

Leistungselektronik & Elektrische Antriebe

Zusammenfassung

Joel von Rott & Andreas Ming /  Quelldateien

Table of contents

Grundlagen

Mechanik	2
Grundgrößen	2
Zentrifugalkraft	2
Trägheitsmoment J	2
Wirkungskette elektrischer Maschinen	2
Elektromechanische Energieumwandlung	3
Durchflutungsgesetz	3
Luftspalt	4
Kapazität & Induktivität	5
Kapazität C	5
Induktivität L	5
Periodische Signale	5
Fourierreihe	5
Amplitudenspektrum \hat{X}_n & Phasenspektrum φ_n	5
Gerade Funktion	5
Ungerade Funktion	6
(linearen) Mittelwert $X_{MW}/X_{AV}/\bar{X}$	6
Effektivwert	6
Leistungsberechnung	6
Einphasige Leistungen (allgemein)	6
Einphasige Leistungen (periodisch)	6
Einphasige Leistung (sinusförmige Spannung)	6
Klirrfaktor	7

Gleichstrommaschine

Aufbau	7
Ersatzschaltung <i>Fremderregt</i>	7
Ersatzschaltung <i>Nebenschlussmaschine</i>	8
Ersatzschaltung <i>Seriemaschine</i>	9
Ankerrückwirkung	9
Universalmotor	10
Drehzahlsteuerung	10

Drehfeldmaschinen

10

Synchronmaschine (SM)

11

Asynchronmaschine (ASM)

11

Leistungshalbleiter

11

Übersicht	11
Diode	11
Trägerstaueffekt <i>TSE</i>	11
Schottky Dioden	12
Bipolartransistor	12
Einschaltthyristoren	12

Triac	13
Abschaltthyristoren <i>GTO, IGCT</i>	13
Feldeffekttransistor <i>FET</i>	13
Insulated Gate Bipolar Transistor <i>IGBT</i>	13
Schaltverluste	13
Kühlung	14

Gleichstromsteller

14

Abwärtsteller	14
Standard DC-Last	15
Nicht idealer Stromverlauf	15
Glättungskondensator	15
Arbeitspunkteinstellung	15
Lückbetrieb	16
Toleranzbandsteuerung	16
Aufwärtsteller	16
Vierquadrantensteller	16
Gleichstromsteller mit GTO	16

Transformatoren

17

Parameterbestimmung	17
Leerlaufversuch	17

Fremdgeführte Gleichrichter

17

Einphasiger Gleichrichter	18
Ohm'sche Last	18
L-Glättung	19
C-Glättung	20
Leistung bei L-Glättung	20
Netzrückwirkung L-Glättung	21
Belastung der Halbleiter bei L-Glättung	21
Dreiphasige Gleichrichter	21
$\alpha = 0^\circ$	22
$\alpha = 30^\circ$	22
$\alpha = 45^\circ$	22
$\alpha = 60^\circ$	22
$\alpha = 90^\circ$	22
Belastung der Halbleiter dreiphasig	23

Selbstgeführter Wechselrichter

23

Umrichter

23

Grundlagen

Mechanik

Grundgrößen

Translatorische Bewegung		Rotatorische Bewegung	
Weg	$s \ h = \int \int a \cdot dt = 1/2 \cdot a \cdot t^2$	[m]	Winkel
Geschwindigkeit	$v = \frac{ds}{dt} = r \cdot \omega$	[$\frac{m}{s}$]	Kreisfrequenz
Beschleunigung	$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2}{dt^2}$	[$\frac{m}{s^2}$]	Winkelbeschl.
Kraft	$F = m \cdot a$	[N]	Drehmoment
Masse	m	[kg]	Trägheitsmoment
Impuls	$B = m \cdot v$	[$\frac{kg \cdot m}{s}$]	Drall
Leistung	$P = F \cdot v$	[W]	Leistung
Energie	$W = \int p(t) \cdot dt$	[Ws]	Energie
kin. Energie	$W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$	[Ws]	kin. Energie
pot. Energie	$W_{pot} = \int F(s) \cdot ds$ $= m \cdot g \cdot h$	[Ws]	pot. Energie
			$J = \frac{1}{2} \cdot s^2$
			$D = J \cdot \omega$
			$P = M \cdot \omega$
			$W = \int M(\varphi) \cdot d\varphi$
			[Ws]

Zusammenhang Translatorisch & Rotatorisch:

$$M = F \cdot r \quad \text{und} \quad v_{tang} = r \cdot \omega \quad (\text{resp. } a_{tang} = \dot{\omega} \cdot r)$$

Zentrifugalkraft

$$F = \frac{m \cdot v^2}{r} = m \cdot r \cdot \omega^2 [N]$$

Trägheitsmoment J

- Vollzylinder

$$J = \frac{m}{2} r^2 = \frac{\pi \cdot l \cdot \rho}{2} r^4$$

- Hohlzylinder

$$J = \frac{m}{2} (r_a^2 + r_i^2) = \frac{\pi \cdot l \cdot \rho}{2} (r_a^4 - r_i^4)$$

- Zylindermantel ($\delta \ll r$)

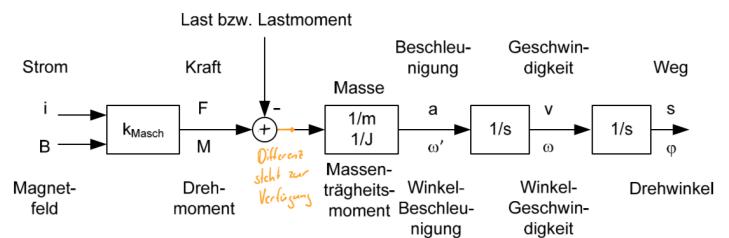
$$J = \frac{m}{4} (2 \cdot r - \delta)^2 = 2\pi \cdot l \cdot \rho r^3 \delta$$

- Kugel

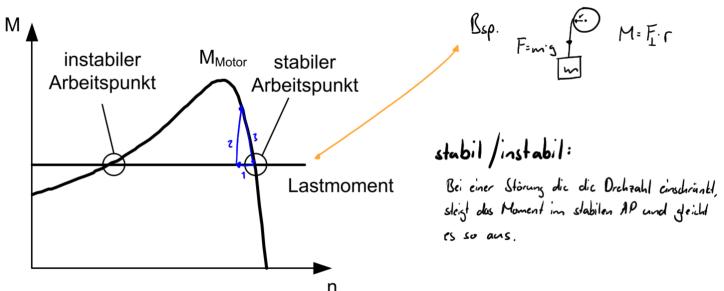
$$J = \frac{2 \cdot m}{5} r^2 = \frac{8}{15} \pi \cdot \rho \cdot r^5$$

Wirkungskette elektrischer Maschinen

Bei rotatorischer Bewegung steht die Differenz zwischen *Drehmoment* M_{masch} , das die Maschine abgibt und das *Lastmoment* M_{last} zur *Winkelbeschleunigung* $\ddot{\varphi}$ zur Verfügung



Es kommen zudem *stabile* und *instabile* Arbeitspunkte vor. **Stabil** sind sie, wenn bei sinkender Drehzahl das Moment steigt und so wieder beschleunigen kann, sonst andersrum. So "regelt" sich das System ein Stück weit selbst



Die Kraft F die auf einen Leiter wirkt ist abhängig vom Längenelement l (länge des Leiters im Magnetfeld) des Stroms i .

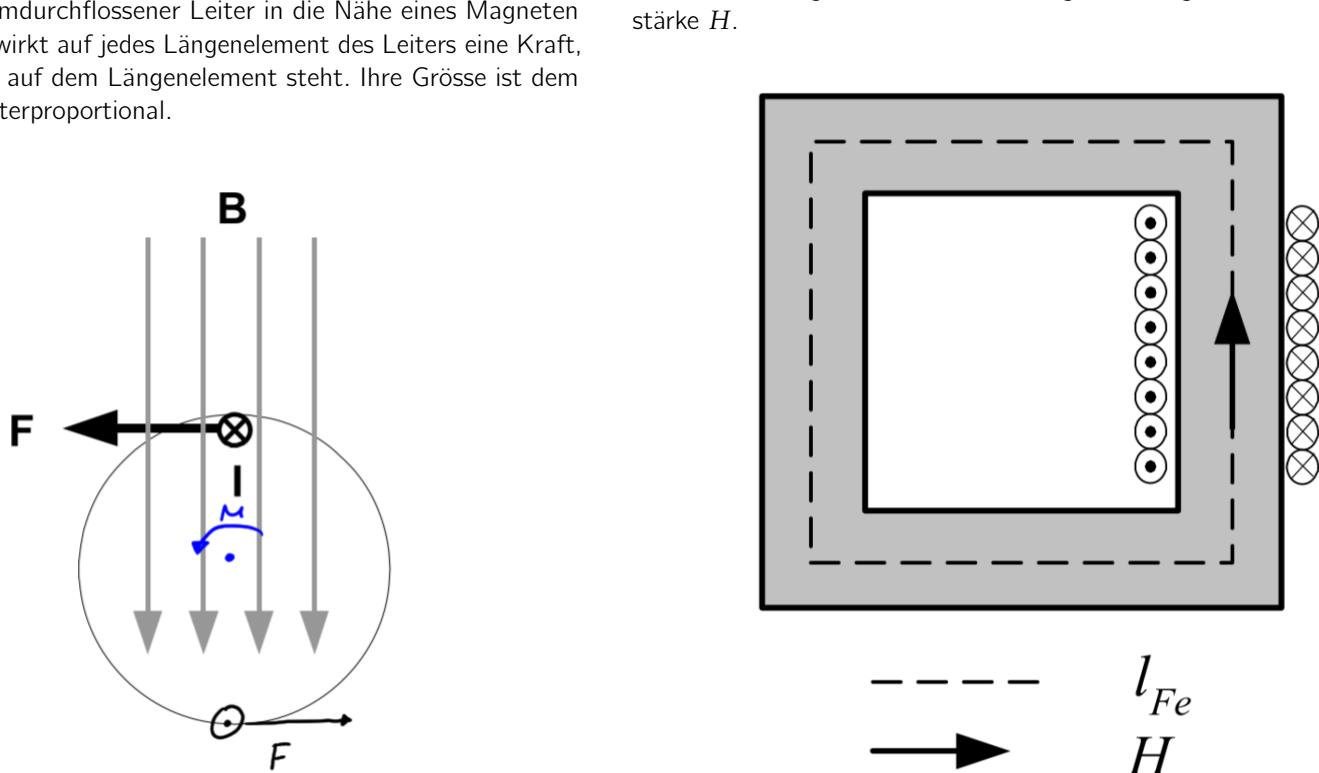
$$\vec{F} = l(\vec{i} \times \vec{B})$$

Steht der Leiter im Rotor senkrecht zum Magnetfeld so folgt

$$F = l \cdot i \cdot B$$

Durchflutungsgesetz

Das Durchflutungsgesetz verbindet die Ursache der Magnetfelds, die Durchflutung θ , mit deren Wirkung, der magnetischen Feldstärke H .



Durchflutung [A]

$$\theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = H \cdot l_{Fe} = \sum I = N \cdot I = \iint \vec{j} \cdot d\vec{A}$$

Magnetische Feldstärke [$\frac{A}{m}$]

$$H = \frac{N \cdot I}{l_{Fe}}$$

Magnetische Flussdichte [T]

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \text{ oder Magnetisierungskennlinie}$$

Permeabilität [$\frac{Vs}{Am}$]

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$$

relative Permeabilität []

μ_r ist Materialabhängig

Magnetischer Fluss [Vs]; [Wb]

$$\phi = B \cdot A_{Fe}$$

Induzierte Spannung [V]

$$u = N \frac{d\phi}{dt} = \underbrace{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{A_{Fe}}{l_{Fe}} N^2}_{L} \frac{d}{dt} i = \frac{d}{dt} \Psi$$

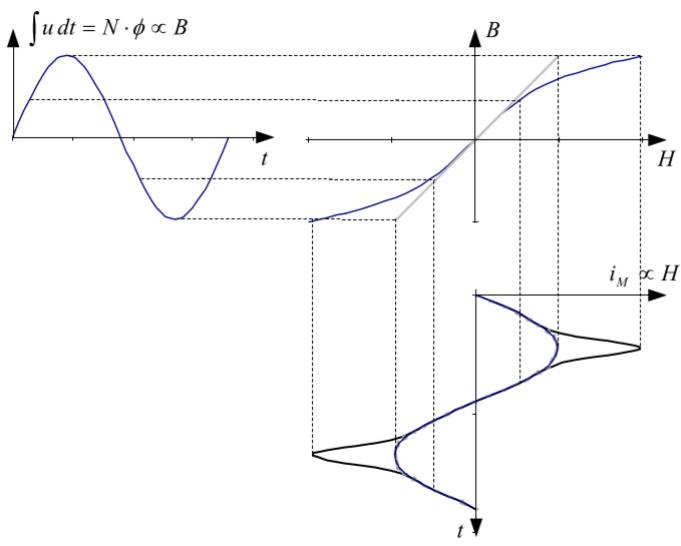
Flussverkettung [Vs]; [Wb]

$$\Psi = N\phi = Li$$

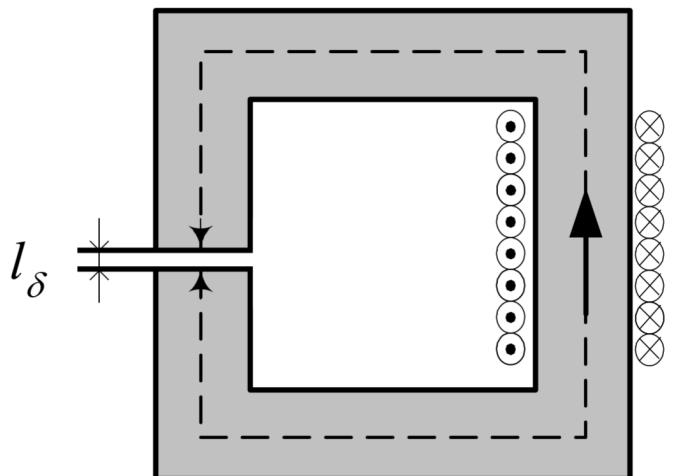
Induktivität [H]

$$L = \frac{N^2 \cdot A_{Fe} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{l_{Fe}}$$

Werden grosse Induktivitätswerte benötigt, wird mit ferromagnetischem Material gearbeitet. Dabei müssen Sättigungseffekte beachtet werden (B-H-Kennlinie)



werden. Der **Fluss** ϕ ist im Luftspalt und im Eisen gleich, ebenso die Querschnittsfläche A .



Luftspalt

In Drosseln mit Luftspalt wird dabei die Feldstärke vornehmlich durch die Luftspaltlänge bestimmt. Bei sehr grossem μ_r kann der Anteil der Eisenweglänge am Umlaufintegral sogar vernachlässigt

$$\begin{array}{c} \leftarrow \rightarrow \\ \longrightarrow \end{array} \quad l_{Fe} \quad H$$

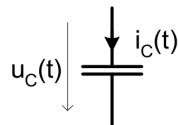
Durchflutung [A] $\theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = H_{Fe} \cdot l_{Fe} + H_\delta \cdot l_\delta = \sum I = N \cdot I$

magnetische Feldstärke [$\frac{A}{m}$] $H_{Fe} = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} = \frac{\phi}{\mu_0 \mu_r A}$ $H_\delta = \frac{B}{\mu_0} = \frac{\phi}{\mu_0 A}$

Magnetischer Fluss [Vs]; [Wb] $\phi \approx \frac{N \cdot I \cdot \mu_0 \cdot A}{l_\delta}$ $H_\delta = \frac{N \cdot I}{l_\delta}$

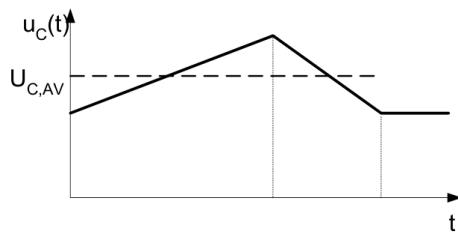
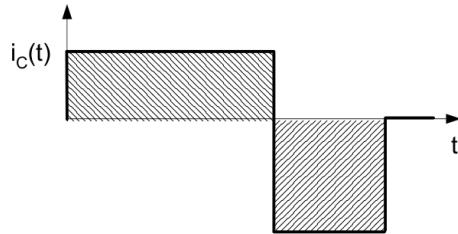
Kapazität & Induktivität

Kapazität C

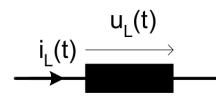


$$i_C = C \cdot \frac{du}{dt} \Leftrightarrow u_C = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt = \frac{t}{C} I_C$$

Kurzschluss: $i_C \rightarrow \infty$

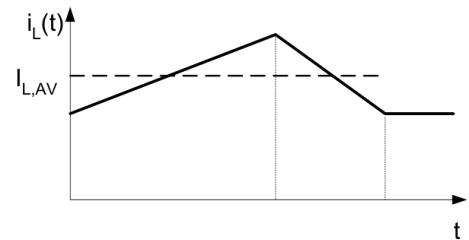
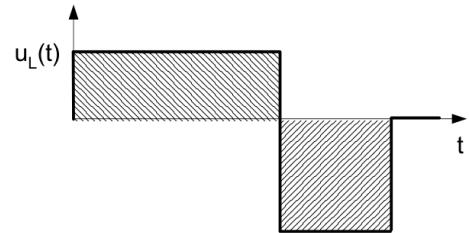


Induktivität L



$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt} \Leftrightarrow i_L = \frac{1}{L} \int u_L(t) dt = \frac{t}{L} U_L$$

Leerlauf: $u_L \rightarrow \infty$



Periodische Signale

Fourierreihe

Ein periodisches Signal

$$s(t) = s(t \pm mT_0) \quad -\infty < t < +\infty \quad \text{mit } m = 1, 2, 3, \dots$$

lässt sich als reelle Fourier Reihe darstellen. Die Fourierreihe ist eine unendliche Summe von cos- und sin-Funktionen, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache von ω_1 sind.

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t)]$$

Mit dem Zusammenhang $\omega_1 = 2\pi f_1 = \frac{2\pi}{T_1}$.

Koeffizient $\frac{a_0}{2}$ entspricht dem **Mittelwert** \bar{X} .

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} [x(\omega_1 t) \cdot \cos(n \cdot \omega_1 t)] d(\omega_1 t)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} [x(\omega_1 t) \cdot \sin(n \cdot \omega_1 t)] d(\omega_1 t)$$

Amplitudenspektrum \hat{X}_n & Phasenspektrum φ_n

$$\hat{X}_n = X_{n,p} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \varphi_n = \arctan \left(\frac{a_n}{b_n} \right)$$

$$\hat{X}_n [dB] = 20 \log_{10} \left(\frac{\hat{X}_n [V]}{X_B [V]} \right)$$

als Bezugswert X_B wird oft der Effektivwert des Signals oder die Amplitude der Grundschwingung verwendet.

Damit lässt sich das Signal $x(t)$ durch ein Summe von Sinusfunktionen mit Phasenverschiebung darstellen

$$x(t) = \bar{X} + \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{X}_n \cdot \sin(n\omega_1 t + \varphi_n)]$$

Gerade Funktion

$$x(\omega_1 t) = x(-\omega_1 t)$$

Ist $x(\omega_1 t)$ eine *gerade Funktion* (Bsp. Kosinus) so gilt

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} [x(\omega_1 t) \cdot \cos(n \cdot \omega_1 t)] d(\omega_1 t), \quad b_n = 0$$

Ungerade Funktion

$$x(\omega_1 t) = -x(-\omega_1 t)$$

Ist $x(\omega_1 t)$ eine *ungerade Funktion* (Bsp. Sinus) so gilt

$$a_n = 0, \quad b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi [x(\omega_1 t) \cdot \sin(n\omega_1 t)] d(\omega_1 t)$$

(linearen) Mittelwert $X_{MW}/X_{AV}/\bar{X}$

$$X_{AV} = \bar{X} = \frac{a_0}{2} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} x(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x(\omega_1 t) d(\omega_1 t)$$

Effektivwert

$$X_{eff} = X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} x^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x^2(\omega_1 t) d(\omega_1 t)}$$

Der Effektivwert lässt sich auch aus dem Mittelwert eines Signals und den Amplituden der Oberschwingungen berechnen

$$X_{eff} = X_{rms} = \sqrt{\bar{X}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\hat{X}_n^2}{2}} = \sqrt{\bar{X}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} X_{n,rms}^2}$$

Rein Sinusförmig gilt

$$\hat{X} = \sqrt{2} X_{eff}$$

Leistungsberechnung

Einphasige Leistungen (allgemein)

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

! Wirkleistung P

Die Wirkleistung P entspricht dem Mittelwert von $p(t)$:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt$$

Einphasige Leistungen (periodisch)

Wichtig: Folgend Annahme, dass $u(t)$ und $i(t)$ periodisch sind und mit gleicher Periodendauer T .

$$P = \sum_{v=0}^{\infty} \frac{\hat{U}_v \cdot \hat{I}_v}{2} \cos(\varphi_v) = \sum_{v=0}^{\infty} \hat{U}_{v,eff} \cdot \hat{I}_{v,eff} \cdot \cos(\varphi_v)$$

! Important

Nur gleiche Frequenzanteile in U & I tragen zur Wirkleistung bei!

$$\lambda = \frac{P}{S}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

P	: Wirkleistung
Q	: Blindleistung
S	: Scheinleistung
U_{eff}, I_{eff}	: Effektivwerte Strom & Spannung
λ	: Leistungsfaktor

Einphasige Leistung (sinusförmige Spannung)

Häufiger Fall: sinusförmigen Spannung und ein ebenfalls periodischer, nicht-sinusförmiger Strom.

Es gilt:

$$u(t) = U_{eff} \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) \quad U_{v=1,eff} = U_{eff} \quad U_{v>1,eff} = 0$$

$$i(t) = I_{AV} + \sum_{v=1}^{\infty} \hat{I}_v \cdot \sin(v \cdot \omega t + \varphi_v)$$

! Important

Nur die Grundschwingung des Stromes zusammen mit der sinusförmigen Spannung erbringt **Wirkleistung**.

$$P = U_{eff} \cdot I_{v=1,eff} \cdot \cos(\varphi_1)$$

Ist $\varphi_1 \neq 0$, zusätzliche *Grundschwingungsblindleistung* Q_1 und folglich auch eine *Grundschwingungsscheinleistung* S_1 :

$$Q_1 = U_{eff} \cdot I_{v=1,eff} \cdot \sin(\varphi_1)$$

$$S_1 = U_{v=1,eff} \cdot I_{v=1,eff}$$

Die übrigen Frequenzanteile des Stromes verursachen Verluste in den Leitungen (Wirkleistung = 0). Dies wird *Verzerrungsblindleistung* D genannt.

$$D = U_{eff} \cdot I_{v>1,eff} = U_{rms} \cdot \sqrt{I_{AV}^2 + I_{v=2,eff}^2 + I_{v=3,eff}^2 + \dots}$$

Die Scheinleistung ist das Produkt der Effektivwerte und zwischen den verschiedenen Leistungen besteht folgender Zusammenhang.

$$S = U_{eff} \cdot I_{eff}$$

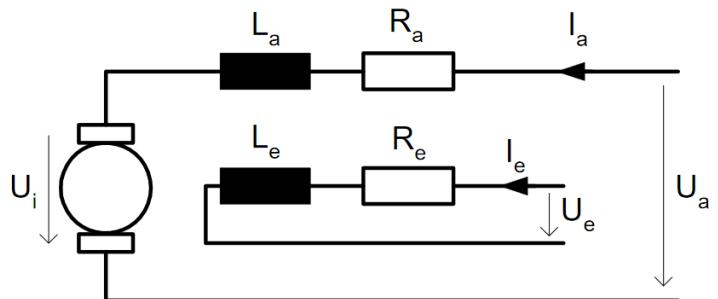
$$S^2 = P^2 + Q^2 = P^2 + Q_1^2 + D^2 = S_1^2 + D^2$$

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{I_{v=1,eff}}{I_{eff}} \cos(\varphi_1)$$

Q_1 : Grundschwingsblindleistung

S_1 : Grundwellenscheinleistung

D : Verzerrungsblindleistung



Klirrfaktor

Der Leistungsfaktor λ zeigt, wie optimal die Wirkleistung übertragen wird. Allgemein gilt $\lambda \leq \cos \varphi_1$ (=: kein Wirkleistungsverlust, < Verlust).

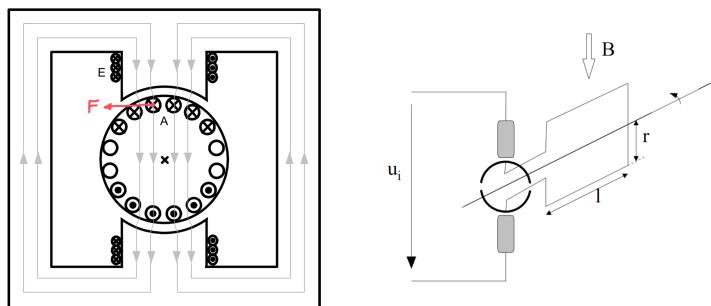
Der Klirrfaktor k beschreibt die Qualität, mit $k \rightarrow 0$ sehr gut ist (keine Oberschwingungen).

$$k_i = \frac{I_{v>1,eff}}{I_{eff}} = \sqrt{\frac{I_{eff}^2 - I_{v=1,eff}^2}{I_{eff}^2}}$$

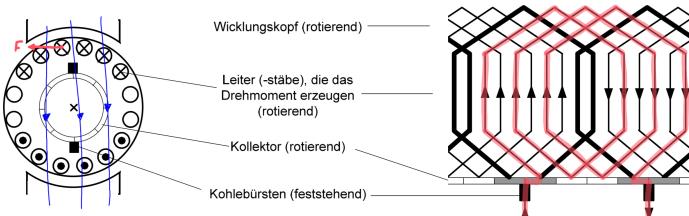
Gleichstrommaschine

Aufbau

Durch die *Erregerwicklung* fliesst der *Erregerstrom*, welcher ein magnetisches Feld erzeugt, das den Luftspalt und den Rotor durchdringt. Bei permanenterregten Gleichstrommaschinen wird das Feld mit einem Permanentmagnet erzeugt



Die Wicklungen sind dabei so auf den Rotor gewickelt, dass ein kontinuierlicher Stromkreis über mehrere Windungen zustande kommt



Ersatzschaltung Fremderregt

Für den elektrischen Teil einer *fremderregten* Maschine ergibt sich folgendes Ersatzschaltbild

Die Hauptgleichungen (*als Verbrauchersystem, d.h. im Motorbetrieb*):

Ankerkreis (*Stator*)

$$U_a = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + U_i$$

Erregerkreis (*Rotor*)

$$U_e = R_e \cdot I_e + L_e \cdot \frac{dI_e}{dt}$$

Mechanisch

$$M_{el} = M_{Last/Welle} + M_{Reibung} + J \frac{d\omega_m}{dt}$$

Elektr. \leftrightarrow Mech.

$$U_i = c \cdot \phi \cdot \omega_m$$

$$\omega_m = 2\pi f_m = 2\pi \frac{n [\text{min}^{-1}]}{60 [\frac{\text{s}}{\text{min}}]}$$

$$M_{el} = c \cdot \phi \cdot I_a$$

i Maschinenkonstante c

Enthält unter anderem die Windungszahl. Sie ist bekannt oder kann messtechnisch ermittelt werden.

Erregerfluss

$$\phi = \frac{L_e}{N_e} \cdot I_e$$

Stationär gilt

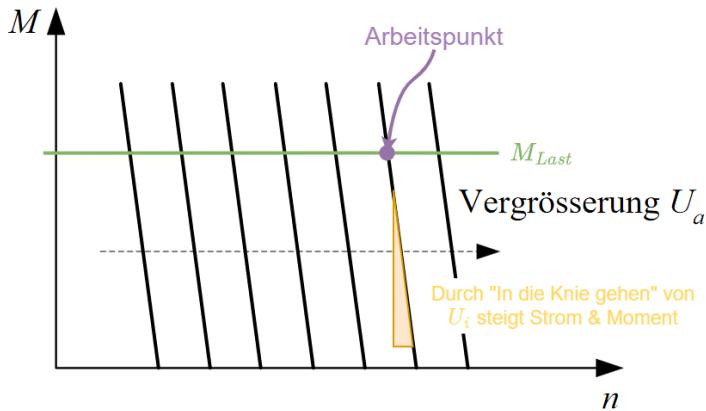
$$U_a = U_i + R_a \cdot I_a = c \cdot \phi \cdot \omega_m + R_a \cdot I_a \quad \phi \text{ konstant, wenn } I_e \text{ konstant}$$

Im **Leerlauf** ($M = 0$, $I_a = 0$, $U_a = U_i$) gilt

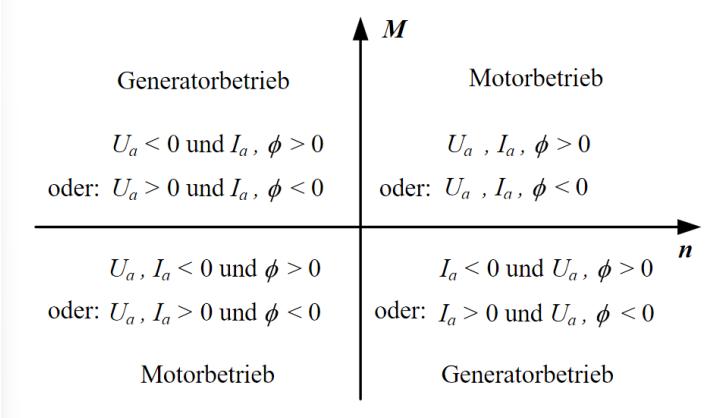
$$\omega_{m0} = \frac{U_a}{c\phi} \quad n_0 = \omega_{m0} \cdot 2\pi \frac{n [\frac{1}{\text{min}}]}{60 [\frac{\text{s}}{\text{min}}]}$$

Bei **konstantem Fluss** und **veränderlicher Ankerspannung** gilt

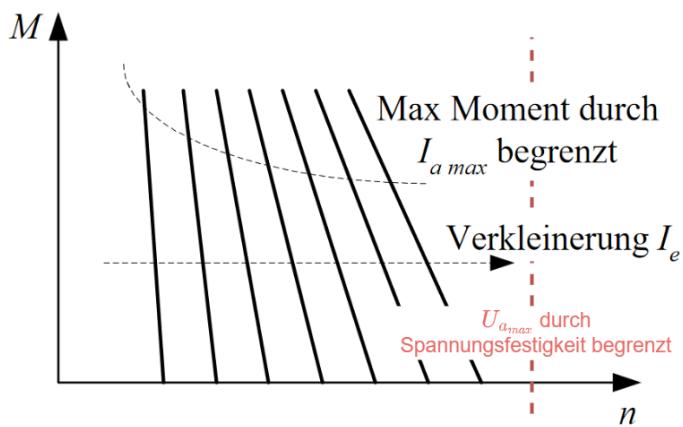
$$\omega_m = \frac{U_a}{c\phi} - \frac{R_a}{c^2\phi^2} \cdot M_{el}$$



Zum umkehren der Drehrichtung muss entweder der Fluss oder der Ankerstrom umgekehrt werden. Unter **Vierquadrantebetrieb** versteht man den Betrieb in beide Drehrichtungen, wobei sowohl Motor- als auch Generatorbetrieb möglich ist



Bei **veränderlichem Fluss** und **konstanter** Ankerspannung erhält man folgende M-n-Kennlinie

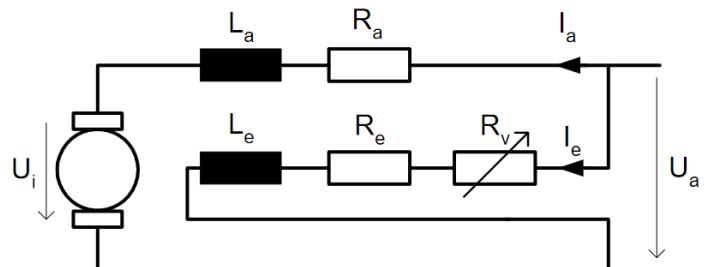


man erhält somit eine Drehzahlregelung über die Ankerspannung oder den Erregerfluss. Erfolgt eine Drehzahlerhöhung durch Verkleinerung des Erregerflusses, spricht man von **Feldschwächung**. Allgemein streben Gleichstrommaschinen eine **Gleichgewichtsposition** an, bei der gilt

$$U_a = U_i = c \cdot \underbrace{\phi \omega_m}_{\phi \uparrow \omega \downarrow | \phi \downarrow \omega \uparrow}$$

Ersatzschaltung Nebenschlussmaschine

Für den elektrischen Teil einer **Nebenschlussmaschine** gilt folgendes Ersatzschaltbild



Durch die Schaltungsart sind Erregerkreis und Ankerkreis parallel geschalten ($U_a = U_e$), so wird die Erregung über den Vorwiderstand R_V beeinflusst

$$\phi = \frac{L_e}{N_e} \cdot I_e = \frac{L_e}{N_e} \cdot \frac{U_a}{R_e + R_V}$$

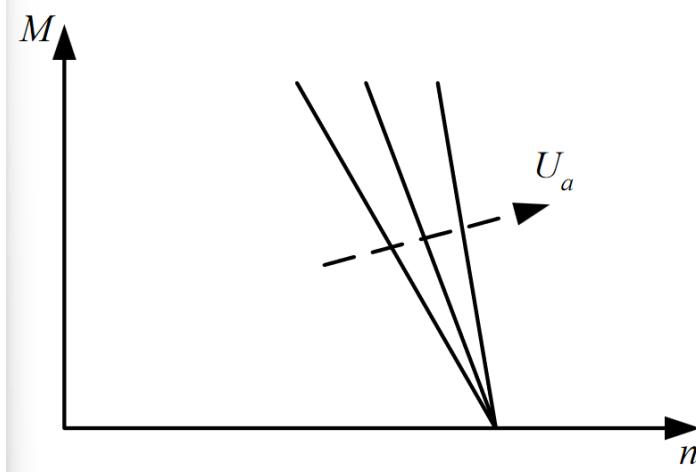
Im **Leerlauf** gilt

$$\omega_m = \frac{N_e(R_e + R_V)}{c \cdot L_e}$$

Für die Drehzahlabhängigkeit des Moments gilt

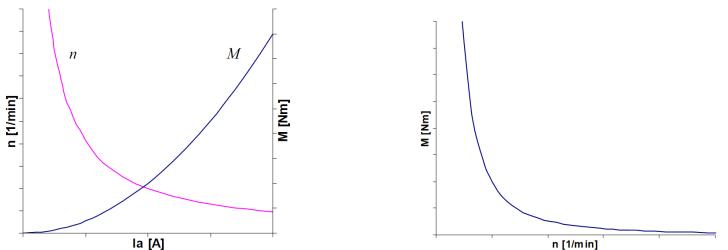
$$\omega_m = \frac{N_e(R_e + R_V)}{c \cdot L_e} - \frac{R_a \cdot (R_e + R_V)^2 \cdot N_e^2}{(c \cdot L_e \cdot U_a)^2} \cdot M_{el}$$

Eine höhere Klemmenspannung U_a bewirkt also eine flachere M-n-Charakteristik



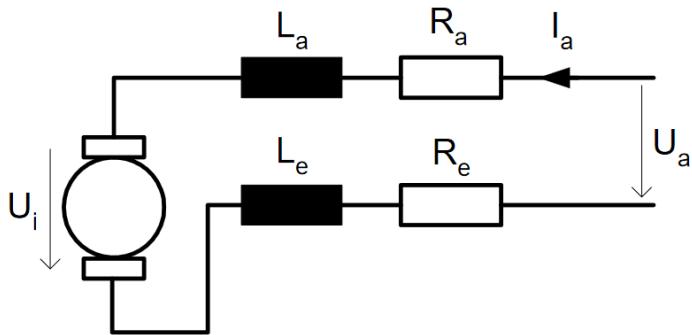
$$U_a = \begin{cases} \text{Allg.} & U_a = U_i + (R_a + R_e) \cdot I_a + (L_a + L_e) \frac{dI_a}{dt} \\ \text{DC:} & U_a = U_i + (R_a + R_e) \cdot I_a \\ \text{AC:} & U_a^2 = (U_i + (R_a + R_e) \cdot I_a)^2 + (\omega_e \cdot (L_a L_e) \frac{dI_a}{dt})^2 \end{cases}$$

Die Seriemaschine darf **nicht** im Leerlauf betrieben werden, da dort die Drehzahl sehr hoch ist ($\omega_m \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$). Siehe:



Ersatzschaltung Seriemaschine

Für den elektrischen Teil einer Seriemaschine gilt folgendes Ersatzschaltbild



Durch die Schaltungsart sind Erregerkreis und Ankerkreis in Serie geschalten ($I_a = I_e$)

$$\phi = \frac{L_e}{N_e} \cdot I_e = \frac{L_e}{N_e} \cdot I_a$$

$$\omega_m = \frac{U_a - (R_a + R_e)I_a}{c \frac{L_e}{N_e} I_a} = \frac{U_a}{c\phi} - \frac{(R_a + R_e)I_a}{c\phi} \text{ mit } \phi \propto I$$

Zur Vereinfachung schreibt man

$$c_1 = c \frac{L_e}{N_e}$$

und damit gilt

$$\omega_m = \frac{U_a}{\sqrt{c_1} \sqrt{M}} - \frac{R_a + R_e}{c_1} \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$$

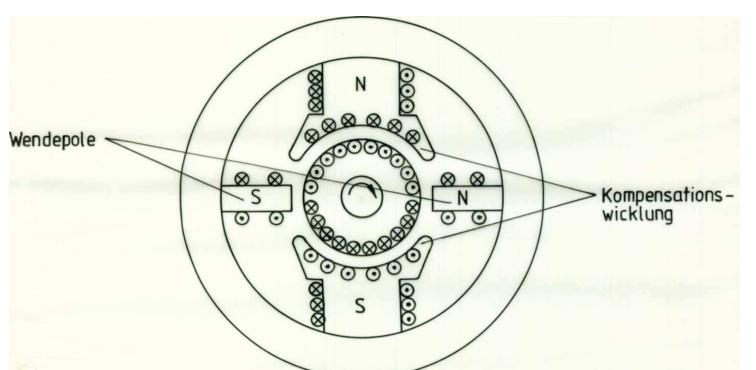
Zudem gilt für die U_a und I_a , mit $U_i = c_1 \omega_m I_a$

Ankerrückwirkung

Die **Ankerrückwirkung** entsteht durch die Überlagerung des Erregerfeldes mit dem Ankerfeld und beeinflusst das Luftspaltfeld im Motorbetrieb. Im ungesättigten Zustand heben sich Flussverstärkung und Fluss schwächung auf, wodurch die induzierte Spannung der Maschine unverändert bleibt. Im gesättigten Zustand führt die Ankerrückwirkung jedoch zu einer Verringerung der induzierten Spannung. Zudem können durch Feldverzerrungen große Spannungsdifferenzen zwischen benachbarten Kollektorlamellen entstehen, was zu einem Rundfeuer längs des Kollektors führen kann.

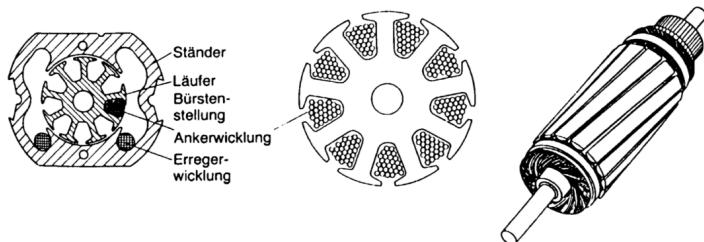
Bei großen Maschinen werden **Kompensationswicklungen** eingesetzt, um Feldverzerrungen unter den Hauptpolen auszugleichen. Sie befinden sich in den Polschuhen der Hauptpole und werden ebenfalls vom Ankerstrom durchflossen. Bei der Compoundmaschine wird ein ähnliches Verfahren angewendet, bei dem sowohl eine Serieerregerwicklung als auch eine fremderregte Nebenschlusswicklung vorhanden sind. Dadurch kann ein Gleichstromgenerator mit lastunabhängiger Ausgangsspannung realisiert werden.

Zur Verbesserung der Kommutierung werden **Wendepolwicklungen** in der geometrisch neutralen Zone angeordnet. Sie werden vom Ankerstrom durchflossen und induzieren eine Spannung in den Windungen, in denen der Strom das Vorzeichen wechselt, um die Stromwendung zu unterstützen. Bei kleineren, kostengünstigen Motoren werden diese Wicklungen jedoch oft weggelassen.



Universalmotor

Universalmotoren sind meist zweipolig aufgebaut, in der Regel mit symmetrischem Statorquerschnitt. Über die beiden Polkerne ist je eine Hälfte der Erregerwicklung gelegt. Zudem sind wegen der AC-Speisung sowohl Rotor als auch Stator geblecht ausgeführt



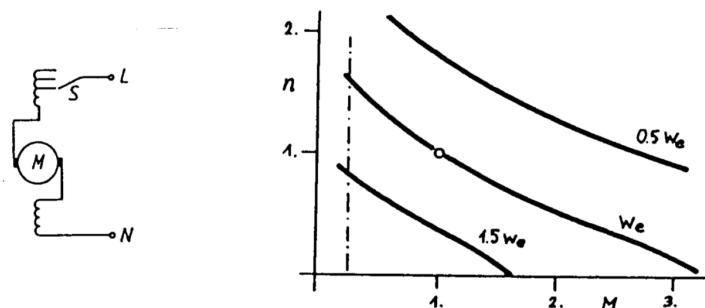
Drehfeldmaschinen

Wie für einen Serienmotor typisch, verfügt der Motor bei Leerlauf (oder niedrigem Moment) über eine sehr hohe Drehzahl da $\omega_m \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$ gilt.

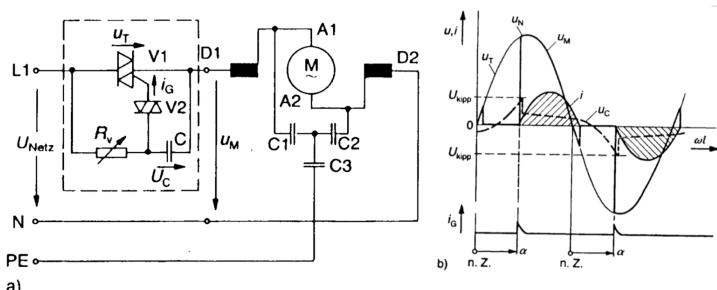
Drehzahlsteuerung

Die Drehzahl kann beim Universalmotor wie bei der Serieerregten Gleichstrommaschine durch *Variation der Speisespannung*, durch *Vorwiderstände* oder durch *Feldschwächung* eingestellt werden.

Des Weiteren kann für kleine und billige Anwendungen (z.B. Stabmixer) eine Anzapfung der Erregerwicklung über Stufenschalter erfolgen, die sogenannte **Feldumschaltung**



Für eine stufenlose Steuerung wird der **AC-Steller** verwendet. Als Stellglied bei kleinen Leistungen werden Triacs, die von Diacs gezündet werden verwendet



i Drehfeldmaschinen

- Synchronmaschine (SM)
- Asynchronmaschine (ASM)

i Kollektormotoren

- Gleichstrommaschine (GM)
- Universalmotor

Synchronmaschine (SM) —————

Asynchronmaschine (ASM) —————

Leistungshalbleiter —————

Übersicht

In der Leistungselektronik werden folgende Halbleiter eingesetzt:

Fremdgeführt:

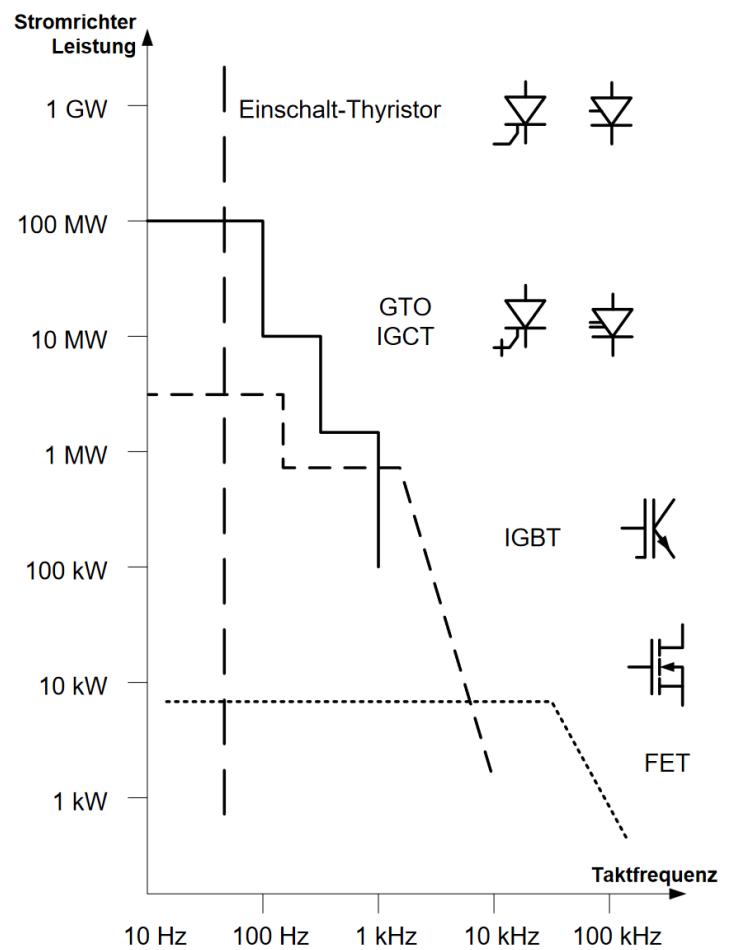
- Diode

Einschaltbar:

- Thyristor

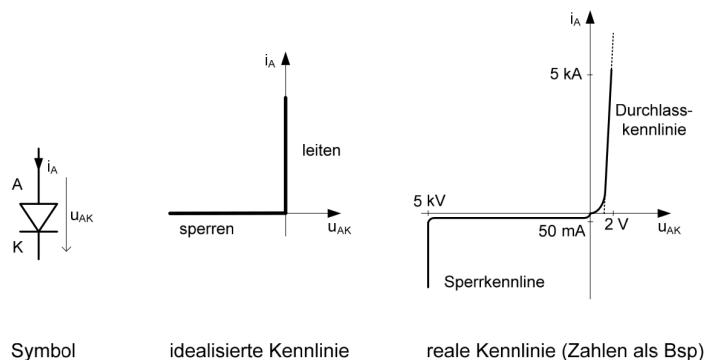
Ein- und Ausschaltbar:

- GTO (*Gate Turn Off Thyristor*)
- IGCT (*Insulated Gate Commutated Thyristor*)
- IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)
- FET (*Feld Effekt Transistor*)
- Bipolartransistor



Diode

Zweischicht-Element mit einem pn-Übergang



Der maximale Durchgangsstrom ist durch die Erwärmung der Diode bestimmt. Die typische maximale Junction-Temperatur beträgt $T_{j,max} = 150^\circ\text{C}$. Die Erwärmung der Diode wird durch die Kühlung und die Verluste bestimmt

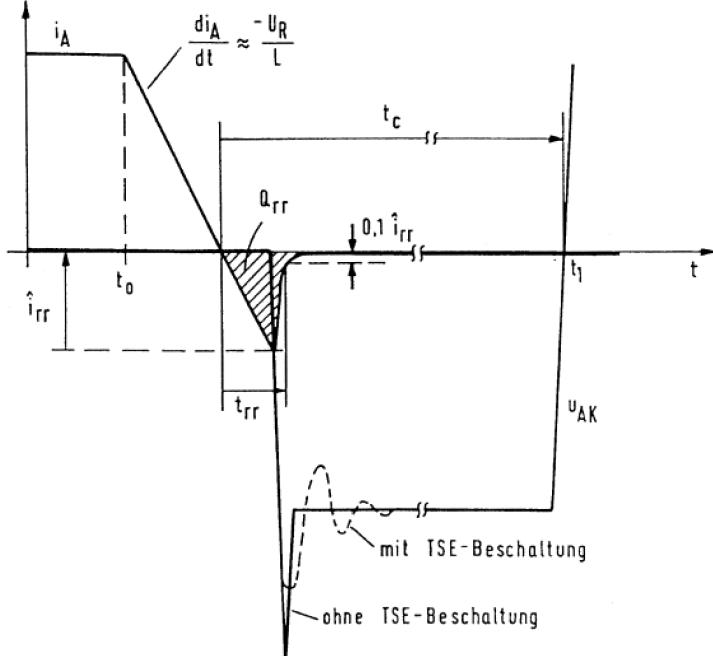
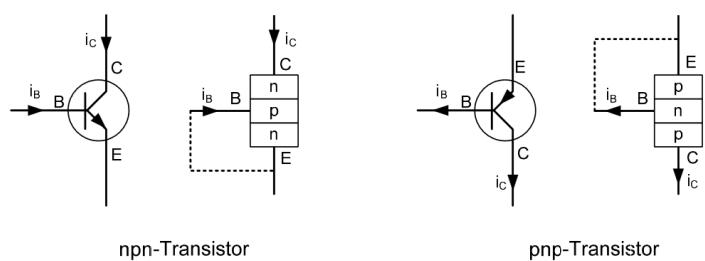
$$P_V = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt = U_D I_{avg} + r_d I_{rms}^2$$

Trägerstaueffekt TSE

Der Übergang von einem sperrenden zu einem leitenden Zustand bei einer Diode erfordert Zeit, um die pn-Schicht mit

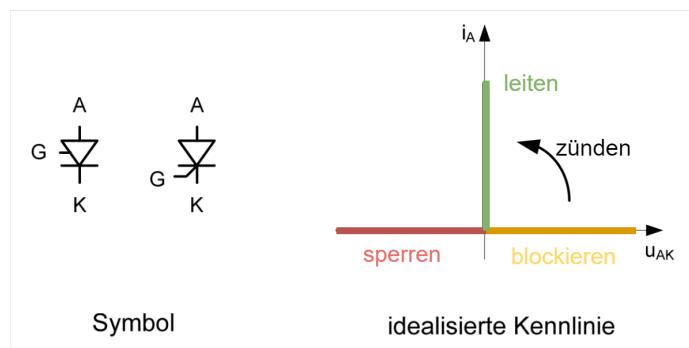
Ladungsträgern zu überschwemmen. Bei einem hohen di/dt beim Einschalten kann die Diode zerstört werden, da sie noch nicht vollständig leitend ist. Ähnlich erfolgt der Übergang vom leitenden zum sperrenden Zustand, bei dem die pn-Schicht von Ladungsträgern befreit werden muss, was zu Überspannungen führen kann.

Der Trägerstaueffekt kann mit der Ausschaltentlastung aus Section



Einschaltthyristoren

Hochleistungs-Einschaltthyristoren haben typische maximale Ströme von 2 bis 5kA und Spannungen bis zu 8.5kV. Durch Serie- oder Parallelschaltung lassen sich auch Stromrichter bis zu 1500kA oder 500kV realisieren.

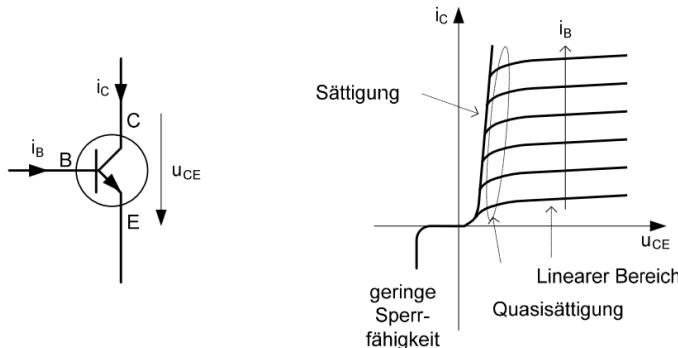


Schottky Dioden

Schottky-Dioden zeichnen sich durch eine deutlich geringere Durchlassspannung, einen geringeren Rückwärtsstrom und eine geringere Spannungszeitfläche Q_{rr} beim Ausschalten aus, sind jedoch nur für Sperrspannungen bis etwa 100 V geeignet.

Bipolartransistor

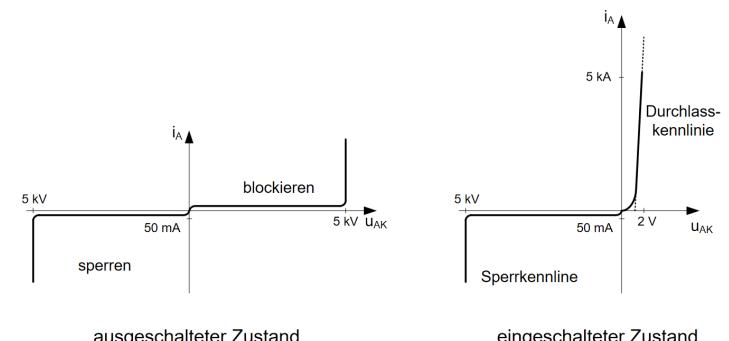
In der Leistungselektronik werden BJTs zur Minimierung der Verlustleistung nur im Zustand voll leitend oder voll sperrend eingesetzt. Sie können nur in einer Richtung Strom führen, Spannung jedoch in beiden Richtungen aufnehmen.



Symbol

Kennlinienfeld

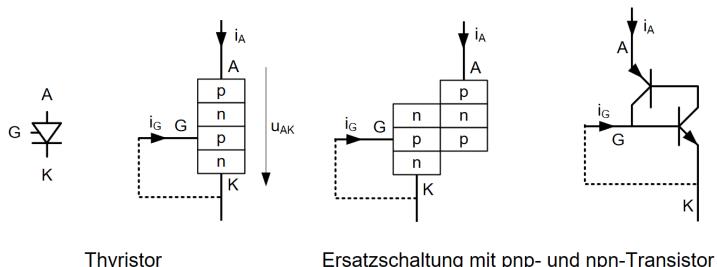
Die Struktur ist wie folgt aufgebaut



Verluste treten nur in eingeschaltetem Zustand auf, wobei sie in diesem Bereich wie bei der Diode verhalten

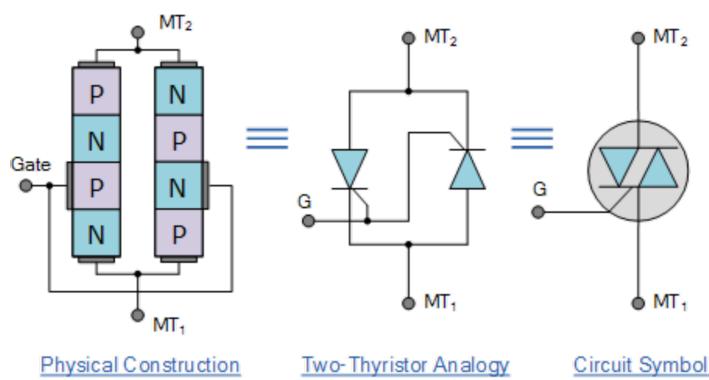
$$P_V = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt = U_D I_{avg} + r_d I_{rms}^2$$

Mit einem kurzen Gatestromimpuls aus einer elektronischen Gatestromquelle kleiner Leistung, können Thyristoren bei positiver Anoden-Kathoden-Spannung u_{AK} vom blockierten in den leitenden Zustand gekippt werden.



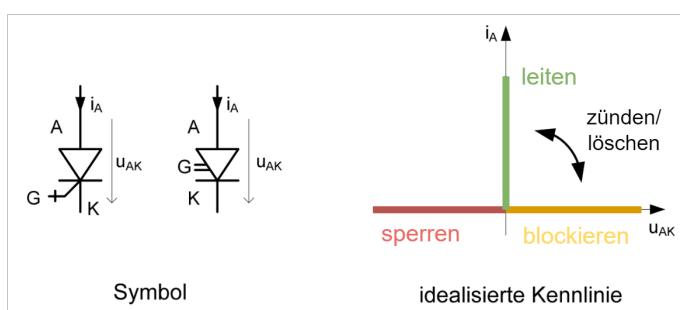
Triac

Der Triac entspricht der Antiparallelschaltung zweier Einschaltthyristoren und kann in beiden Richtungen Strom führen und Spannung aufnehmen. Triacs haben zum Zünden in beide Stromrichtungen ein gemeinsames Gate



Abschaltthyristoren GTO, IGCT

GTOs können im Vergleich zum Thyristor auch ausgeschalten werden.



Der Gatestrom zum Ausschalten beträgt

beim **GTO**

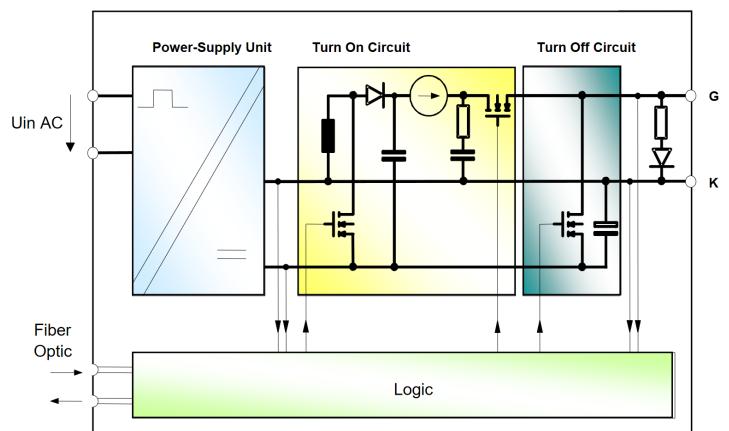
$$I_G \approx \frac{1}{3} i_A$$

beim **IGCT**

$$I_G \approx i_A$$

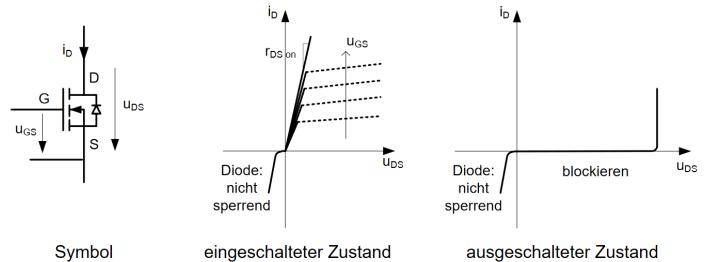
Für die Ansteuerung von GTOs wird eine *Turn-On*- und eine *Turn-Off*-Schaltung verwendet. Beim *Turn-On* muss ein genügend grosser Gatesstrom generiert werden. Zum ausschalten muss

der Gatestrom "aus dem Gate gezogen" werden. Dies geschieht mit Kondensatoren, die zwischen Kathode und Gate geschalten werden



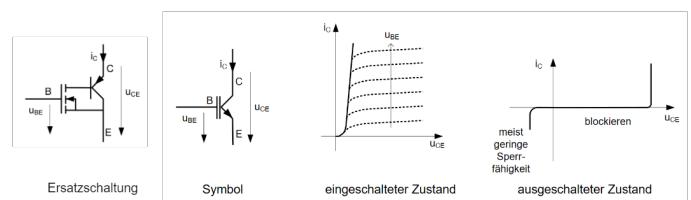
Feldeffekttransistor FET

Dä kensch



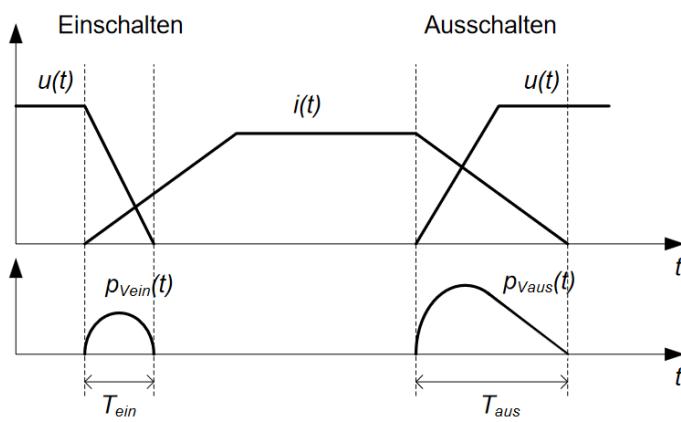
Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT

Für den IGBT wird ein Bipolar Transistor mit einem FET kombiniert. Es handelt sich also um einen spannungsgesteuerten Bipolartransistor.



Schaltverluste

Bei Dioden und Thyristoren können die Schaltverluste in der Regel vernachlässigt werden. Bei abschaltbaren Elementen entstehen Schaltverluste, die in der Regel proportional zur sperrenden Spannung, zum Strom im eingeschalteten Zustand und zur Schaltfrequenz *f* sind.



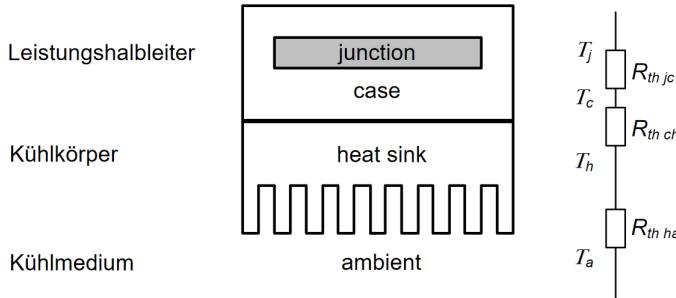
$$E_{ein} = \int_0^{T_{ein}} u(t) \cdot i(t) dt \quad E_{aus} = \int_0^{T_{aus}} u(t) \cdot i(t) dt$$

$$P_{V_{schalt}} = (E_{ein} + E_{aus}) \cdot f$$

Diese Schaltverluste kommen zu den Leitverlusten dazu, je nach Schaltfrequenz verändert sich das Verhältnis.

Kühlung

Jeder Halbleiter hat eine maximal zulässige Temperatur der Sperrsicht *Junction* $T_{j_{max}}$. Bei schaltbaren Elementen liegt diese typischerweise bei 125°C, bei Dioden können es 150°C oder noch mehr sein. Oberhalb dieser Temperatur verliert der Halbleiter an Sperrfähigkeit und wird beim anlegen einer Spannung durch den grossen Rückwärtsstrom zerstört.



Berechnungen analog zum ohmschen Gesetz mit $P_{V_{tot}} = P_{V_{leit}} +$

$$P_{V_{schalt}}$$

$$\Delta T_{jc} = T_j - T_c = P_{V_{tot}} \cdot R_{th_{jc}}$$

$$\Delta T_{ch} = T_c - T_h = P_{V_{tot}} \cdot R_{th_{ch}}$$

$$\Delta T_{ha} = T_h - T_a = P_{V_{tot}} \cdot R_{th_{ha}}$$

$$\text{oder mit } R_{th_{ja}} = R_{th_{jc}} + R_{th_{ch}} + R_{th_{ha}}$$

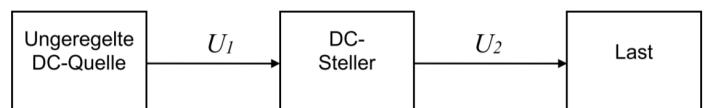
$$\Delta T_{ja} = T_j - T_a = P_{V_{tot}} \cdot R_{th_{ja}}$$

Die Temperatur der Sperrsicht des Halbleiters berechnet sich zu

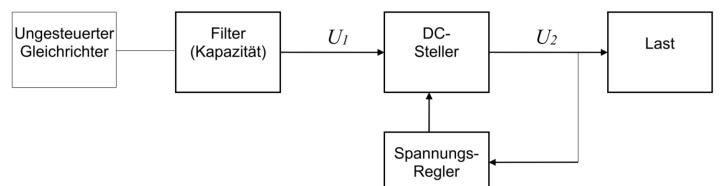
$$T_j = T_a + \Delta T_{ja}$$

Gleichstromsteller

Gleichstromsteller haben die Aufgabe, eine Gleichspannung U_1 in eine gegenüber U_1 höhere oder tiefere Gleichspannung U_2 umzuwandeln



Die Eingangsspannung U_1 wird oft mit einem ungesteuerten Gleichrichter erzeugt, folgt also alfälligen Netzspannungsschwankungen. Die Ausgangsspannung U_2 kann durch einen Regelkreis auf den gewünschten Wert eingestellt werden



Folgende Gleichstromsteller sind hauptsächlich im Einsatz

Tiefsetz- oder Abwärtssteller

step-down (**buck**) converter

$U_2 < U_1$

Hochsetz- oder Aufwärtssteller

step-up (**boost**) converter

$U_2 > U_1$

Hochsetz-Tiefsetz-Steller / Vierquadrantensteller

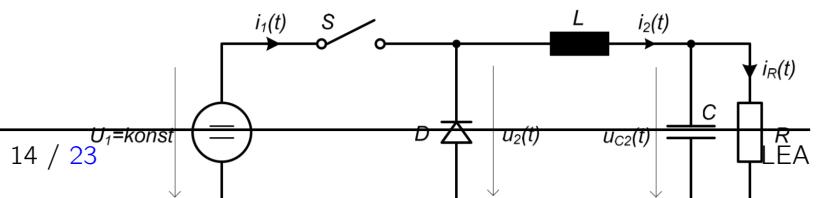
buck-boost converter / full bridge converter

$U_2 < U_1$ oder $U_2 > U_1$

Durchfluss- und Sperrwandler

integrierter Trafo

Abwärtsteller



Durch Regelmässiges ein- und ausschalten von S , lässt sich über die Impulsdauer der Mittelwert ($AV = \text{average}$) der Ausgangsspannung U_2 einstellen

$$U_{2AV} = \frac{1}{T} \int_0^{T_{ein}} u_2(t) dt = \frac{T_{ein}}{T} U_1 = aU_1 \quad \text{mit } a = \frac{T_{ein}}{T}$$

Unter der Annahme, dass der Steller verlustfrei arbeitet, gilt

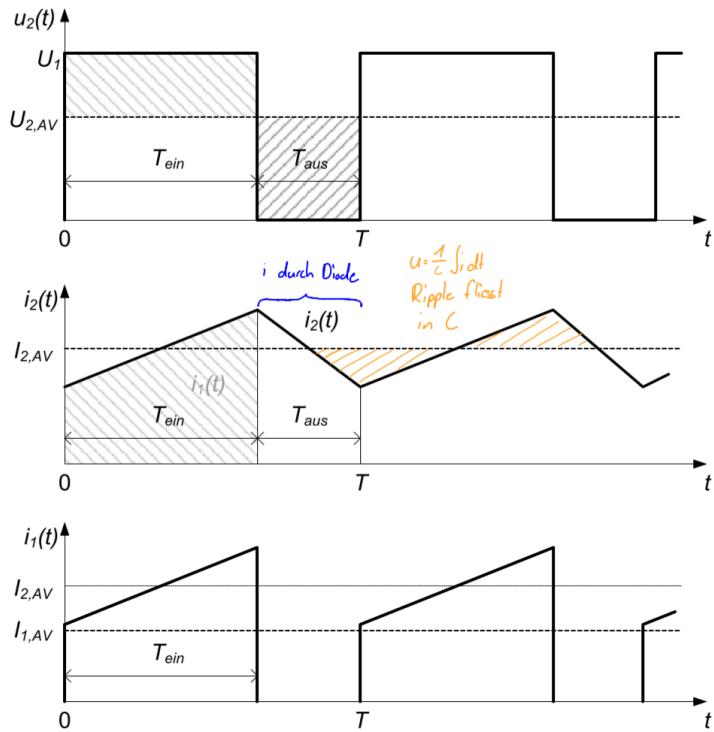
$$P_1 = U_1 I_{1AV}$$

$$P_2 = U_{2AV} I_{2AV} = aU_1 I_{2AV}$$

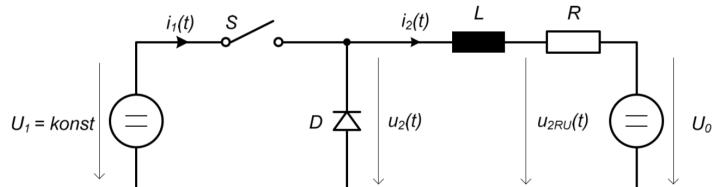
Und damit

$$I_{1AV} = aI_{2AV}$$

Wir erhalten also folgende Strom- / Spannungsverläufe im stationären Betrieb



Standard DC-Last



Da der Mittelwert der Spannung über L im stationären Betrieb null sein muss, gilt

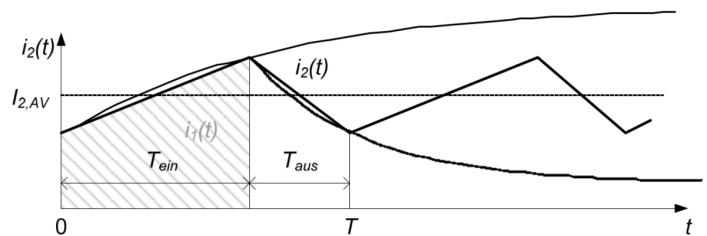
$$U_{2AV} = R \cdot I_{2AV} + U_0 \quad \text{bzw.} \quad I_{2AV} = \frac{U_{2AV} - U_0}{R}$$

Allgemein gilt

$$u_2 = L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i + U_0$$

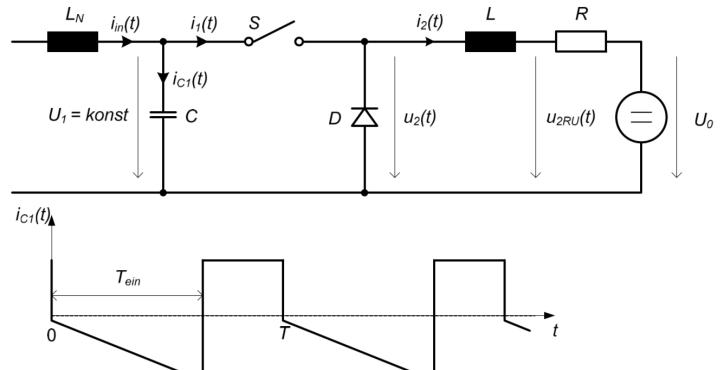
Nicht idealer Stromverlauf

Bei einer hohen Induktivität, wird der Strom $I_2(t)$ gut geglättet. Ist die Induktivität jedoch nicht sehr hoch oder die Taktfrequenz nicht deutlich kleiner als die Zeitkonstante $\tau = \frac{L}{R}$, setzt sich der Stromverlauf aus Auschnitten von e -Funktionen zusammen



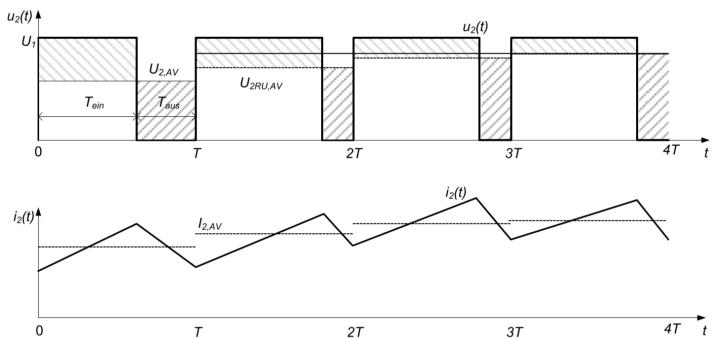
Glättungskondensator

Wird die Quelle mit einem Glättungskondensator ausgestattet, wird dieser mit unten dargestelltem Strom belastet



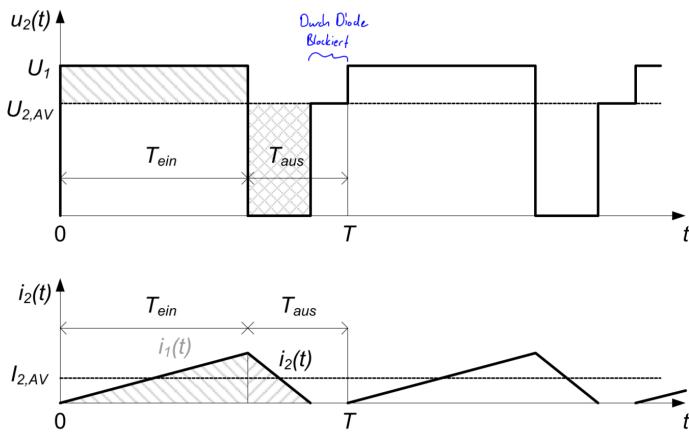
Arbeitspunkteinstellung

Bei Erhöhung des Aussteuerungsgrades a , stellt sich ein neuer stabiler Arbeitspunkt ein



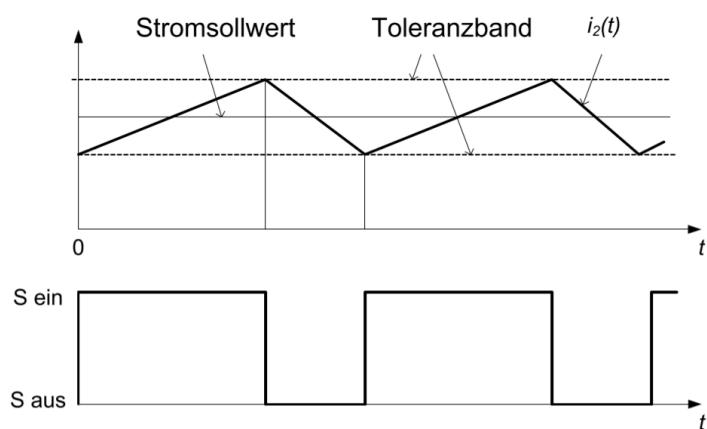
Lückbetrieb

Im Lückbetrieb wird $i_2(t)$ periodisch null. Das ist der Fall, wenn der **Strommittelwert kleiner als der halbe Stromrippel** ist. Die Ausgangsspannung wird bei Vorhandensein einer genügend grossen Kapazität parallel zum Lastwiderstand höher und abhängig vom Laststrom

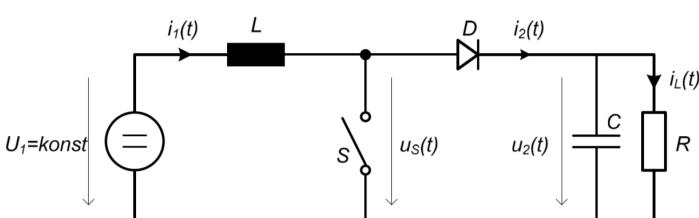


Toleranzbandsteuerung

Die Toleranzbandsteuerung beschreibt ein Prinzip, das ohne Pulsdauer- und Pulsfrequenzsteuerung auskommt. Der Schalter S wird dann geschlossen, wenn der Strom nach unten aus dem Toleranzband läuft und geöffnet, wenn der Strom die obere Grenze des Toleranzbandes überschreitet.



Aufwärtssteller



Durch Regelmässiges ein- und ausschalten von S , lässt sich über die Impulsdauer der Mittelwert ($AV = \text{average}$) der Ausgangsspannung U_2 einstellen

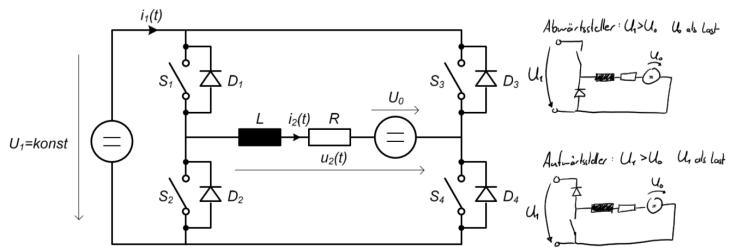
$$U_{2AV} = U_1 \frac{1}{1-a} \quad \text{mit } a = \frac{T_{ein}}{T}$$

Unter der Annahme, dass der Steller verlustfrei arbeitet, gilt

$$I_{2AV} = I_{1AV} (1-a)$$

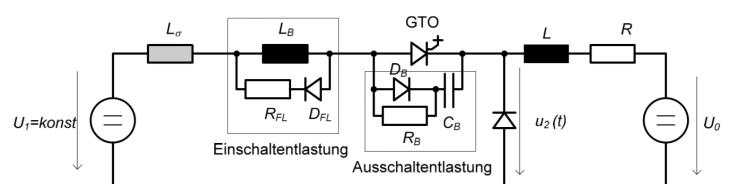
Vierquadrantensteller

Der Vierquadrantensteller (engl. Full Bridge DC-DC Converter) ist ein selbstgeführter Wechselrichter, kann aber auch als DC-Steller eingesetzt werden



Gleichstromsteller mit GTO

Bei gebrauch realer Halbleiter, müssen diese geschützt werden. Wird Ein GTO (Gate Turn Off Thyristor) eingesetzt, so müssen Strom- und Spannungssteilheit durch Entlastungsnetzwerke begrenzt werden



Stromsteilheitsbegrenzung beim Einschalten

Zur Begrenzung des Einschaltstroms wird manchmal eine zusätzliche Induktivität L_B benötigt, wenn die vorhandene Leitungsinduktivität L_σ nicht ausreicht. L_B muss jedoch mit einem Freilaufkreis (D_{FL}, R_{FL}) versehen werden, um Probleme beim Abschalten zu vermeiden. Zusammen bilden L_B, D_{FL} und R_{FL} das Einschaltentlastungsnetzwerk.

Spannungssteilheitsbegrenzung beim Abschalten

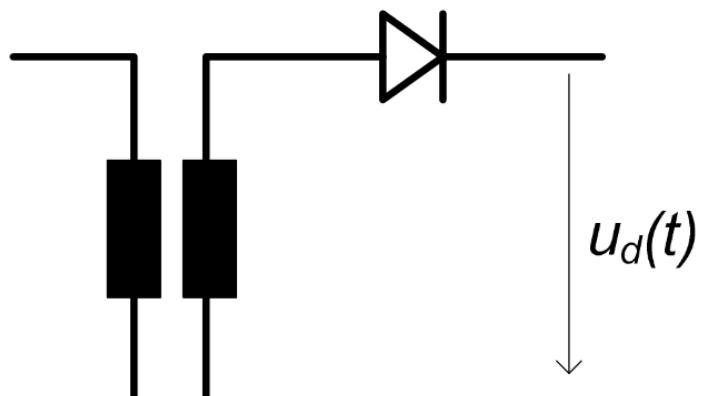
Die Spannungssteilheit beim Abschalten muss begrenzt werden, um Abschaltverluste zu minimieren und ungewolltes Wiedereinschalten zu verhindern. Dazu wird ein Ausschaltentlastungsnetzwerk verwendet, bestehend aus einem Kondensator C_B , einem Widerstand R_B und einem Bypass-Widerstand D_B . Die Komponenten sollten nah am GTO platziert werden und eine schnell schaltende Diode sowie einen induktivitätsarmen Kondensator enthalten. Der "Snubber" genannte Vorgang reduziert auch schädliche Überspannungen für den Halbleiter. C_B sollte jedoch nicht zu gross sein, um den Schaltvorgang nicht unnötig zu verlangsamen.

Transformatoren

Parameterbestimmung

Leerlaufversuch

Trafo wird primärseitig gespiesen und sekundärseitig offen gelassen.



Fremdgeführte Gleichrichter

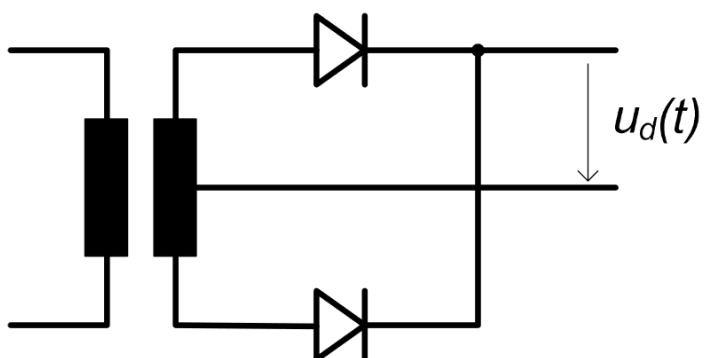
Fremdgeführte Gleichrichter benötigen eine Führungsspannung, welche die Kommutierung ermöglicht. Beim fremdgeführten Gleichrichter erfolgt diese Kommutierung natürlich, die Halbleiter löschen also, weil der Strom im Halbleiter bedingt durch äußere Einflüsse null wird. Die Führungsspannung kann vom Netz kommen (*netzgeführt*), oder es kann die induzierte Spannung einer Maschine sein (*maschinen- oder lastgeführt*).

Schaltungsart

M Einwegschaltung: Sekundärstrom im Transformator bzw. der Netzstrom ist ein Gleichstrom. Der Mittelpunkt der Sekundärwicklung (Sternpunkt bei dreiphasig) muss zugänglich sein (*Mittelpunktschaltung*).

B Zweiwegschaltung: Sekundärstrom im Transformator bzw. der Netzstrom ist ein Wechselstrom. Aufgrund des Gleichrichters wird diese Schaltung als *Brückenschaltung* bezeichnet.

M2



Phasenzahl

Aufgrund der Sekundärphasenzahl oft ein-, zwei-, drei-, oder mehrphasige Schaltung.

Pulszahl

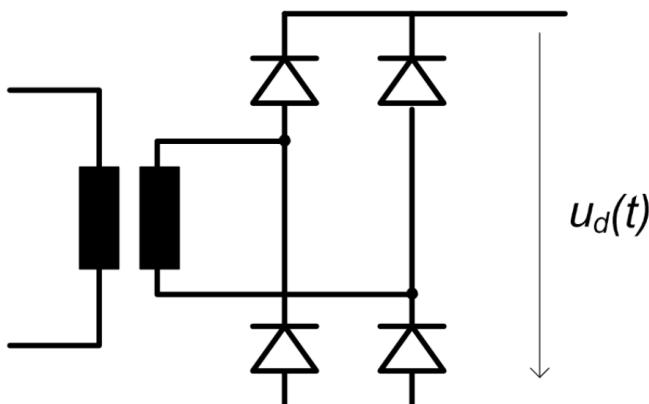
Die Pulszahl entspricht der Welligkeit der erzeugten Gleichspannung.

Steuerungsart

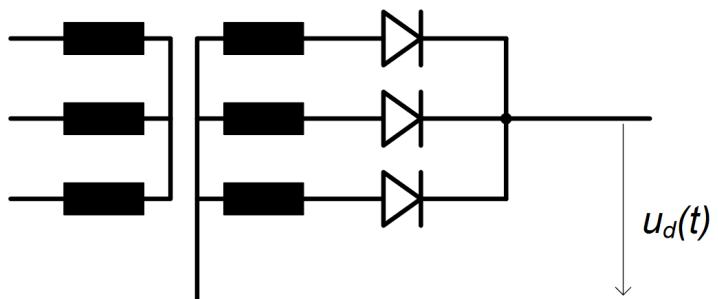
Ungesteuert (Diodengleichrichter) oder *gesteuert* (Thyristorgleichrichter).

i Bsp. B2

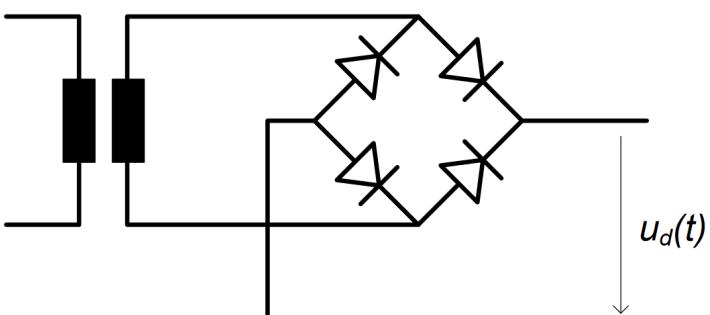
Brückenschaltung mit zweipulsiger Gleichspannung (zwei "Buckel" pro Netzperiode)



M3

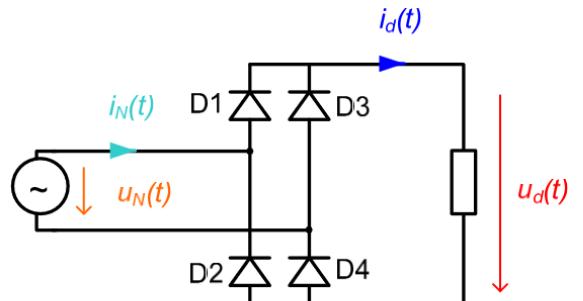
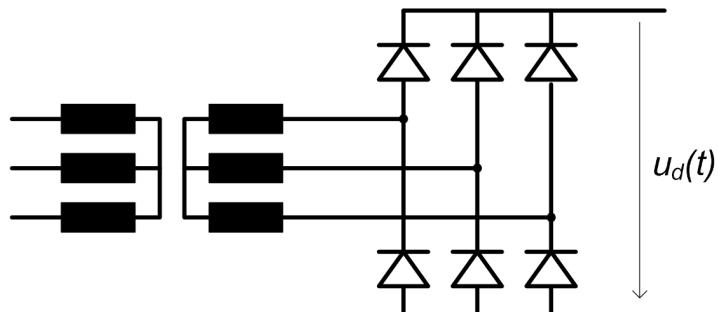


B2: Brückenschaltung 2 Dioden

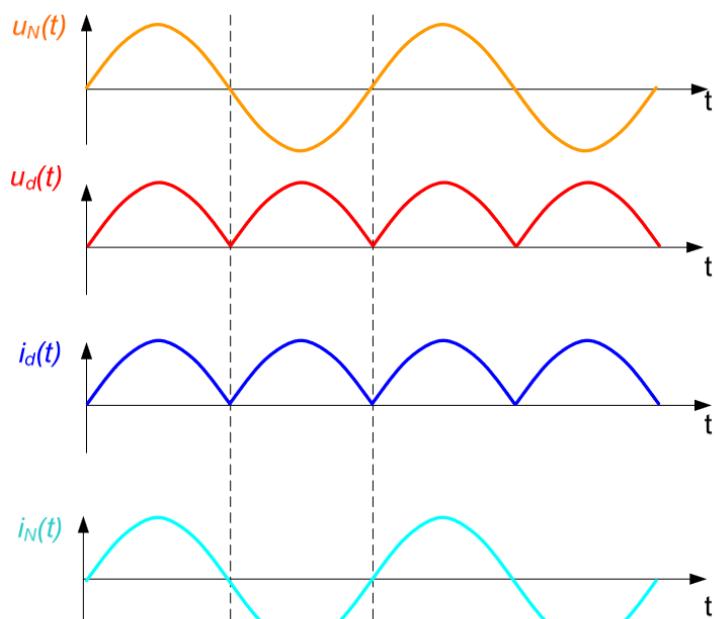
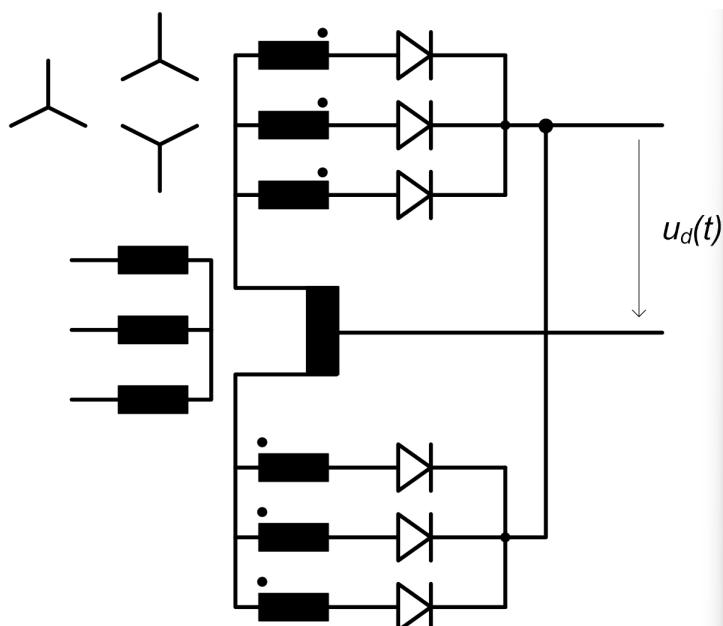


M1: Mittelpunktschaltung 1

B6



DSS6



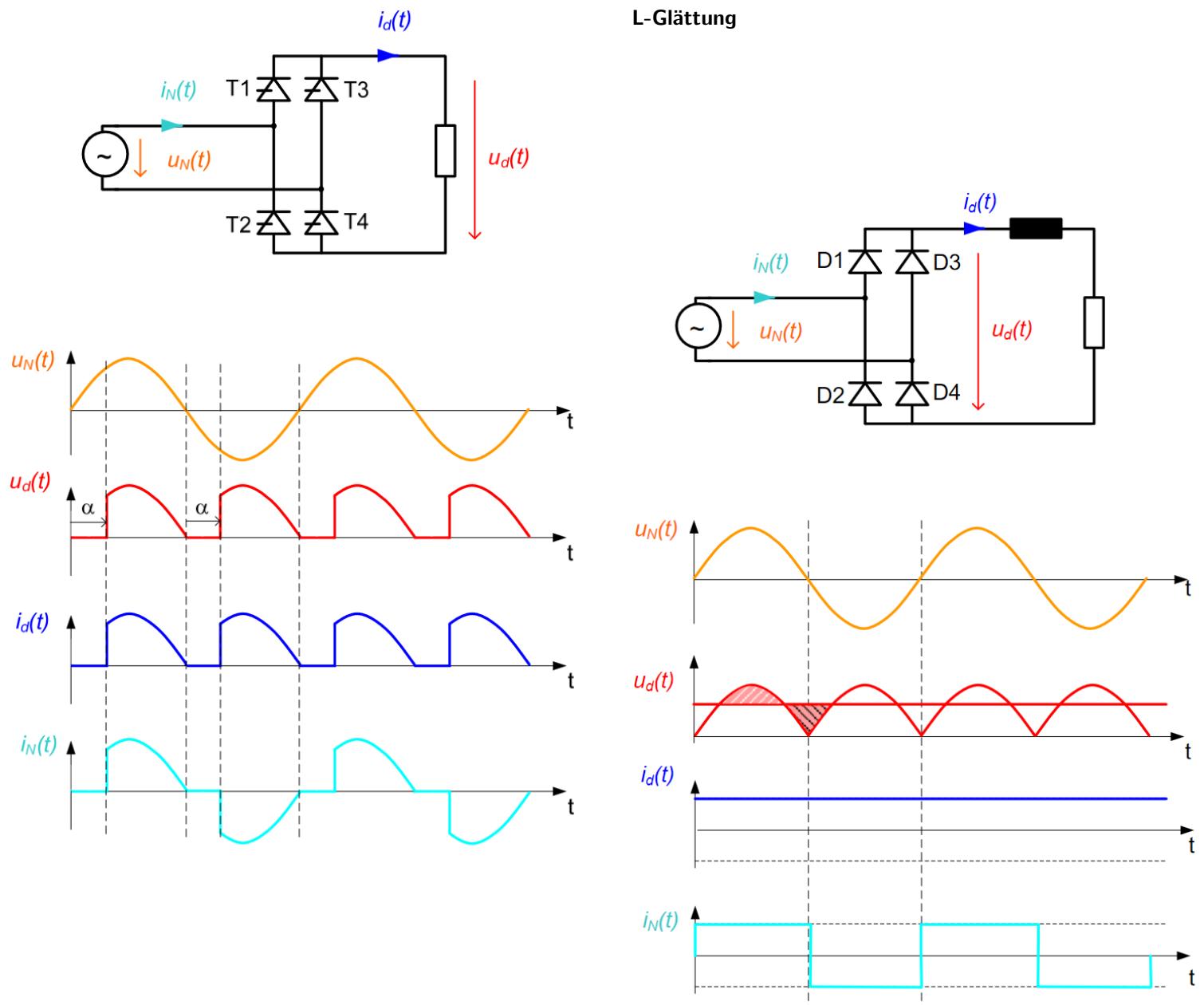
$$\begin{aligned} U_{di0} &= \frac{1}{T} \int_0^T u_d dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi u_d d\omega \\ &= \frac{2}{\pi} \hat{U} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_N \approx 0.9 \cdot U_N \end{aligned}$$

Einphasiger Gleichrichter

Ohm'sche Last

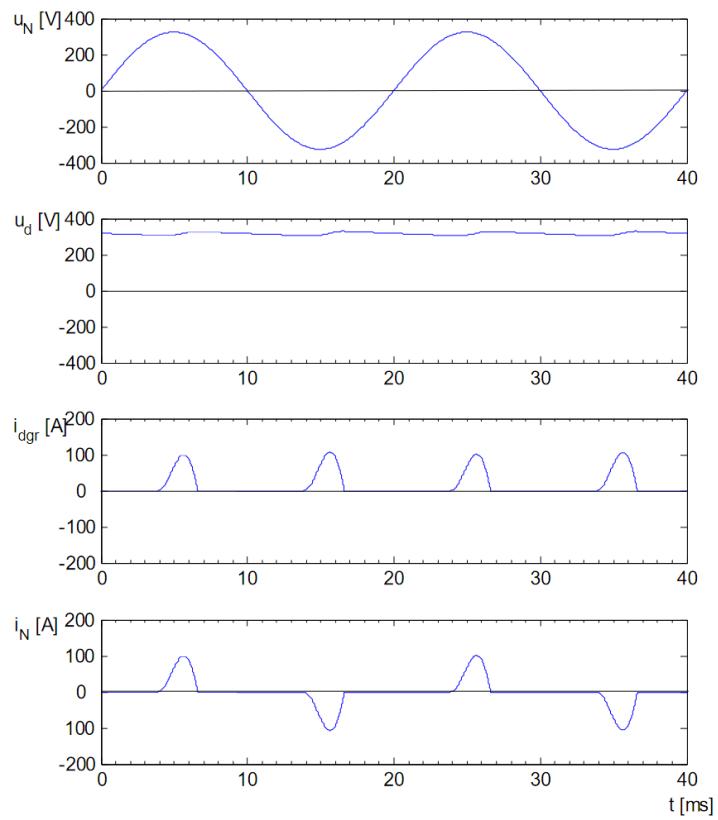
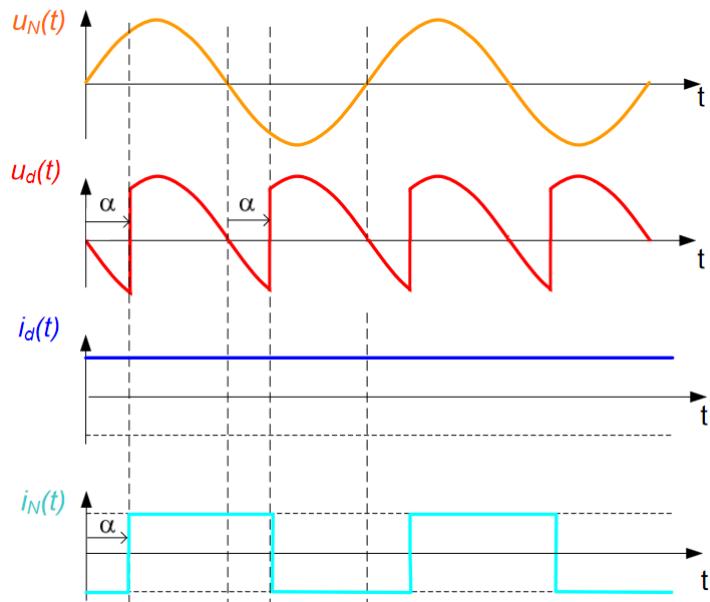
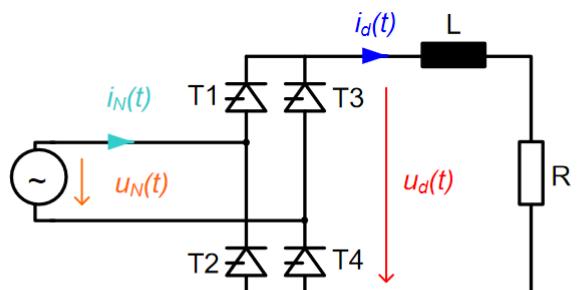
Mit Dioden

Mit Thyristoren



$$U_{di\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u_d d\omega = U_{di0} \frac{1 + \cos(\alpha)}{2}$$

$$U_{di0} \approx 0.9 \cdot U_N$$



$$U_{dia} = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot U_N & 0^\circ < \alpha < 90^\circ \\ \sqrt{2} \cdot U_N \cdot \sin(\alpha) & 90^\circ < \alpha < 180^\circ \end{cases}$$

Leistung bei L-Glättung

! Im Fall der idealen Glättung des Gleichstroms I_d

$$I_{N_{eff}} = I_d$$

Für die Wirkleistung gilt

$$\begin{aligned} U_{dia} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} u_d d\omega \\ &= U_{di0} \cos(\alpha) = 0.9 U_N \cos(\alpha) \end{aligned}$$

$$P_N = P_{dia} = I_d \cdot U_{dia} = I_d \cdot U_{di0} \cdot \cos(\alpha) = P_{di0} \cos(\alpha)$$

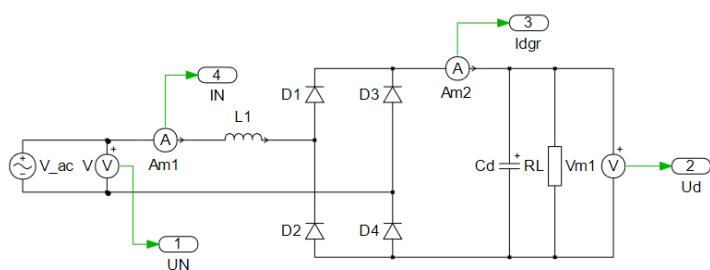
Für die Scheinleistung gilt

$$S_N = U_{N_{eff}} \cdot I_{N_{eff}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{di0} \cdot I_d = 1.11 \cdot P_{di0}$$

💡 Transformator Dimensionierung

Bei $\alpha = 0$ muss der Transformator auf das 1.11-fache der übertragenen Wirkleistung ausgelegt werden. Bei grösserem α sinkt die Wirkleistung bei gleichbleibender Scheinleistung weiter ab.

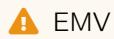
C-Glättung



Der Leistungsfaktor beträgt

$$\lambda = \frac{P_N}{S_N} = \frac{P_{dia}}{1.11 \cdot P_{di0}} = 0.9 \cos(\alpha)$$

Netzrückwirkung L-Glättung



Die eingeführten Oberschwingungen verzerren auch die Netzspannung und führen so unweigerlich zu Störungen.

Belastung der Halbleiter bei L-Glättung

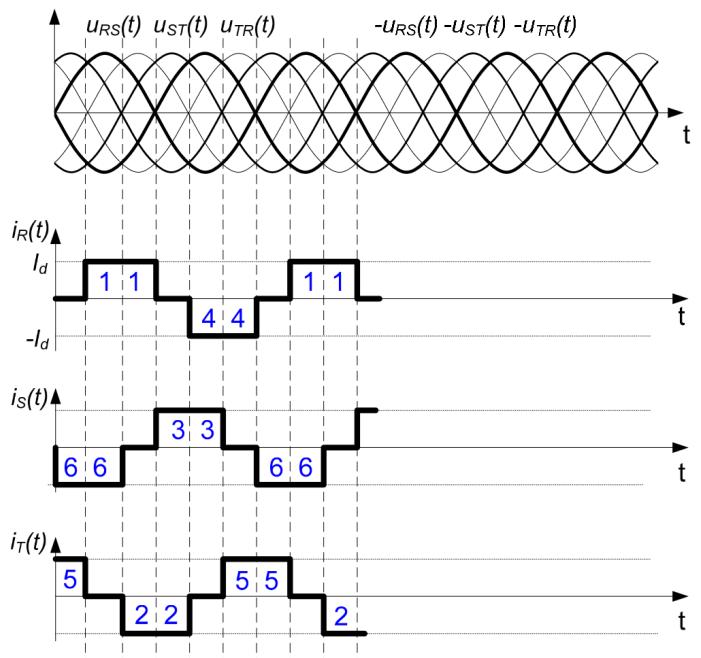
Der Strom durch die Halbleiter beträgt

$$i_{HL_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2}} I_d \quad i_{HL_{avg}} = \frac{1}{2} I_d$$

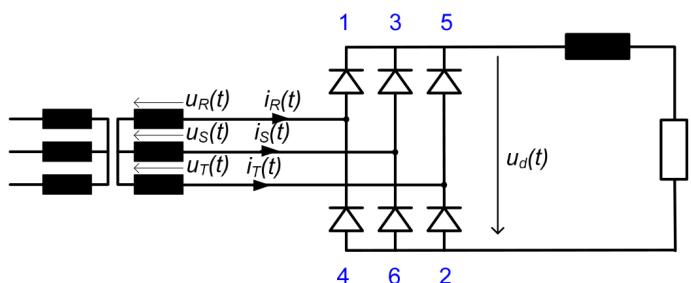
Die Fourieranalyse des rechteckförmigen Netzstroms ergibt

Dreiphasige Gleichrichter

Durch hinzufügen eines weiteren Phasenmodul an einen Brückengleichrichter, kann der Gleichrichter *B2* dreiphasig ans Netz angeschlossen werden.



$$i_N(t) = \frac{4}{\pi} I_d \left(\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right)$$



Für den Netzstrom gilt

$$i_{N_{eff}} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d$$

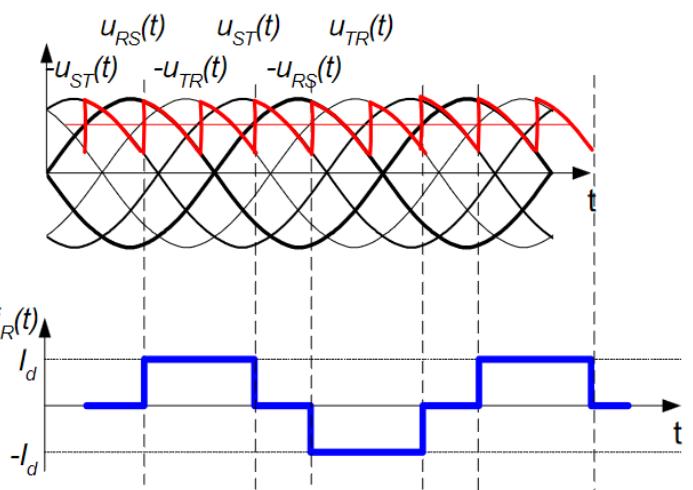
Für die Ausgangsspannung gilt analog zum zwei-phasigen Brückengleichrichter

$$U_{di0} = U_{N_{eff}} \frac{3\sqrt{2}}{\pi} = 1.35 \cdot U_{N_{eff}}$$

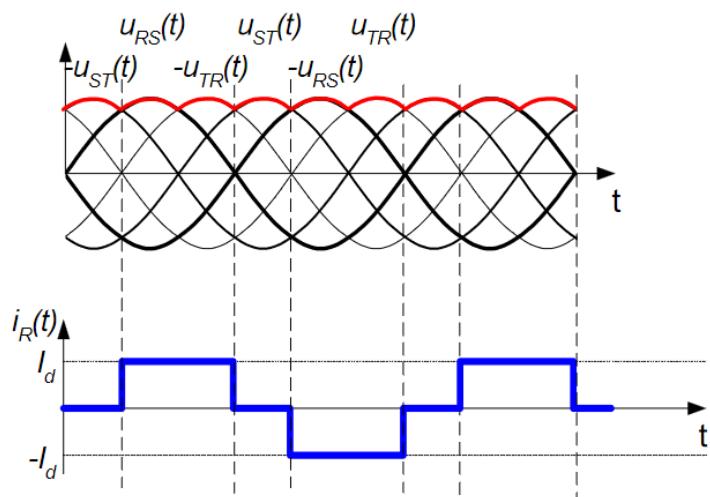
$$\alpha = 45^\circ$$

Desweiteren kann auch hier mit dem Zündwinkel die Ausgangsspannung beeinflusst werden

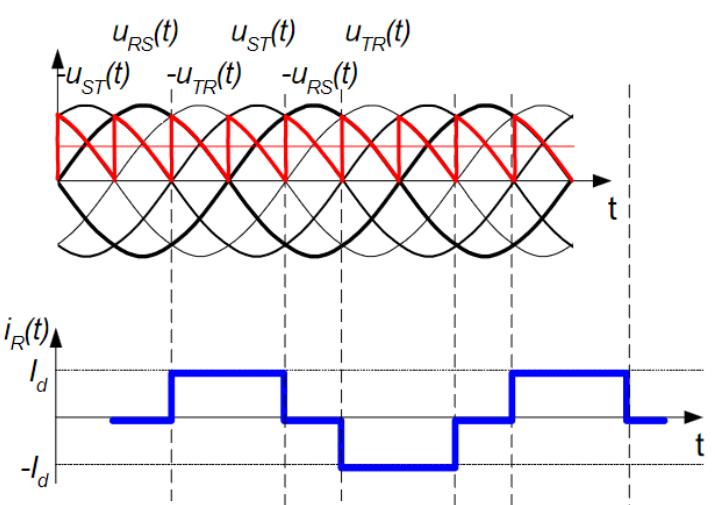
$$U_d = U_{di0} \cos(\alpha) = 1.35 \cdot U_{N_{eff}} \cdot \cos(\alpha)$$



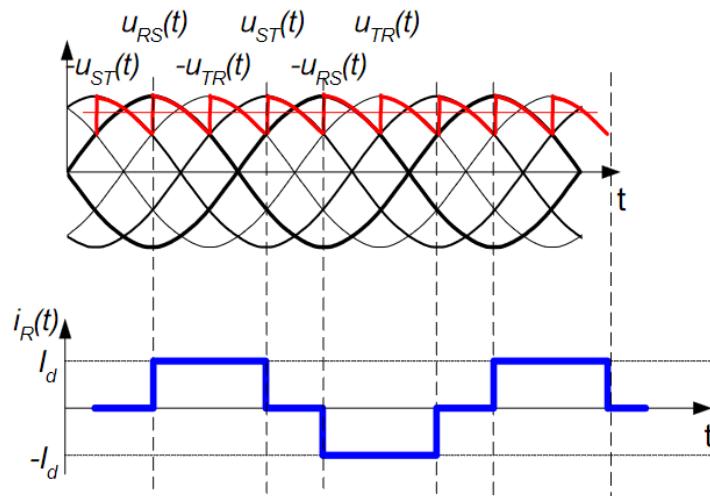
$$\alpha = 0^\circ$$



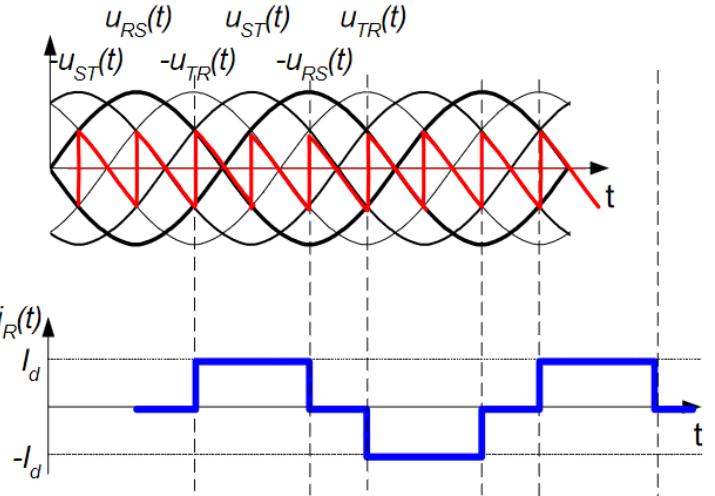
$$\alpha = 60^\circ$$



$$\alpha = 30^\circ$$



$$\alpha = 90^\circ$$



Belastung der Halbleiter dreiphasig

Der Strom durch die Halbleiter beträgt

$$i_{HL_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{3}} I_d \quad i_{HL_{avg}} = \frac{1}{3} I_d$$

Selbstgeführter Wechselrichter**Umrichter**