

Benutzte Quellen

- Vorlesungen von Dr.-Ing. Vogelmann, Universität – Karlsruhe
- Vorlesungen von Dr.-Ing. Klos, Universität – Karlsruhe
- Vorlesungen von Dr.-Ing. Crokol, Universität – Karlsruhe
- Halbleiter Schaltungstechnik, Tietze u., Schenk Th.
- <http://www.elektronik-kompodium.de/sites>

Benutzte Bezeichnungen

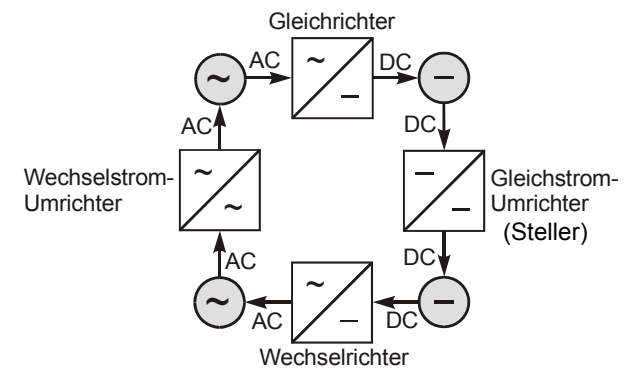
- Aufschrift der Thema, die zum ersten Mal erscheint
- Aufschrift der Thema, die schon bekannt ist

Leistungselektronik

Lernziel:

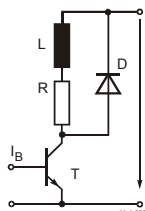
- Antworten auf folgende und ähnliche Fragen geben zu können:
 - Was versteht man unter Kommutierung?
 - Welche Typen Umrichter gibt es?
 - Wie funktionieren die Gleichrichter?
 - Welche sind die Grundfunktionen der Spannungsregler?
 - Was sind die Steller und wozu kann man die benutzen?

Grundbegriffe

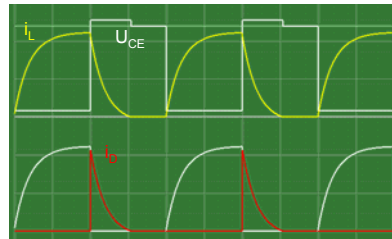


Kommutierung

Die Übergabe eines Stromes von einem Stromzweig auf einen anderen, wobei während der Kommutierungsdauer beide Zweige Strom führen können.



Nach dem Abschalten des Transistors fließt der im Lastkreis fließende Strom in gleicher Richtung weiter. Er findet den Weg über die Diode und klingt nach einer e-Funktion ab.



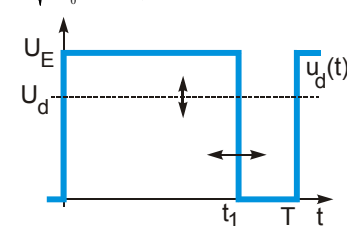
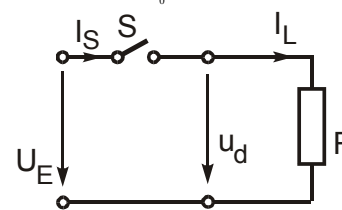
T Schalter (Transistor)
R,L Last (z.B. Relaispule)
D Freilaufdiode

Pulsbreitenmodulation (Ohmsche Last)

Die Eingangsspannung wird mit Hilfe eines Schalters für die Zeit t_1 an den Ausgang durchgeschaltet. Danach wird der Schalter für die Zeit $T-t_1$ ausgeschaltet.

$$\bar{u}_d = U_{d,e} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{t_1} u_d dt = \frac{t_1}{T} \cdot U_E$$

$$U_{d(eff)} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^{t_1} u_d^2 dt} = \sqrt{\frac{t_1}{T}} \cdot U_E$$

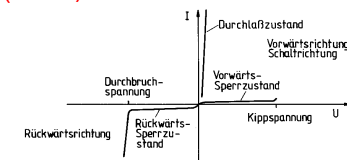


Leistungselektronik

- **Gleichrichter**
 - Ungesteuerter Gleichrichter
 - Spannungsregler
 - Gesteuerter Gleichrichter
- Steller
- Wechselrichter
- Wechselstromumrichter

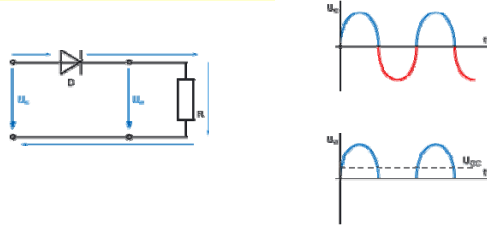
Gleichrichter

- Einweggleichrichter
- Wechselstrom Mittelpunktschaltung
- Brückengleichrichter
- Ungesteuerter Gleichrichter (Diode)
- Gesteuerter Gleichrichter (Thyristor)



Ungesteuerter Gleichrichter

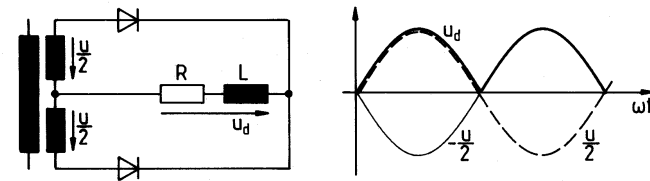
Einweggleichrichter mit ohmscher Last



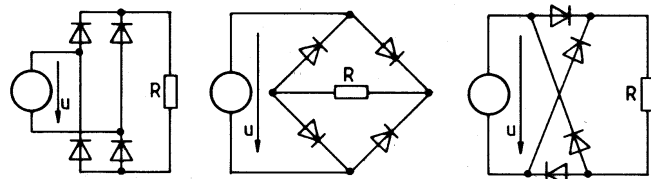
Ungesteuerter Gleichrichter

bei kleinen Leistungen
bei kleinen Spannungen

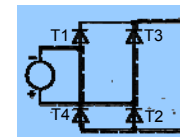
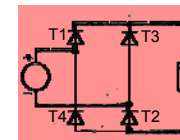
Mittelpunktschaltung



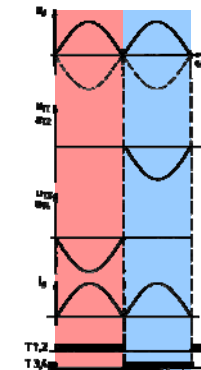
Ungesteuerter Brückengleichrichter



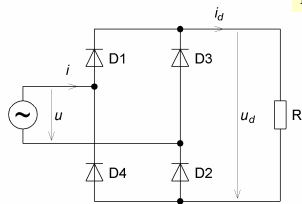
Ungesteuerter Brückengleichrichter



Ohmsche Last



Ungesteuerter Brückengleichrichter



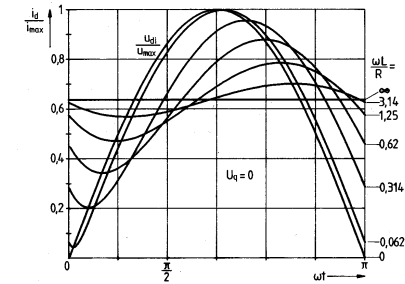
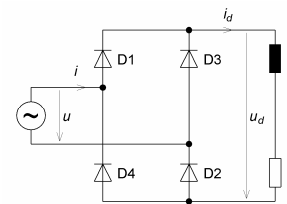
Mittelwert der Ausgangsspannung bei ohmscher Last

$$\begin{aligned}
 u_u(t) &= \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t) \\
 U_{di} = \overline{u_d} &= \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_d(t) dt = \frac{2}{T} \cdot \int_0^{T/2} u_u(t) dt = \\
 &= \frac{2\sqrt{2} \cdot U}{T} \cdot \int_0^{T/2} \sin(\omega t) dt = \\
 &= \frac{2\sqrt{2} \cdot U}{\omega T} \cdot [-\cos(\omega t)]_0^{T/2} = \\
 &= \frac{2\sqrt{2} \cdot U}{2\pi} \cdot 2 = \frac{2\sqrt{2} \cdot U}{\pi} = 0,9 \cdot U
 \end{aligned}$$

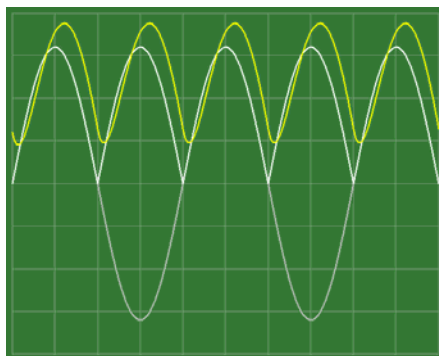
Ideelle Gleichspannung

Ungesteuerter Brückengleichrichter

Ohmsch-induktive Last

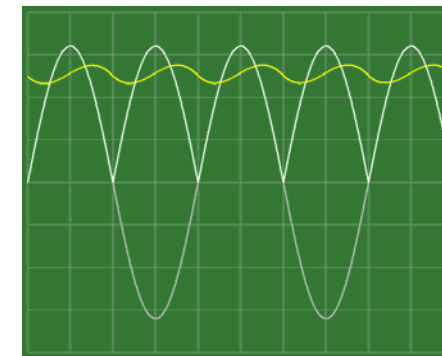


Ungesteuerter Brückengleichrichter



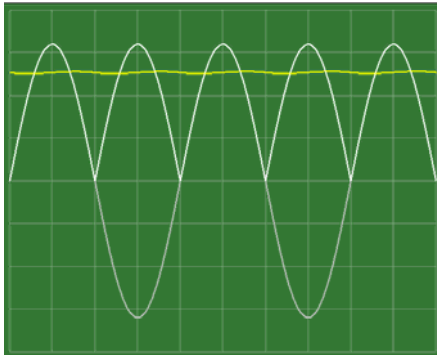
L = 1 mH
R = 10 Ω

Ungesteuerter Brückengleichrichter



L = 10 mH
R = 10 Ω

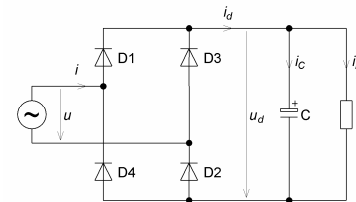
Ungesteuerter Brückengleichrichter



$L = 100 \text{ mH}$
 $R = 10 \Omega$

Ungesteuerter Brückengleichrichter

Ohmsche Last mit Ladecondensator



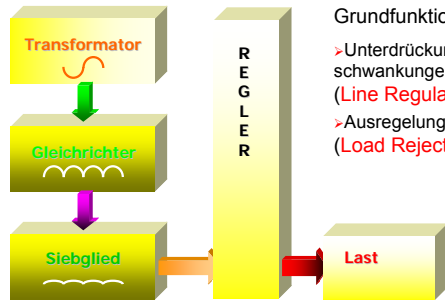
Leistungselektronik

- **Gleichrichter**
 - Ungesteuerter Gleichrichter
 - **Spannungsregler**
 - Gesteuerter Gleichrichter
- Steller
- Wechselrichter
- Wechselstromumrichter

Spannungsregler (Kenndaten)

- Ausgangsspannung und ihre Toleranz
- Max. Ausgangsstrom und Kurzschlussstrom
- Min. Spannungsabfall (Spannungsverlust = **Dropout Voltage**)
- Unterdrückung von Eingangsspannungsschwankungen (**Line Regulation**)
- Ausregelung von Laststromschwankungen (**Load Rejection**)

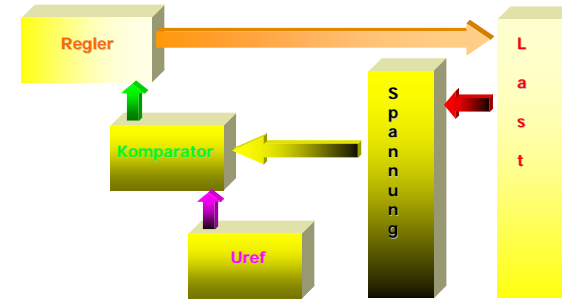
Spannungsregler



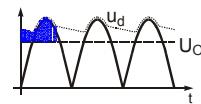
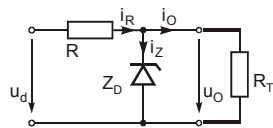
Grundfunktion:

- > Unterdrückung von Eingangsspannungsschwankungen (Line Regulation)
- > Ausregelung von Laststromschwankungen (Load Rejection)

Linearer Spannungsregler



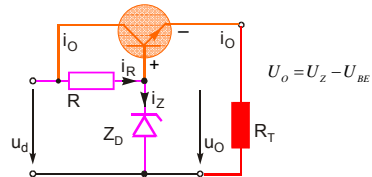
Linearer Spannungsregler



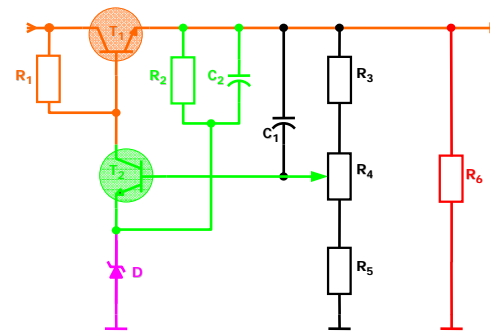
$$U_a = U_z$$

$$U_d = U_z + I_R \cdot R = U_z + I_z \cdot R \text{ (ohne Last)}$$

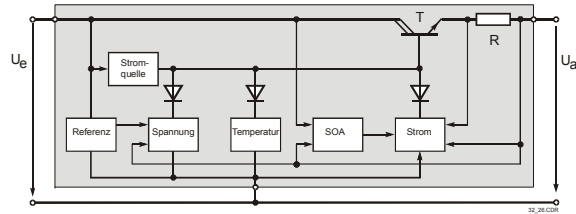
$$U_d = U_z + (I_z + I_o) \cdot R$$



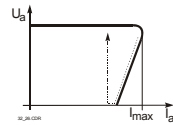
Linearer Spannungsregler



Integrierter Festspannungsregler

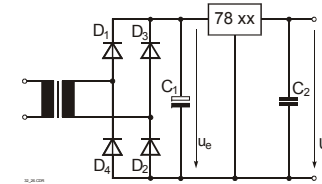


(Linearregler)



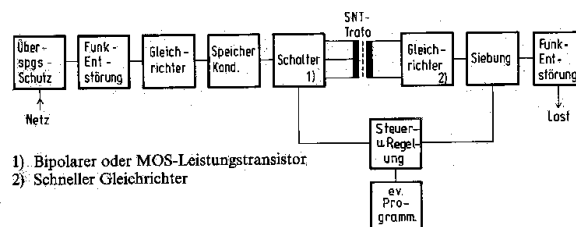
Fold-Back Kennlinie

Integrierter Festspannungsregler



Schaltung eines einfachen Netzteils mit Festspannungsregler

Prinzip eines Schaltnetzteils

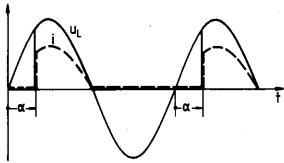
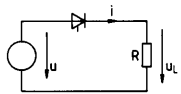


Leistungselektronik

- **Gleichrichter**
 - Ungesteuerter Gleichrichter
 - Spannungsregler
 - Gesteuerter Gleichrichter
- Steller
- Wechselrichter
- Wechselstromumrichter

Gesteuerter Gleichrichter

Einweggleichrichter mit ohmscher Last

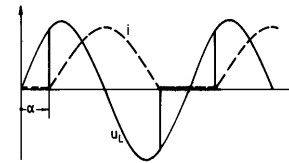
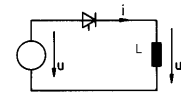


$$u(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t)$$

$$\bar{u}_L = \frac{1}{T} \int_0^T u_L dt = \frac{\sqrt{2}U}{T} \int_{\alpha/\omega}^{T/2} \sin(\omega t) dt = \frac{\sqrt{2}U}{\omega T} [-\cos(\omega t)]_{\alpha/\omega}^{T/2} = \frac{\sqrt{2}U}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Gesteuerter Gleichrichter

Einweggleichrichter mit induktiver Last



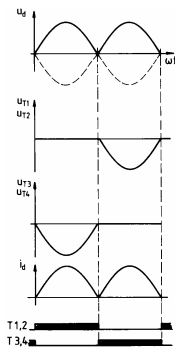
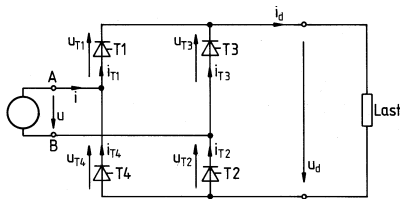
$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t); \quad u_L = L \cdot \frac{di}{dt}; \quad u_L = u(t) \text{ f\u00fcr } t > \alpha / \omega$$

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha/\omega}^t u(\tau) \cdot d\tau = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\omega \cdot L} \int_{\alpha/\omega}^t \sin(\omega \tau) \cdot d\tau = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\omega \cdot L} [-\cos(\omega \tau)]_{\alpha/\omega}^t = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\omega \cdot L} (\cos(\alpha) - \cos(\omega t))$$

Dieser Stromverlauf gilt nur vom Z\u00fcndzeitpunkt bis der Strom wieder zu null wird. Dann l\u00f6scht der Thyristor.

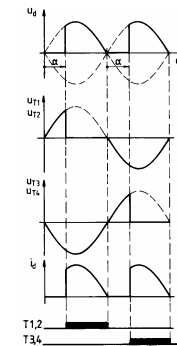
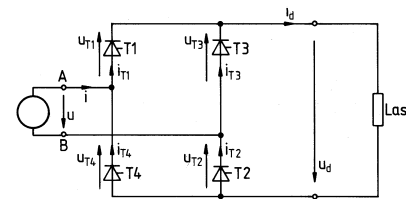
Vollgesteuerter Br\u00fcckengleichrichter

Ohmsche Last bei Steuerwinkel = 0



Vollgesteuerter Br\u00fcckengleichrichter

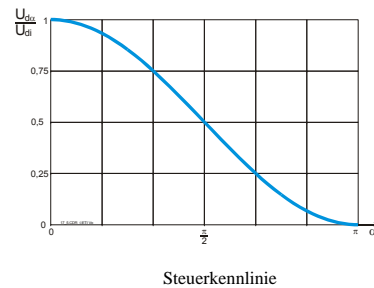
Ohmsche Last bei Steuerwinkel > 0



Vollgesteuerter Brückengleichrichter

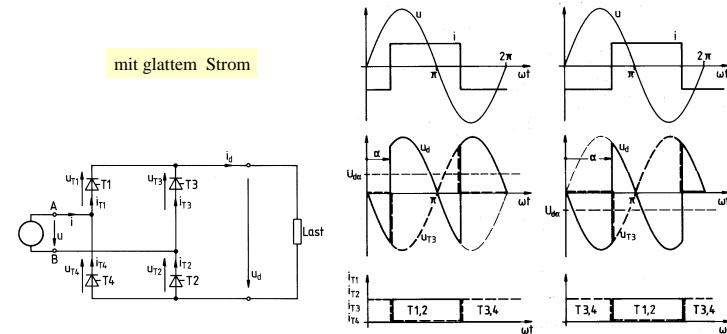
Steuerkennlinie bei ohmscher Last

$$\begin{aligned}
 u_n(t) &= \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t) \\
 U_{da} &= \overline{u_d} = \frac{1}{T} \int_0^T u_d dt = \frac{2}{T} \int_{\alpha/\omega}^{T/2} u_n dt = \\
 &= \frac{2\sqrt{2} \cdot U}{T} \int_{\alpha/\omega}^{T/2} \sin(\omega t) dt = \\
 &= \frac{2\sqrt{2} \cdot U}{\omega T} \cdot [-\cos(\omega t)]_{\alpha/\omega}^{T/2} = \\
 &= \frac{2\sqrt{2} \cdot U}{2\pi} \cdot [1 + \cos(\alpha)] \\
 U_{da} &= U_{di} \cdot \frac{1 + \cos(\alpha)}{2} = U_{di} \cdot \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)
 \end{aligned}$$



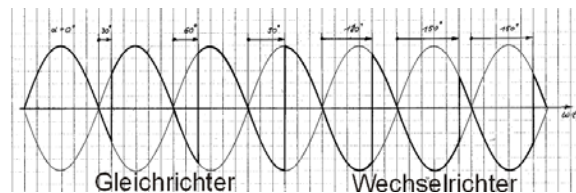
Vollgesteuerter Brückengleichrichter

mit glattem Strom



Vollgesteuerter Brückengleichrichter

Ausgangsspannung bei Änderung der Aussteuerung zwischen 0 und 150 Grad



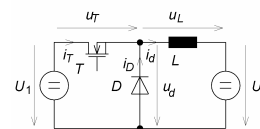
Leistungselektronik

- **Gleichrichter**
 - Ungesteuerter Gleichrichter
 - Spannungsregler
 - Gesteuerter Gleichrichter
- **Steller**
- Wechselrichter
- Wechselstromumrichter

Steller

Drosselwandler		
Tiefsetzsteller		
Bei geschlossenem Schalter wird die Speicherdrossel aufmagnetisiert. Der Strom kommutiert nach dem Ausschalten auf die Freilaufdiode.	bis 200 kW	Antriebstechnik bis 200 kW $0 \leq U_2 \leq U_E$
Hochsetzsteller		
Bei geschlossenem Schalter wird die Speicherdrossel aufmagnetisiert. Der Strom kommutiert nach dem Ausschalten auf die Freilaufdiode.	bis 20 kW	Erzeugung von Zwischenkreisspannungen bei netzfreundlichen Netzteilen $U_2 \leq U_1$
Inverter		
Bei geschlossenem Schalter wird die Speicherdrossel aufmagnetisiert. Der Strom kommutiert nach dem Ausschalten auf die Freilaufdiode. Die Ausgangsspannung wird negativ.	bis 2 kW	Erzeugung von Hilfsspannungen $U_2 \leq 0$

Tiefsetzsteller ($U_2 < U_1$)



Zwei Schalterstellungen des Transistors T „Ein“ - „Aus“ \Rightarrow zwei Zustände:

Schalterstellung „Ein“ \Rightarrow Zustand 1:

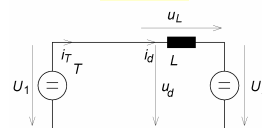
$$u_T = 0, \quad u_d = U_1, \\ u_L = u_d - U_2 = U_1 - U_2, \quad u_D = -U_1 < 0$$

$$i(t) = I_0 + \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt = I_0 + \frac{1}{L} \int_0^t (U_1 - U_2) dt = \\ = I_0 + (U_1 - U_2) / L \cdot t$$

Am Ende der Einschalterdauer T_E

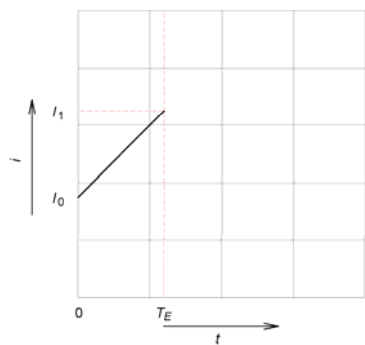
$$i(t = T_E) = I_1 = I_0 + (U_1 - U_2) / L \cdot T_E$$

Schaltbild

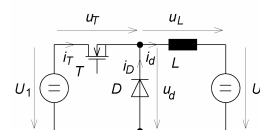


Ersatzschaltbild „Ein“

Tiefsetzsteller ($U_2 < U_1$)



Tiefsetzsteller ($U_2 < U_1$)



Schalterstellung „Aus“ \Rightarrow Zustand 2: (solange $i_d > 0$)

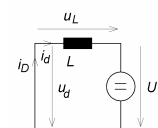
$$u_T = U_1, \quad u_d = 0, \\ u_L = u_d - U_2 = -U_2, \quad u_D = 0$$

$$i(t) = I_1 + \frac{1}{L} \int_{T_E}^t u_L dt = I_1 + \frac{1}{L} \int_{T_E}^t (-U_2) dt = \\ = I_1 - U_2 / L \cdot (t - T_E) = \\ = I_0 + (U_1 - U_2) / L \cdot T_E - U_2 / L \cdot (t - T_E) = \\ = I_0 + U_1 / L \cdot T_E - U_2 / L \cdot t$$

Ausschalterdauer $T_A = T - T_E$

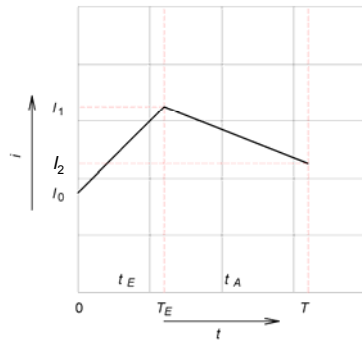
$$i(t = T) = I_2 = I_1 - U_2 / L \cdot (T - T_E) = \\ = I_1 - U_2 / L \cdot T_A = I_0 + U_1 / L \cdot T_E - U_2 / L \cdot T$$

Schaltbild



Ersatzschaltbild „Aus“

Tiefsetzsteller ($U_2 < U_1$)

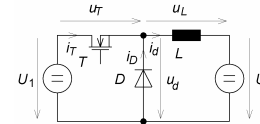


Stromänderung in der Taktperiode T

$$\begin{aligned} \Delta i &= I_2 - I_0 = \\ &= I_0 + (U_1 - U_2) / L \cdot T_E - U_2 / L \cdot T_A - I_0 = \\ &= (U_1 - U_2) / L \cdot T_E - U_2 / L \cdot (T - T_E) = \end{aligned}$$

$$\Delta i = U_1 / L \cdot T_E - U_2 / L \cdot T$$

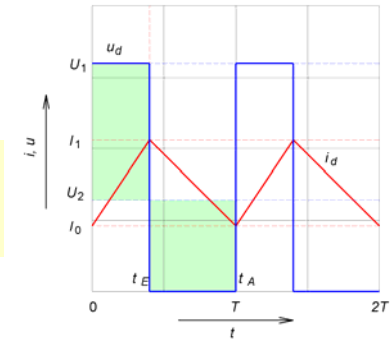
Tiefsetzsteller ($U_2 < U_1$)



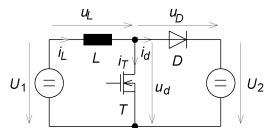
Im stationären Betrieb gleicht sich der Strom in aufeinanderfolgenden Perioden. Es besteht dann ein fester Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der Spannungen und dem Tastverhältnis a .

$$\Delta i = 0 = U_1 / L \cdot T_E - U_2 / L \cdot T$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{T_E}{T} = a$$



Hochsetzsteller ($U_1 < U_2$)



Im Schaltzustand „Ein“ des Transistors T liegt die Spannung U_1 an der Drossel:

$$\begin{aligned} i_L(t) &= I_0 + \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt = I_0 + \frac{1}{L} \int_0^t U_1 dt = \\ &= I_0 + U_1 / L \cdot t \end{aligned}$$

Am Ende der Einschaltedauer T_E

$$i_L(T_E) = I_1 = I_0 + U_1 / L \cdot T_E$$

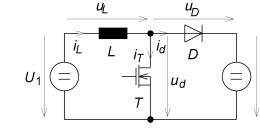
Im Schaltzustand „Aus“ des Transistors T speist die Drossel ihren Strom in die Spannungsquelle U_2 :

$$\begin{aligned} i_L(t) &= I_1 + \frac{1}{L} \int_{T_E}^t u_L dt = I_1 + \frac{1}{L} \int_{T_E}^t (U_1 - U_2) dt = \\ &= I_1 + (U_1 - U_2) / L \cdot (t - T_E) \end{aligned}$$

Zu Beginn der nächsten Taktperiode:

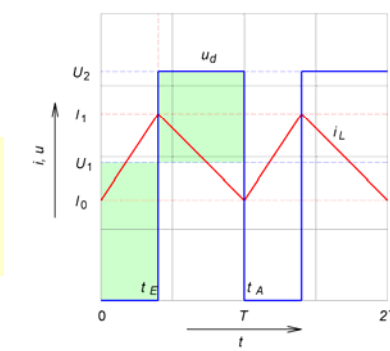
$$\begin{aligned} i_L(T) &= I_1 + (U_1 - U_2) / L \cdot (T - T_E) = \\ &= I_0 + U_1 / L \cdot T_E + (U_1 - U_2) / L \cdot (T - T_E) = \\ &= I_0 + U_1 / L \cdot T - U_2 / L \cdot (T - T_E) \end{aligned}$$

Hochsetzsteller ($U_1 < U_2$)

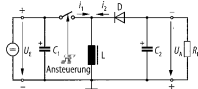


Im stationären Betrieb sind die Ströme am Anfang und Ende der Taktperiode gleich. Es besteht dann ein fester Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der Spannungen und dem Tastverhältnis a .

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{T}{T - T_E} = \frac{1}{1 - a}$$



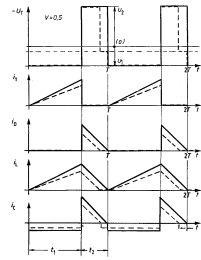
Inverter



$$0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_L \cdot dt = U_E \cdot \frac{t_1}{T} + U_A \cdot \frac{t_2}{T}$$

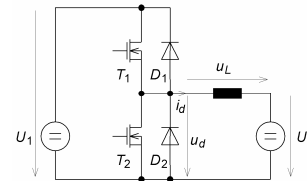
mit $\frac{t_1}{T} = a$ und $\frac{t_2}{T} = 1 - a$

$$U_A = -U_E \cdot \frac{t_1}{t_2} = -U_E \cdot \frac{t_1}{T - t_1} = -U_E \cdot \frac{t_1/T}{1 - t_1/T}$$



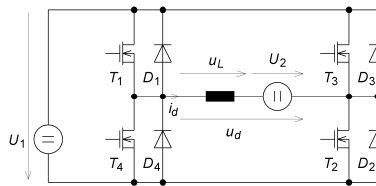
$$U_A = -U_E \cdot \frac{a}{1-a}$$

Halbbrücke



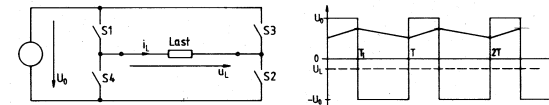
In einer Halbbrücke sind der Tiefsetz- und der Hochsetzsteller vereint. Die Spannung U_2 ist immer kleiner als die Spannung U_1 .
 Schaltet der Transistor T_1 und wirkt die Diode D_2 als Freilaufdiode, dann arbeitet die Halbbrücke als Tiefsetzsteller. Die Energie fließt bei positivem Drosselstrom i_d von U_1 zu U_2 .
 Schaltet der Transistor T_2 und wirkt die Diode D_1 als Freilaufdiode, dann arbeitet die Halbbrücke als Hochsetzsteller. Die Energie fließt bei negativem Drosselstrom i_d von U_2 zu U_1 .
 Da der Strom i_d beide Richtungen annehmen kann, die Spannung u_d jedoch nur eine, kann die Halbbrücke als Zwei-Quadranten-Steller arbeiten.

Brücke



Die Brücke setzt sich aus zwei Halbbrücken zusammen. Die Ausgangsspannung u_d ist die Differenz der Ausgangsspannungen der beiden Halbbrücken und kann jetzt beide Polaritäten annehmen.
 Dadurch kann die Brücke als Vier-Quadranten-Steller arbeiten.

Vier-Quadranten-Steller

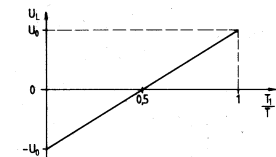


Schalter S1,S2 ein und S3,S4 aus
 Schalter S3,S4 ein und S1,S2 aus
 Schalter S1,S3 ein oder S2,S4 ein

$U_L = U_0$
 $U_L = -U_0$
 $U_L = 0$

$$U_i = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_i(t) dt = \frac{1}{T} \cdot [U_0 \cdot T_1 - U_0 \cdot (T - T_1)] = U_0 \cdot \left[\frac{2 \cdot T_1}{T} - 1 \right]$$

$$a = \frac{T_1}{T} \quad U_i = U_0 \cdot [2 \cdot a - 1]$$

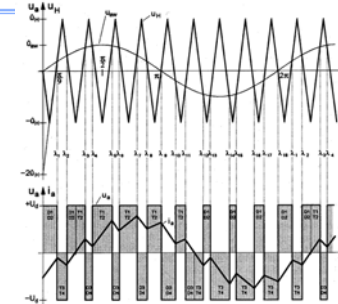
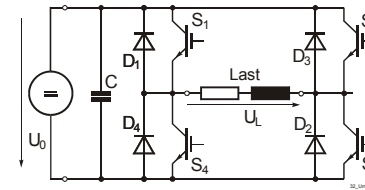


Leistungselektronik

- **Gleichrichter**
 - Ungesteuerter Gleichrichter
 - Spannungsregler
 - Gesteuerter Gleichrichter
- **Steller**
- **Wechselrichter**
- Wechselstromumrichter

Vier-Quadranten-Steller

Praktische Ausführung mit IGB-Transistoren



Pulsweitenmodulation \Rightarrow Wechselrichter

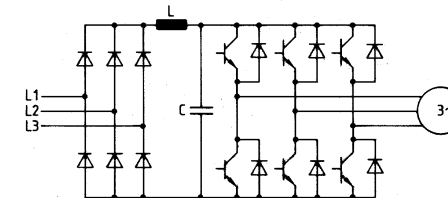
Mit Hilfe einer dreieckförmigen Hilfsspannung und einem Komparator werden die Steuersignale für die Transistoren erzeugt

Leistungselektronik

- **Gleichrichter**
 - Ungesteuerter Gleichrichter
 - Spannungsregler
 - Gesteuerter Gleichrichter
- **Steller**
- **Wechselrichter**
- **Wechselstromumrichter**

Wechselstromumrichter

Ergänzt man die Schaltung des Vierquadrantenstellers durch einen weiteren Brückenweig, so hat man wie bei Drehstrom drei Ausgänge zur Verfügung



Umrichterschaltung zur Erzeugung eines frequenz- und amplituden variablen Drehstromnetzes