin{aligned}\Delta T &= P_D \cdot \Theta \\ &= P_D \cdot R\end{aligned}$$

$$R_{CS} = \frac{\text{Dicke}}{\text{Wärmeleitfähigkeit} \cdot \text{Fläche}}$$