

Leistungselektronik & Elektrische Antriebe

Zusammenfassung

Joel von Rotz & Andreas Ming /  [Quelldateien](#)

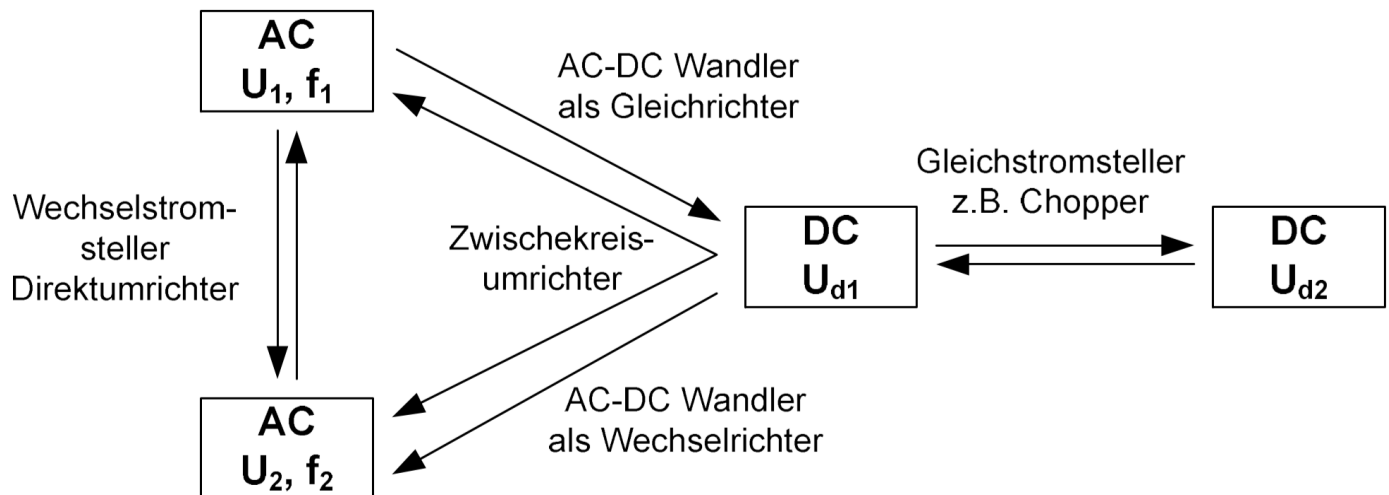
Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
1.1	Gleichstromsteller <i>Chopper</i>	3
1.2	Ungesteuerter Netzgeführter Gleichrichter	4
1.3	Gesteuerter Netzgeführter Gleichrichter	5
2	Grundlagen	6
2.1	Mechanik	6
2.2	Wirkungskette elektrischer Maschinen	7
2.3	Elektromechanische Energieumwandlung	8
2.3.1	Durchflutungsgesetz	9
2.3.2	Luftspalt	10
2.4	Fourier Reihe (<i>periodisch</i>)	11
2.5	Linearer Mittelwert	12
2.6	Effektivwert	12
3	Gleichstrommaschine	13
3.1	Aufbau	13
3.2	Ersatzschaltung <i>Fremderregt</i>	13
3.3	Ersatzschaltung <i>Nebenschlussmaschine</i>	17
3.4	Ersatzschaltung <i>Seriemaschine</i>	18
3.5	Ankerrückwirkung	20
3.6	Universalmotor	21
3.6.1	Drehzahlsteuerung	21
4	Gleichstromsteller	22
4.1	Abwärtssteller	23
4.1.1	Standard DC-Last	24
4.1.2	Nicht idealer Stromverlauf	25
4.1.3	Glättungskondensator	25
4.1.4	Arbeitspunkteinstellung	25
4.1.5	Lückbetrieb	26
4.1.6	Toleranzbandsteuerung	27
4.2	Aufwärtssteller	27
4.3	Vierquadrantensteller	27
4.4	Gleichstromsteller mit GTO	28
5	Fremdgeführte Gleichrichter	28
5.1	Einphasiger Gleichrichter	31
5.1.1	Leistung bei L-Glättung	32
5.1.2	Netzurückwirkung L-Glättung	32
5.1.3	Belastung der Halbleiter bei L-Glättung	32
5.2	Dreiphasige Gleichrichter	32
6	Leistungshalbleiter	34

7	Transformatoren	34
7.1	Parameterbestimmung	34
7.1.1	Leerlaufversuch	34
8	Drehfeldmaschinen	34
9	Synchronmaschine (SM)	34
10	Asynchronmaschine (ASM)	34
11	Selbstgeführter Wechselrichter	34
12	Umrichter	34

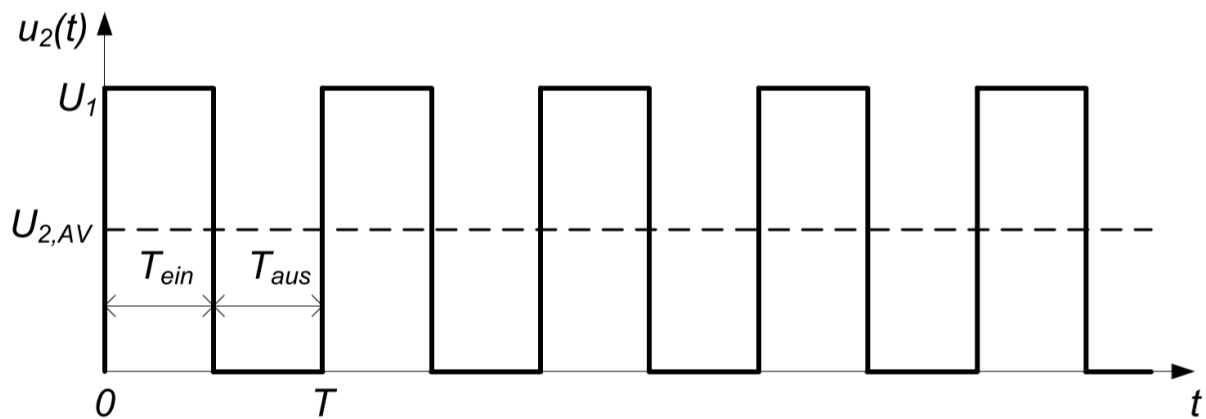
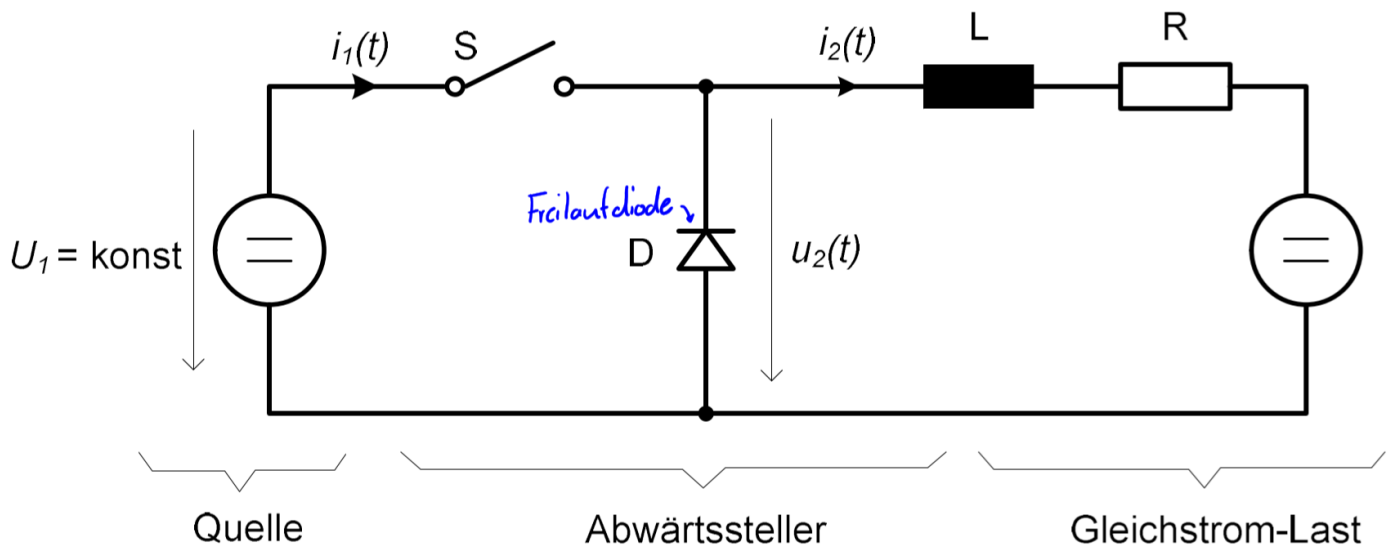
1. Einführung

Stromrichter sind Leistungselektronische Geräte welche dort eingesetzt werden wo zwischen der Speisung und dem Verbraucher eine Umformung der Stromart, der Spannung oder der Frequenz erforderlich ist.



1.1 Gleichstromsteller Chopper

Der Gleichstromsteller basiert auf dem zerhacken der Eingangsspannung



Die Ausgangsspannung wird durch das Verhältnis $\frac{T_{ein}}{T}$ festgelegt, wobei der Mittelwert eben diesem Tastverhältnis a folgt

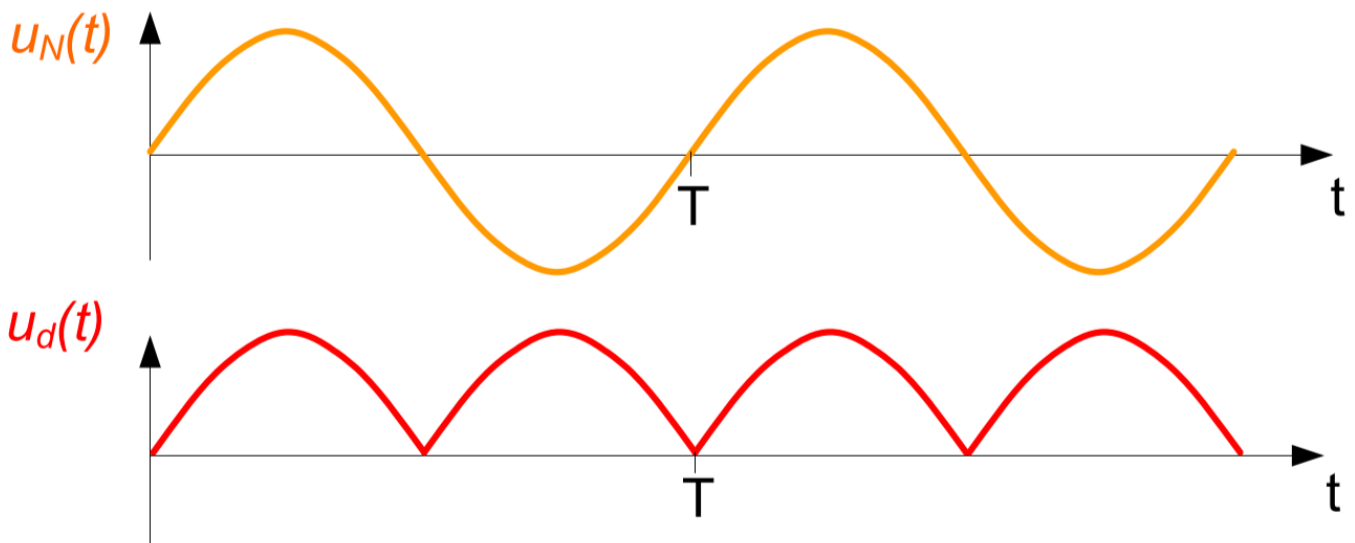
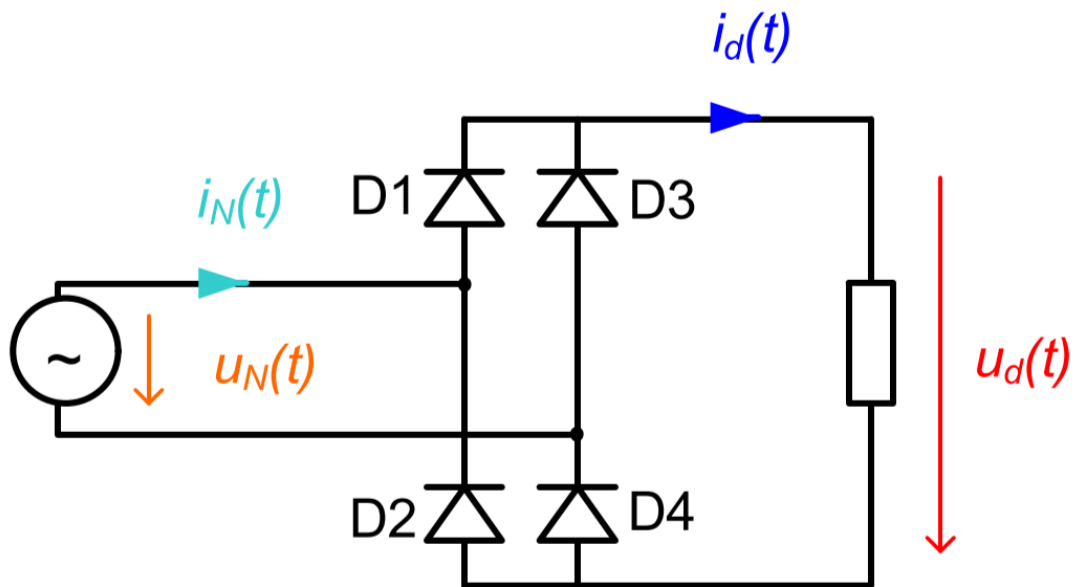
$$U_{a_{avg}} = \frac{T_{ein}}{T} \cdot U_1 = a \cdot U_1$$

Der Schalter S stellt einen Halbleiter dar, der abschaltbar sein muss. Die Schaltung hat die Eigenschaften

- Selbstgeführt bzw. zwangskommutiert
- Abwertsteller $U_{2_{avg}} < U_1$
- Halbleiter wird als Schalter betrieben, wodurch dieser praktisch keine Verlustleistung aufweist ($u \approx 0 \rightarrow p_v \approx 0$, $i = 0 \rightarrow p_v = 0$)
- Hoher Wirkungsgrad

1.2 Ungesteuerter Netzgeführter Gleichrichter

Die Ausgangsspannung U_d (direct) steht im festen Verhältnis zur Eingangsspannung U_N , ist also *ungesteuert*.

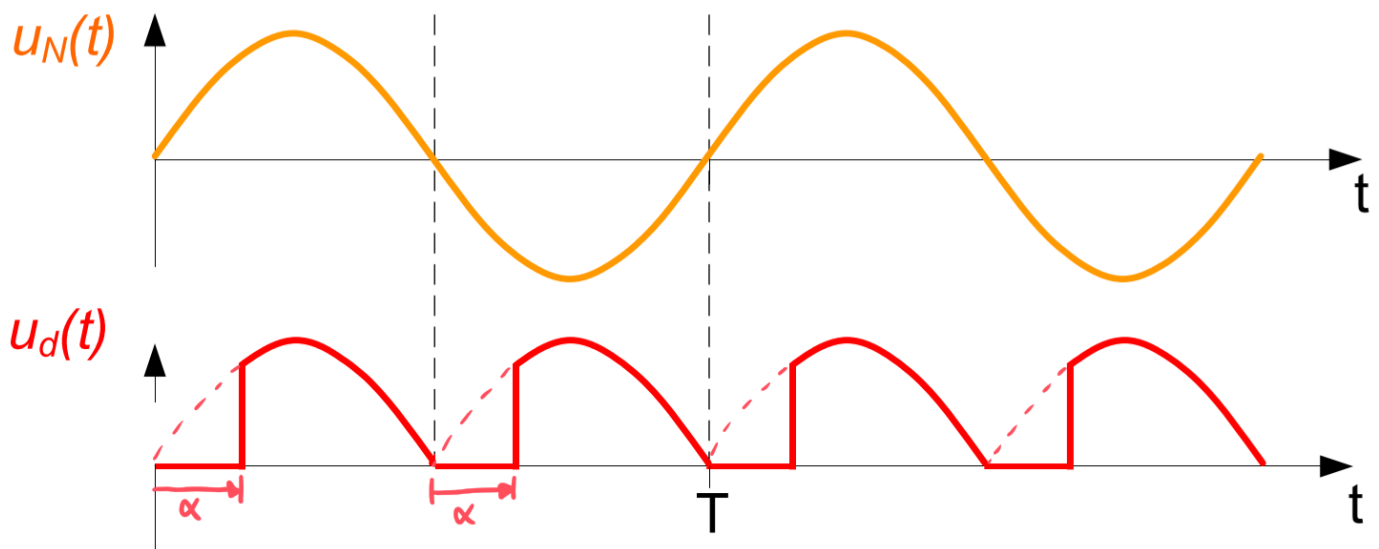
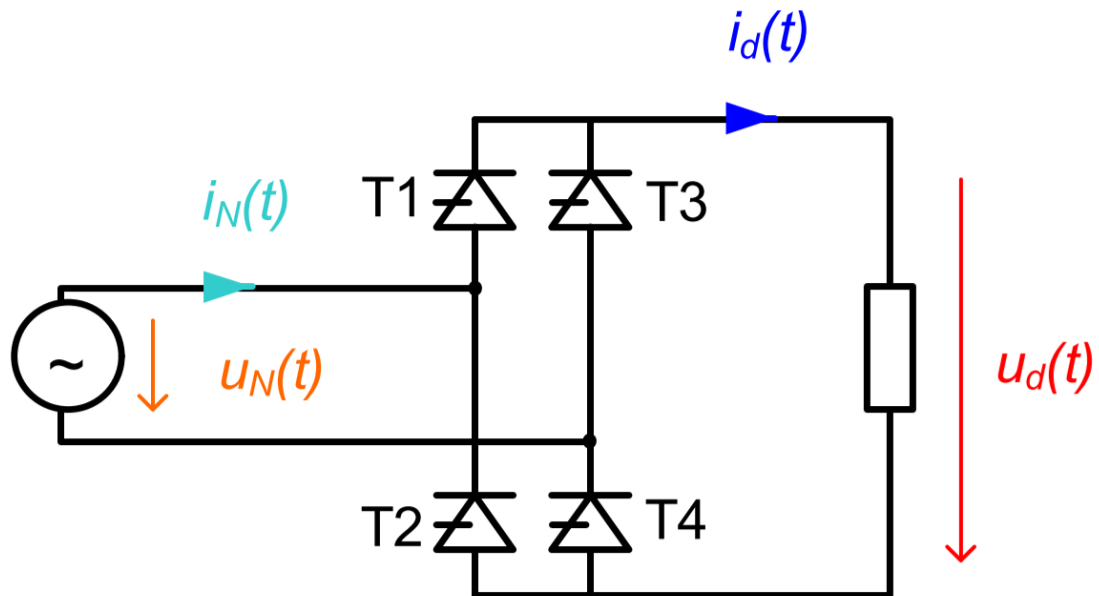


Die Ausgangsspannung ist gegeben mit

$$U_{d_{avg}} = \frac{2}{\pi} \hat{U} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{RMS} \approx 0.9 \cdot U_{RMS}$$

1.3 Gesteuerter Netzgeführter Gleichrichter

Werden anstelle Dioden *Thyristoren* eingesetzt, erhält man einen *gesteuerten* Gleichrichter.



Die Ausgangsspannung ist nun zusätzlich abhängig vom Steuerwinkel α

$$U_d(\alpha) = \frac{1 + \cos \alpha}{\pi} \hat{U} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} \cdot U_{RMS} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

$$\approx 0.9 \cdot U_{RMS} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

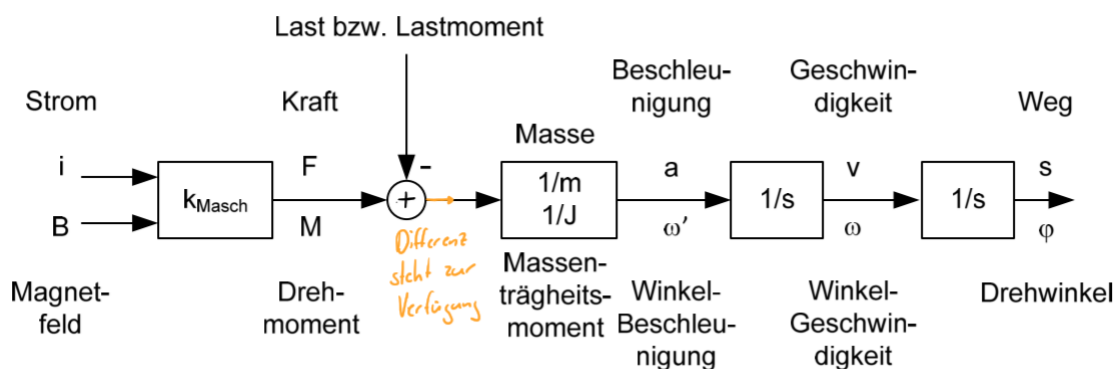
2. Grundlagen

2.1 Mechanik

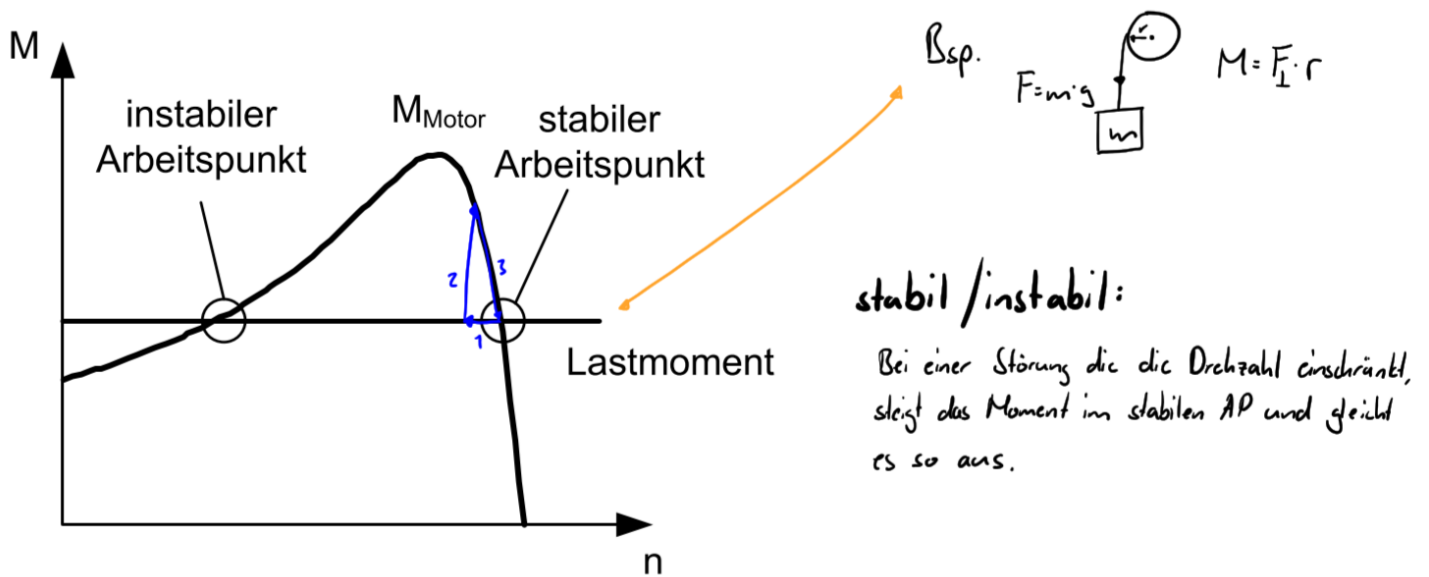
Translatorisch		Rotatorisch	
Weg	$s [m]$	Winkel	$\varphi [1]$
Geschwindigkeit	$v = \frac{ds}{dt} [\frac{m}{s}]$ $v = r \cdot \omega [\frac{m}{s}]$	Kreisfrequenz	$\omega = \frac{d\varphi}{dt} [\frac{1}{s}]$ $\omega = 2\pi \frac{n[\frac{1}{min}]}{60[\frac{s}{min}]} [rad]$
Beschleunigung	$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} [\frac{m}{s^2}]$	Winkelbeschleunigung	$\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} [\frac{1}{s^2}]$
Masse	$m[kg]$	Trägheitsmoment	$J[kg \cdot m^2]$
Kraft	$F = m \cdot a[N]$	Drehmoment	$M = J \cdot \dot{\omega}[Nm]$ $M = F \cdot r_{\perp}[Nm]$
Impuls	$B = m \cdot v[\frac{kg \cdot m}{s}]$	Drall	$D = J \cdot \omega[\frac{kg \cdot m^2}{s}]$
Leistung	$P = F \cdot v[W]$	Leistung	$P = M \cdot \omega[W]$
Energie	$W = \int p(t) \cdot dt[Ws]$	Energie	$W = \int p(t) \cdot dt[Ws]$
kin. Energie	$W_{kin} = \frac{mv^2}{2}[Ws]$	kin. Energie	$W_{kin} = \frac{J\omega^2}{2}[Ws]$
pot. Energie	$W_{pot} = \int F(s) \cdot ds[Ws]$ $W_{pot} = m \cdot g \cdot h[Ws]$	pot. Energie	$W_{pot} = \int M(\varphi) \cdot d\varphi[Ws]$
Zentrifugalkraft	$F = \frac{mv^2}{r}[N]$	Zentrifugalkraft	$F = mr\omega^2[N]$
Trägheitsmoment			
Hohlzylinder		$J = \frac{m}{2} r^2 = \frac{\pi l \rho}{2} r^4$	
J			
Hohlzylinder		$J = \frac{m}{2} (r_a^2 + r_i^2) = \frac{\pi l \rho}{2} (r_a^2 - r_i^2)$	
Zylindermantel ($\delta \ll r$)		$J = \frac{m}{4} (2r - \delta)^2 = 2\pi l \rho r^3 \delta$	
Kugel		$J = \frac{2m}{5} r^2 = \frac{8}{15} \pi \rho r^5$	

2.2 Wirkungskette elektrischer Maschinen

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

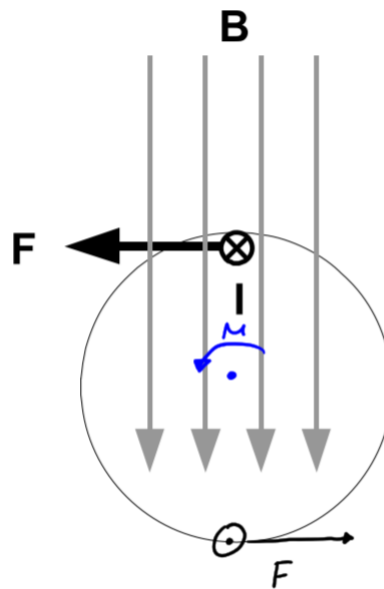


Es kommen zudem *stabile* und *instabile* Arbeitspunkte vor. **Stabil** sind sie, wenn bei sinkender drehzahl das Moment steigt und so wieder beschleunigen kann, sonst andersrum. So "regelt" sich das System ein stück weit selbst



2.3 Elektromechanische Energieumwandlung

Wird ein stromdurchflossener Leiter in die Nähe eines Magneten gebracht, so wirkt auf jedes Längenelement des Leiters eine Kraft, die senkrecht auf dem Längenelement steht. Ihre Grösse ist dem Strom im Leiterproportional.



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

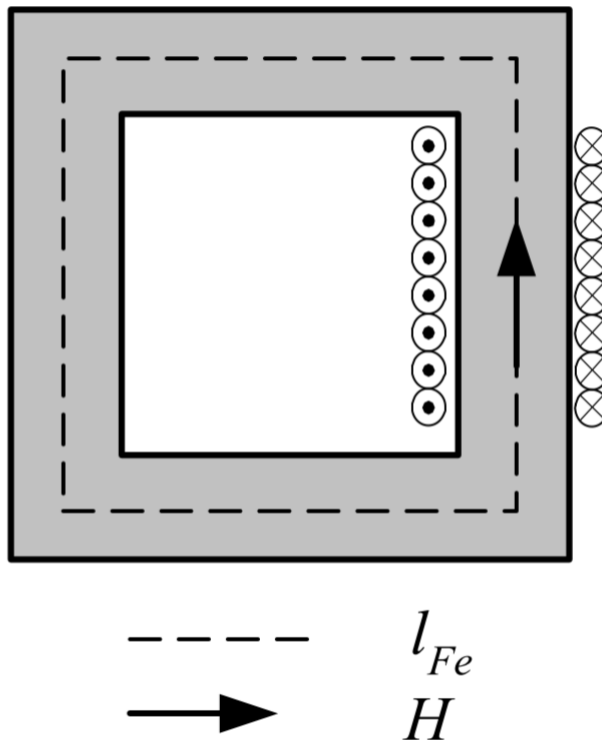
$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B})$$

Steht der Leiter im Rotor senkrecht zum Magnetfeld so folgt

$$F = l i B$$

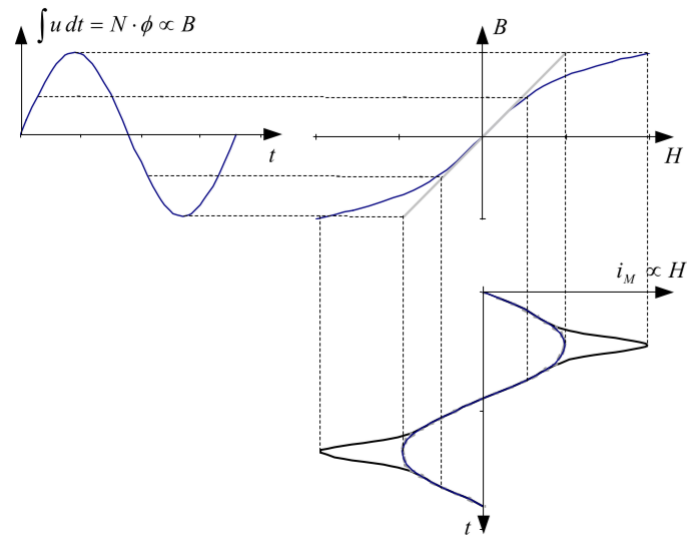
2.3.1 Durchflutungsgesetz

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



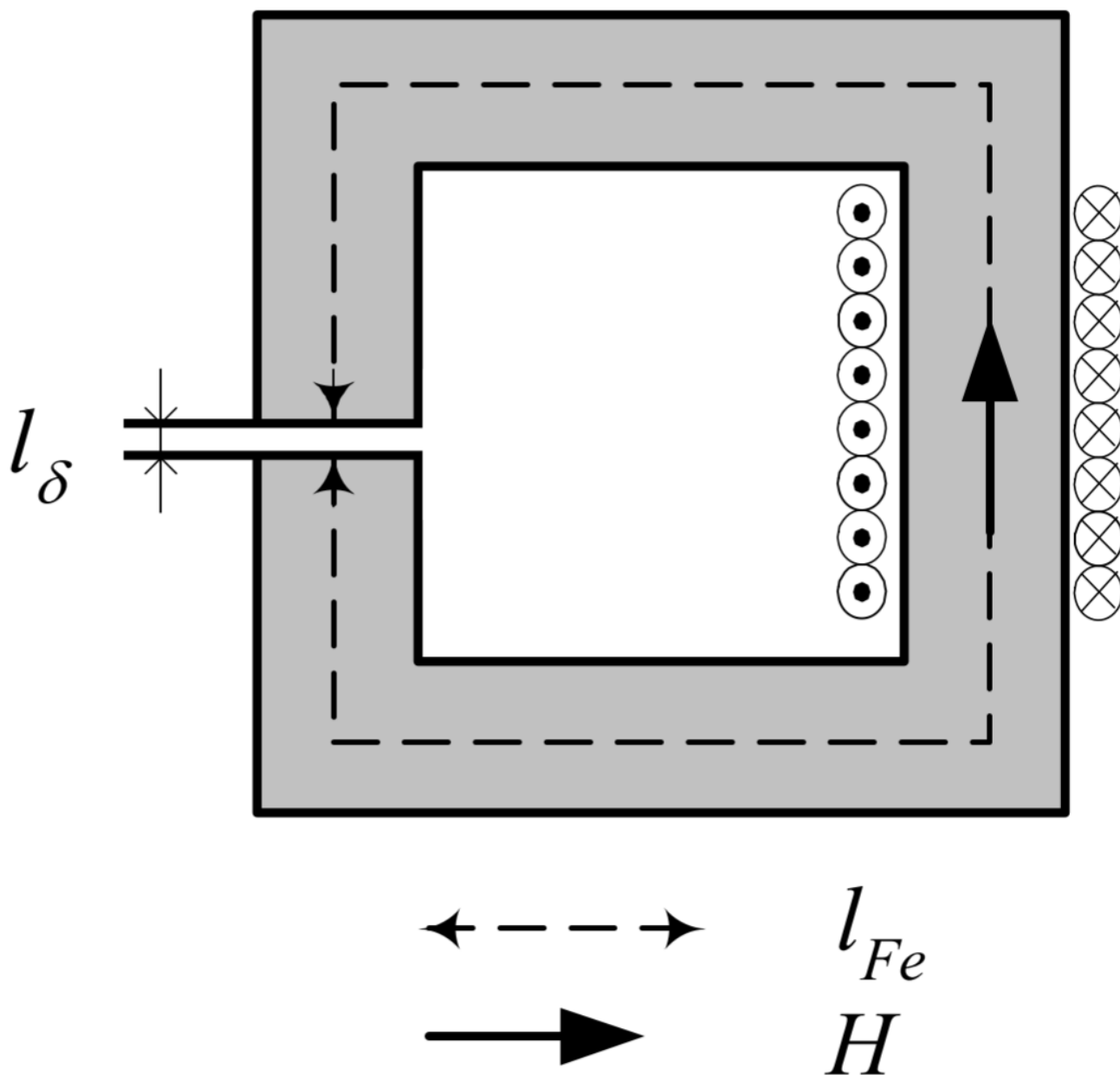
Durchflutung [A]	$\theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = H \cdot l_{Fe} = \sum I = N \cdot I$
Magnetische Feldstärke [$\frac{A}{m}$]	$H = \frac{N \cdot I}{l_{Fe}}$
Magnetische Flussdichte [T]	$B = \mu_0 \mu_r H$ oder Magnetisierungskennlinie
Permeabilität [$\frac{Vs}{Am}$]	$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$
relative Permeabilität []	μ_r ist Materialabhängig
Magnetischer Fluss [Vs]; [Wb]	$\phi = B \cdot A_{Fe}$
Induzierte Spannung [V]	$u = N \frac{d\phi}{dt} = \underbrace{\mu_0 \mu_r \frac{A_{Fe}}{l_{Fe}} N^2}_{L} \frac{d}{dt} i = \frac{d}{dt} \Psi$
Flussverketzung [Vs]; [Wb]	$\Psi = N\phi = Li$
Induktivität [H]	$L = \frac{N^2 A_{Fe} \mu_0 \mu_r}{l_{Fe}}$

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



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



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 $H_{Fe} = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} = \frac{\phi}{\mu_0 \mu_r A}$

$$H_{\delta} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{\phi}{\mu_0 A}$$

Magnetischer Fluss $\phi \approx \frac{N \cdot I \cdot \mu_0 \cdot A}{l_{\delta}}$

[Vs]; [Wb]

$$H_{Fe} = \frac{N \cdot I}{\mu_r \cdot l_{\delta}}$$

$$H_{\delta} = \frac{N \cdot I}{l_{\delta}}$$

2.4 Fourier Reihe (periodisch)

Ein periodisches Signal

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

lässt sich als reelle Fourier Reihe darstellen

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t)] \quad \text{mit } \omega_1 = 2\pi f_1 = \frac{2\pi}{T_1}$$

Wobei der Koeffizient a_0 direkt aus dem **Mittelwert** \bar{X} abgeleitet werden kann

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

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

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

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

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

Daraus erhält man das Linienspektrum mit

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

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

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

Das Amplitudenspektrum wird oft in der y-Achse logarithmisch dargestellt

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

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

2.5 Linearer Mittelwert

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

2.6 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

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

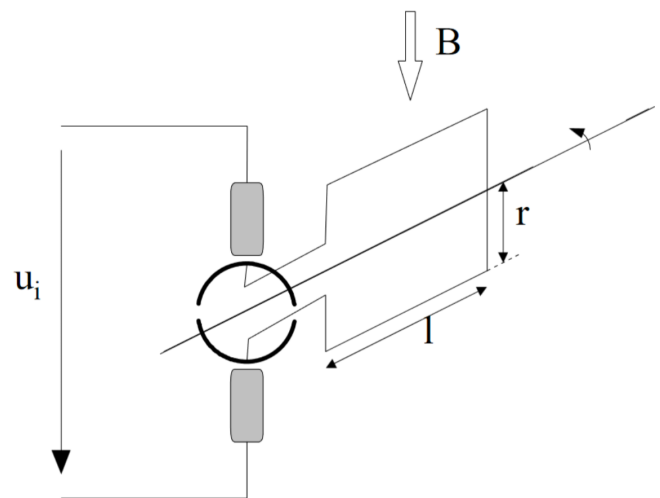
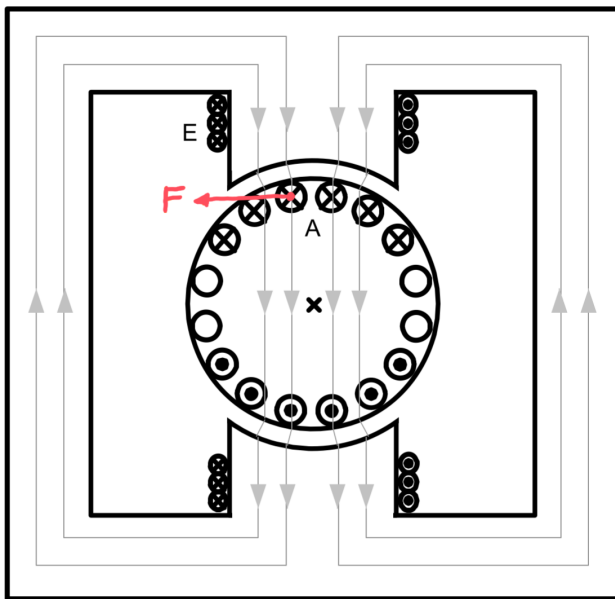
Rein Sinusförmig gilt

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

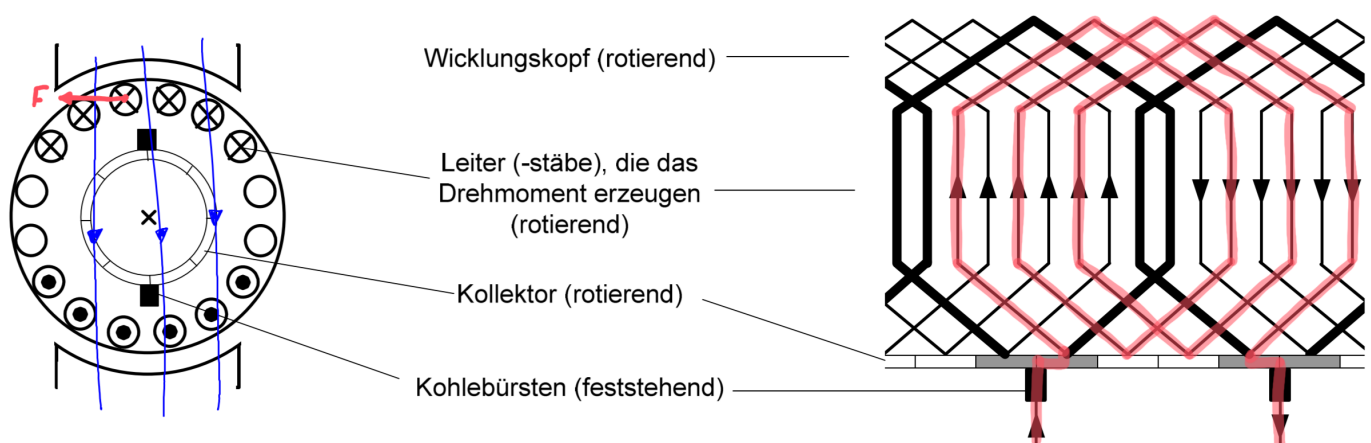
3. Gleichstrommaschine

3.1 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

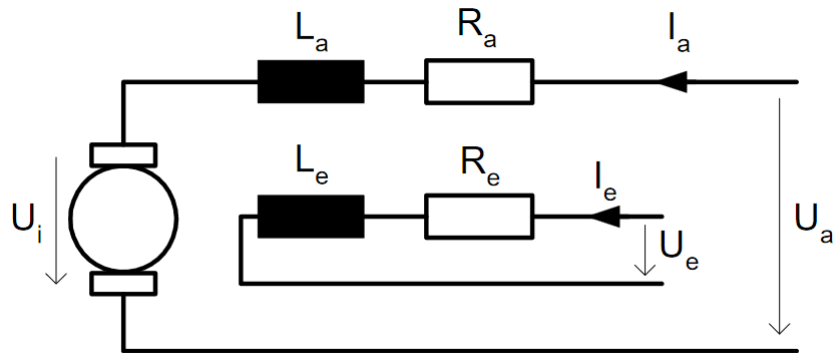


Die Wicklungen sind dabei so auf den Rotor gewickelt, dass ein kontinuierlicher Stromkreis über mehrere Windungen zustande kommt



3.2 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. ↔ Mech.

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

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

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

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

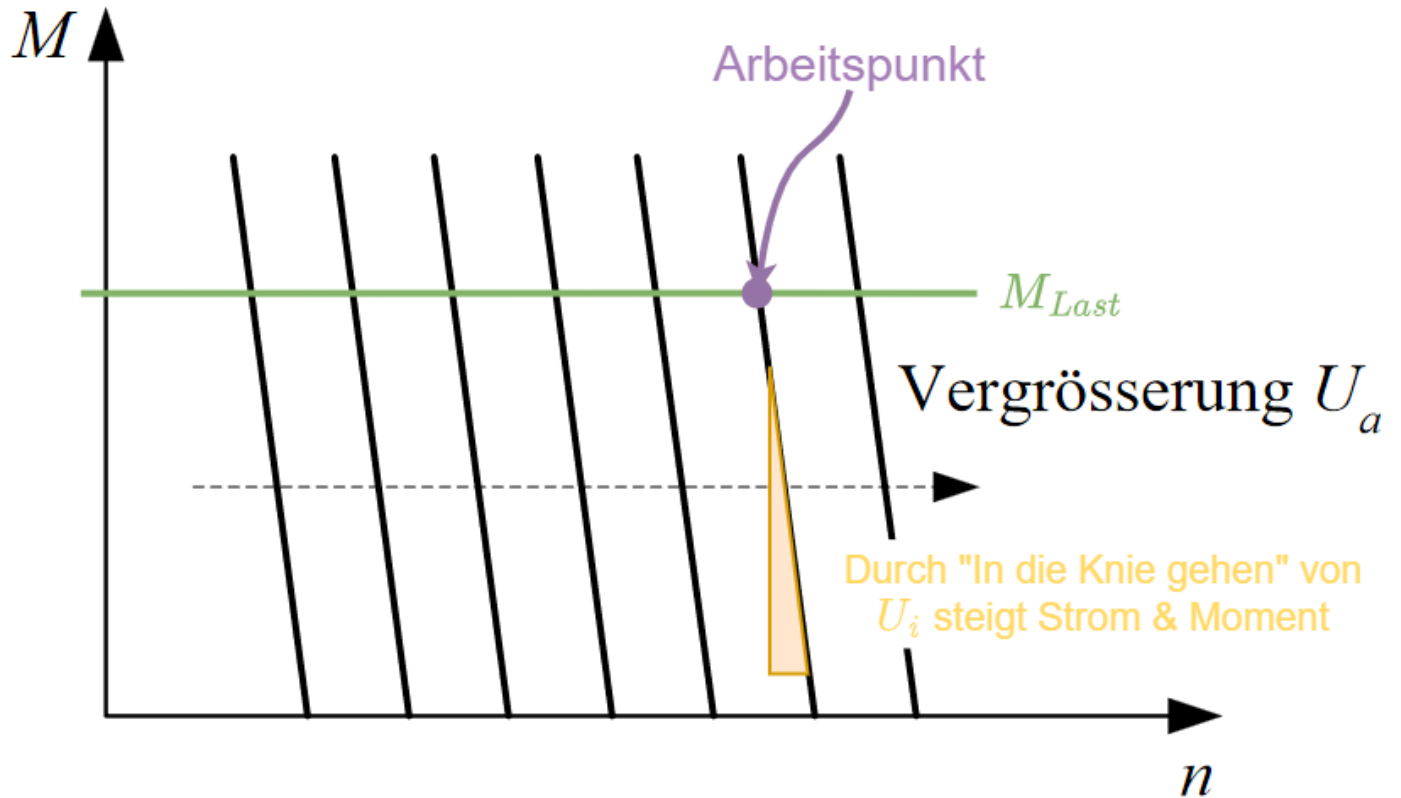
$$U_a = U_i + R_a \cdot I_a = c \cdot \phi \cdot \omega_m + R_a \cdot I_a \quad \phi \text{ konstant, wenn } I_e \text{ konstant}$$

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

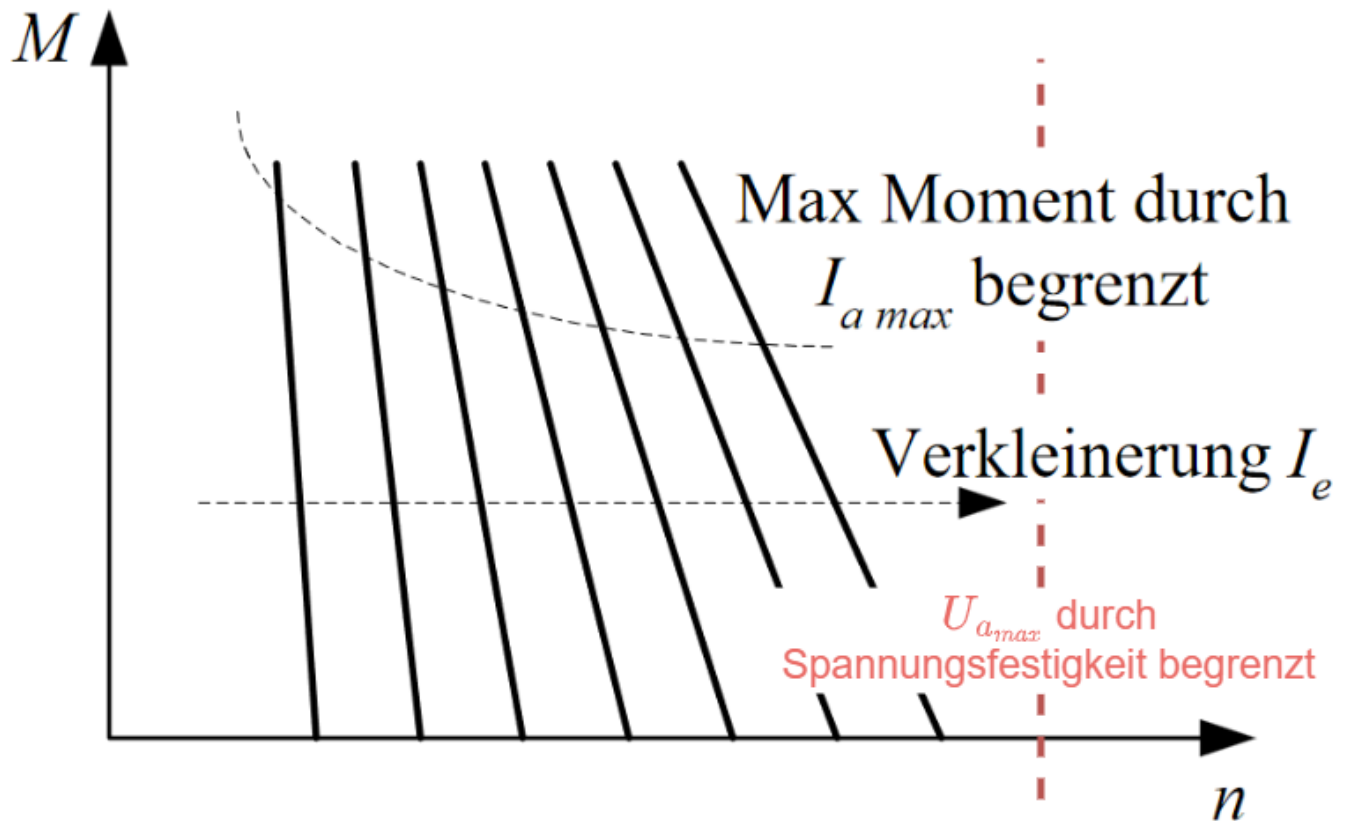
$$\omega_{m0} = \frac{U_a}{c\phi} \quad n_0 = \omega_{m0} \cdot 2\pi \frac{n \left[\frac{1}{min} \right]}{60 \left[\frac{s}{min} \right]}$$

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

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

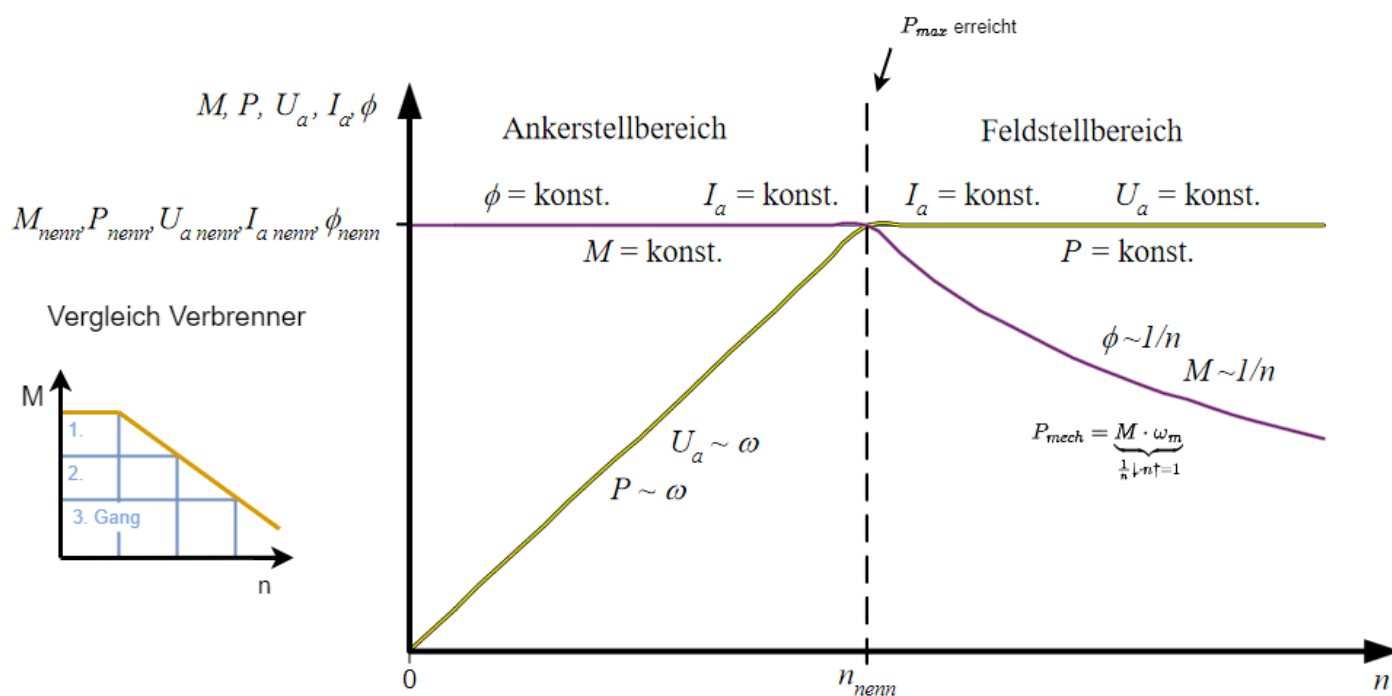


Bei **veränderlichem** Fluss und **konstanter** Ankerspannung erhält man folgende M - n -Kennlinie

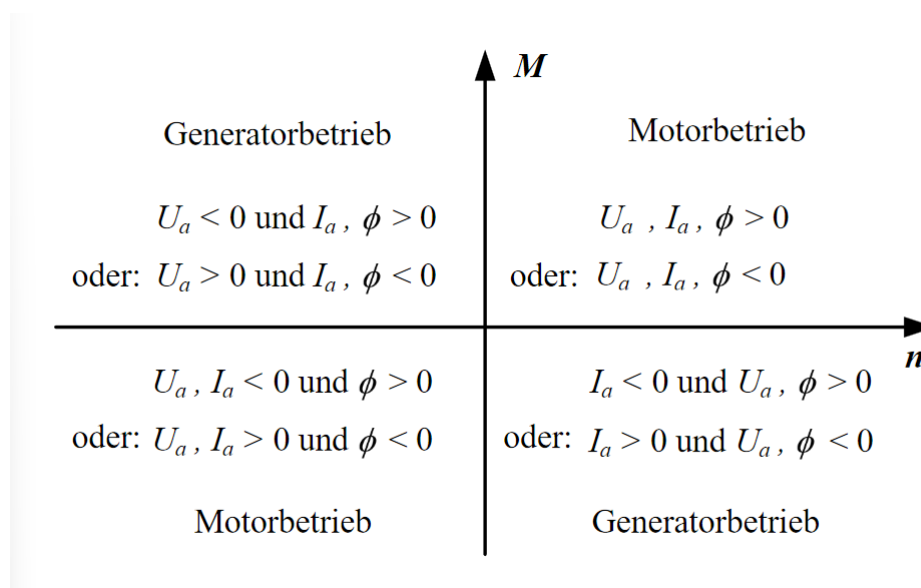


man erhält somit eine Drehzahlregelung über die Ankerspannung oder den Erregerfluss. Erfolgt eine Drehzahlerhöhung durch Verkleinerung des Erregerflusses, spricht man von **Feldschwächung**. Allgemein streben Gleichstrommaschinen eine *Gleichgewichtsposition* an, bei der gilt

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

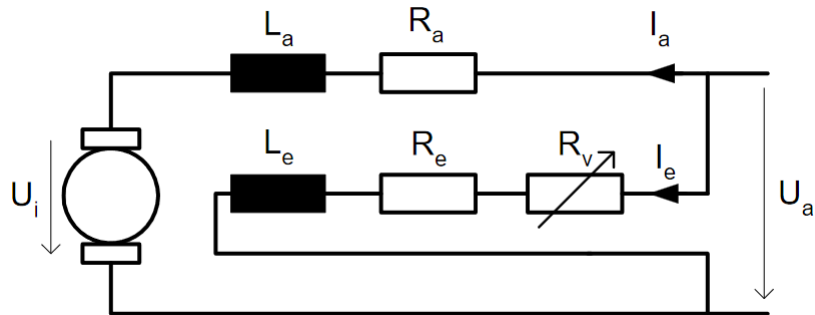


Zum umkehren der Drehrichtung muss entweder der Fluss oder der Ankerstrom umgekehrt werden. Unter **Vierquadrantebetrieb** versteht man den Betrieb in beide Drehrichtungen, wobei sowohl Motor- als auch Generatorbetrieb möglich ist



3.3 Ersatzschaltung Nebenschlussmaschine

Für den elektrischen Teil einer *Nebenschlussmaschine* gilt folgendes Ersatzschaltbild



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

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

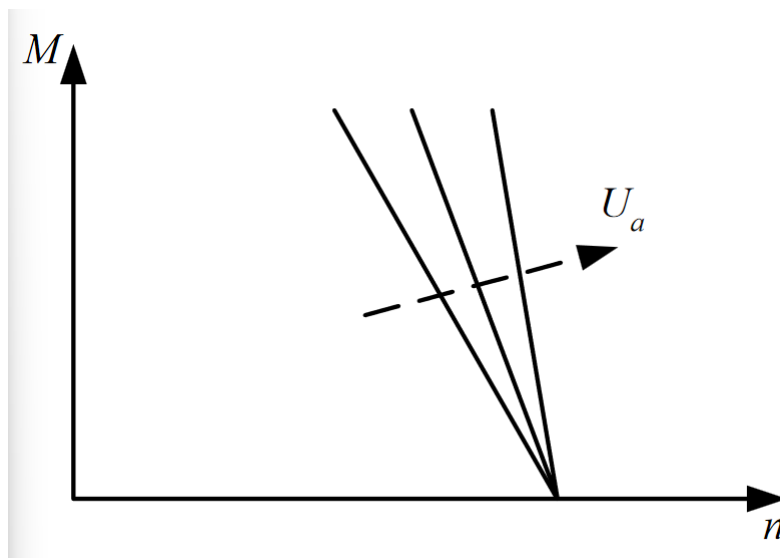
Im **Leerlauf** gilt

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

Für die Drehzahlabhängigkeit des Moments gilt

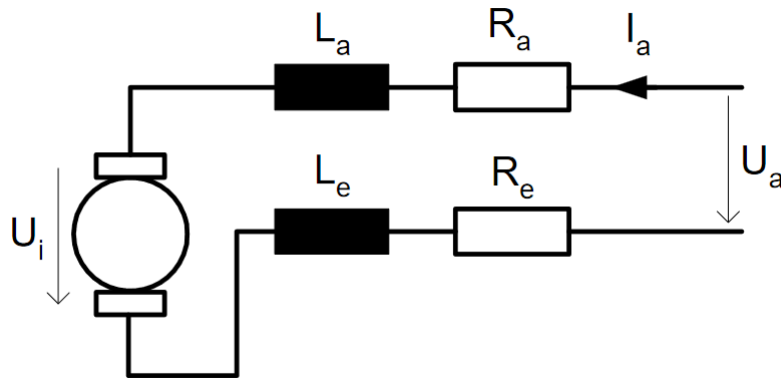
$$\omega_m = \frac{N_e(R_e + R_V)}{c \cdot L_e} - \frac{R_a \cdot (R_e + R_V)^2 \cdot N_e^2}{(c \cdot L_e \cdot U_a)^2} \cdot M_{el}$$

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



3.4 Ersatzschaltung Seriemaschine

Für den elektrischen Teil einer *Seriemaschine* gilt folgendes Ersatzschaltbild



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

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

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

Zur Vereinfachung schreibt man

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

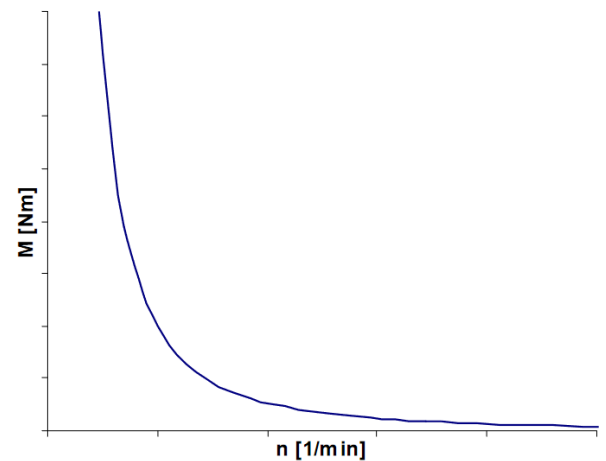
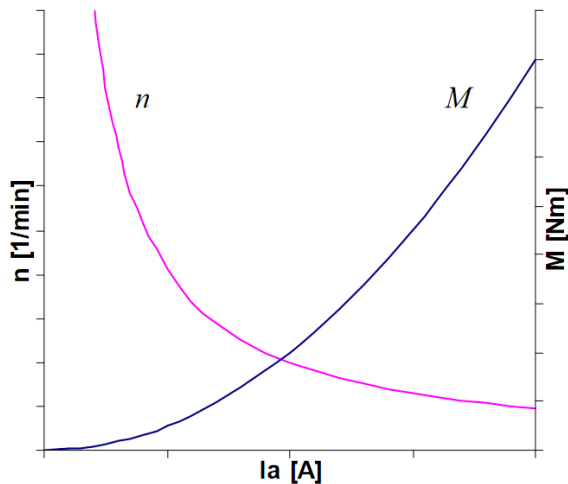
und damit gilt

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

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

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

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

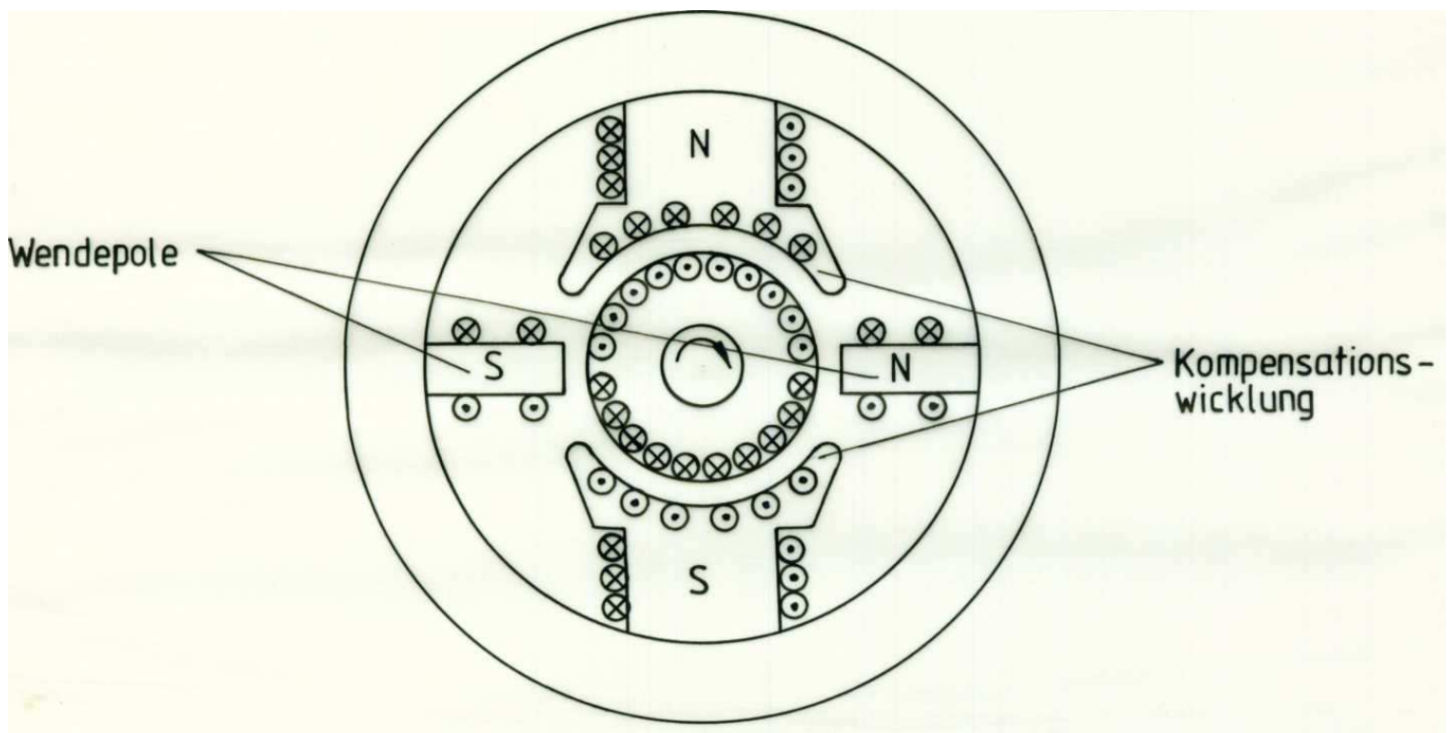


3.5 Ankerrückwirkung

Die **Ankerrückwirkung** entsteht durch die Überlagerung des Erregerfeldes mit dem Ankerfeld und beeinflusst das Luftspaltfeld im Motorbetrieb. Im ungesättigten Zustand heben sich Flussverstärkung und Flusschwächung 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.

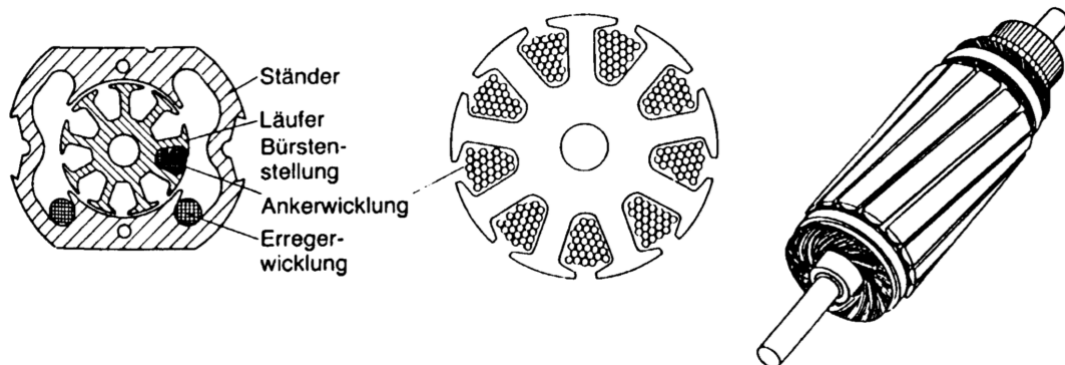
Bei großen Maschinen werden **Kompensationswicklungen** eingesetzt, um Feldverzerrungen unter den Hauptpolen auszugleichen. Sie befinden sich in den Polschuhen der Hauptpole und werden ebenfalls vom Ankerstrom durchflossen. Bei der Compoundmaschine wird ein ähnliches Verfahren angewendet, bei dem sowohl eine Serieerregewicklung 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.



3.6 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

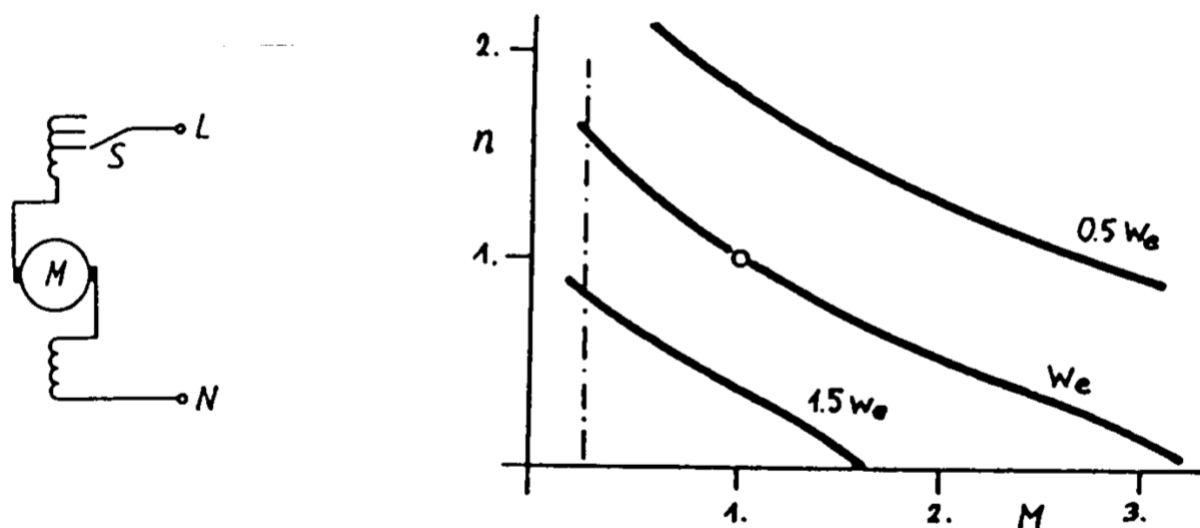


Wie für einen Serienmotor Typisch, verfügt der Motor bei Leerlauf (oder niedrigem Moment) über eine sehr hohe Drehzahl da $\omega_m \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$ gilt.

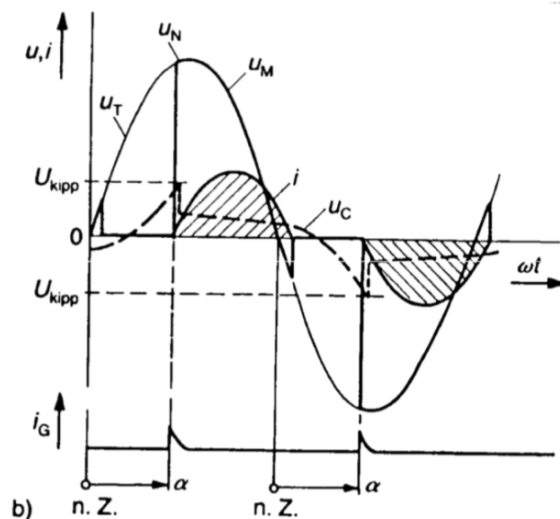
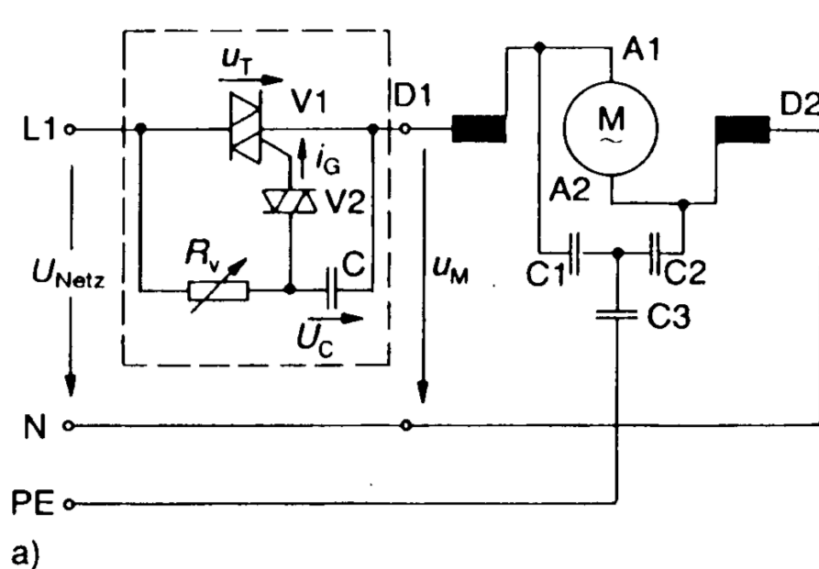
3.6.1 Drehzahlsteuerung

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

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

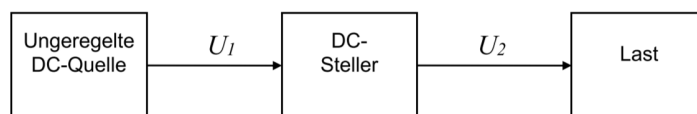


Für eine stufenlose Steuerung wird der **AC-Steller** verwendet. Als Stellglied bei kleinen Leistungen werden Triacs, die von Diacs gezündet werden verwendet

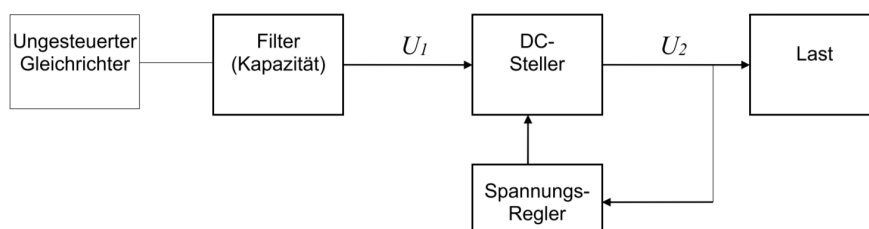


4. Gleichstromsteller

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



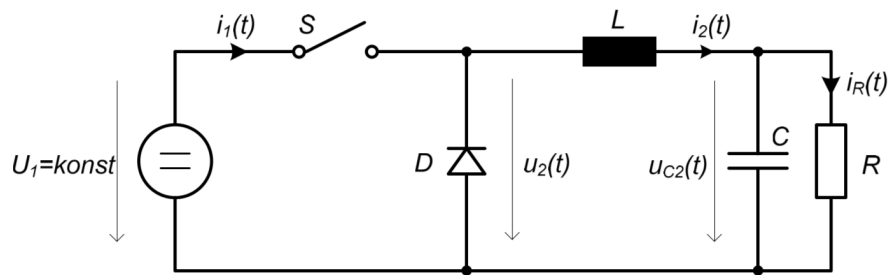
Die Eingangsspannung U_1 wird oft mit einem ungesteuerten Gleichrichter erzeugt, folgt also zufälligen Netzspannungsschwankungen. Die Ausgangsspannung U_2 kann durch einen Regelkreis auf den gewünschten Wert eingestellt werden



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

4.1 Abwärtsteller



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

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

Unter der Annahme, dass der Steller verlustfrei arbeitet, gilt

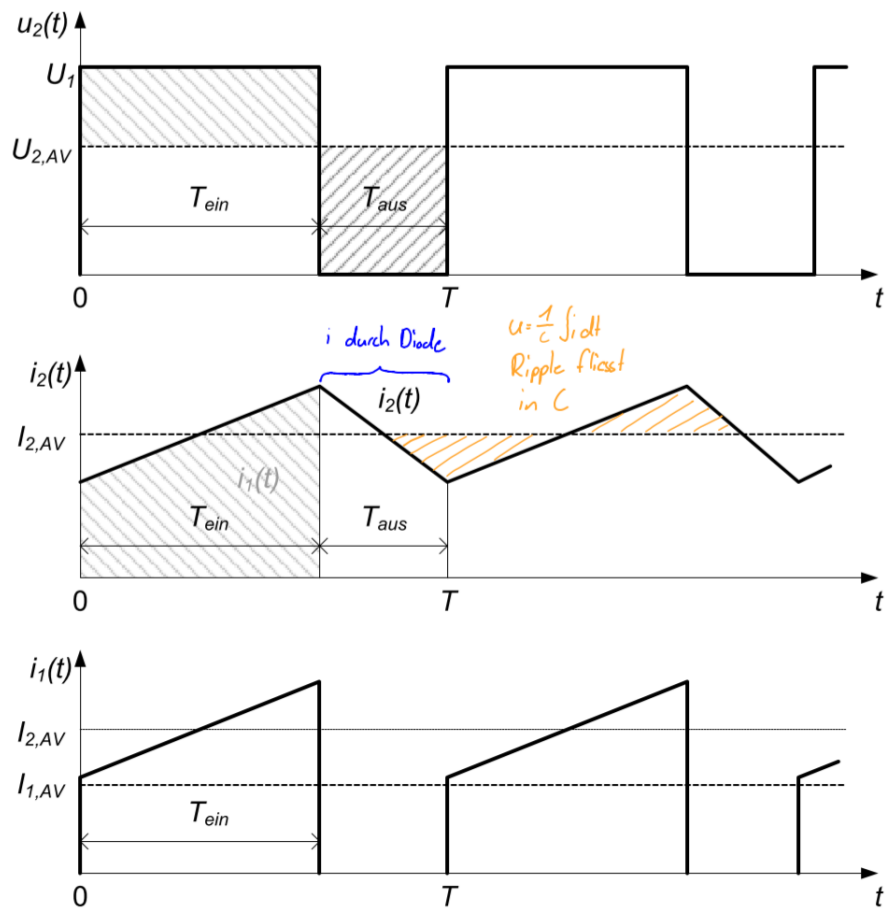
$$P_1 = U_1 I_{1AV}$$

$$P_2 = U_{2AV} I_{2AV} = a U_1 I_{2AV}$$

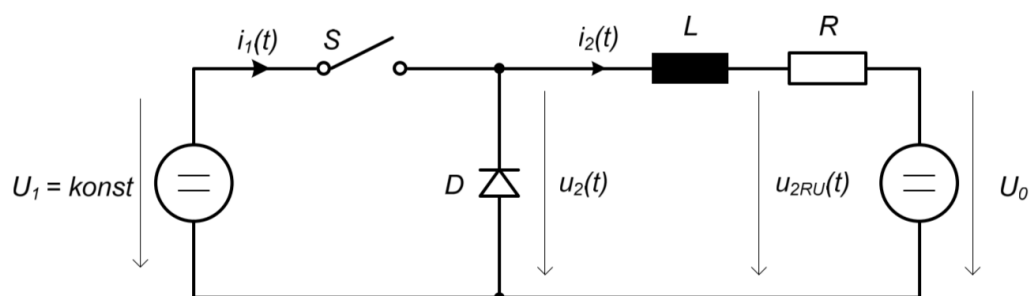
Und damit

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

Wir erhalten also folgende Strom- / Spannungsverläufe im stationären Betrieb



4.1.1 Standard DC-Last



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

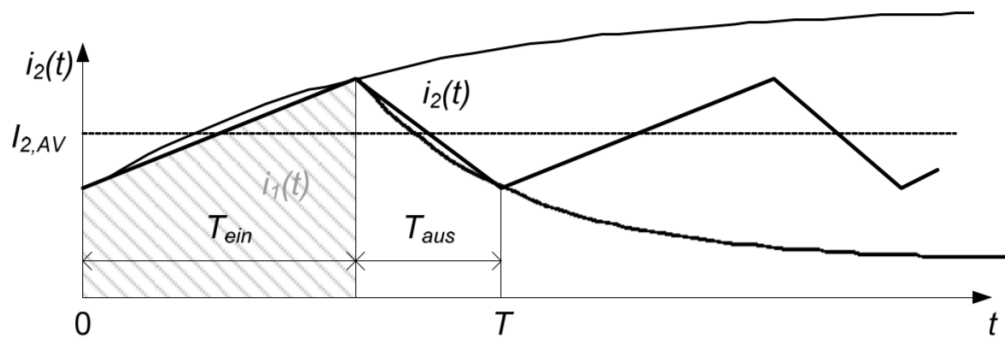
$$U_{2,AV} = R \cdot I_{2,AV} + U_0 \quad \text{bzw.} \quad I_{2,AV} = \frac{U_{2,AV} - U_0}{R}$$

Allgemein gilt

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

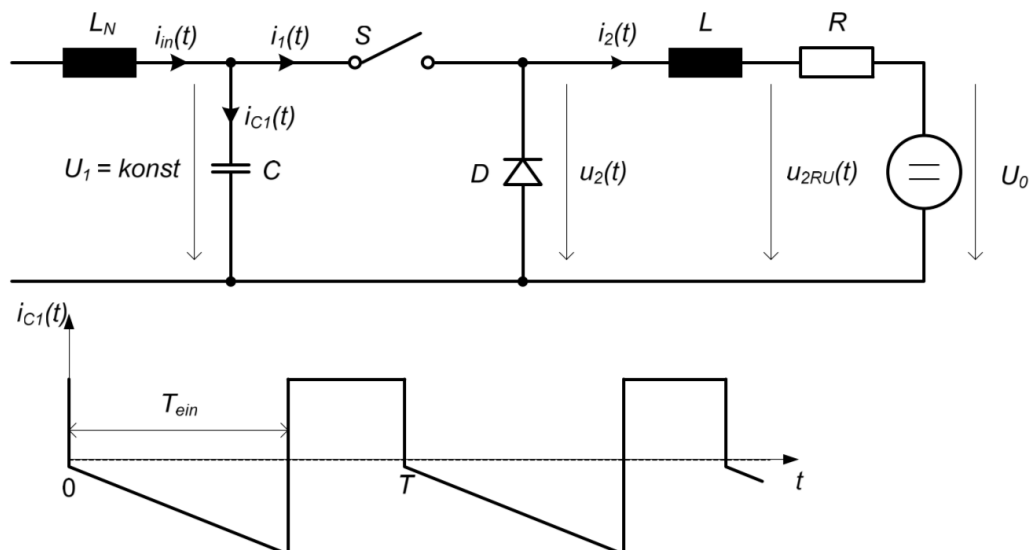
4.1.2 Nicht idealer Stromverlauf

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 Abschnitten von e -Funktionen zusammen



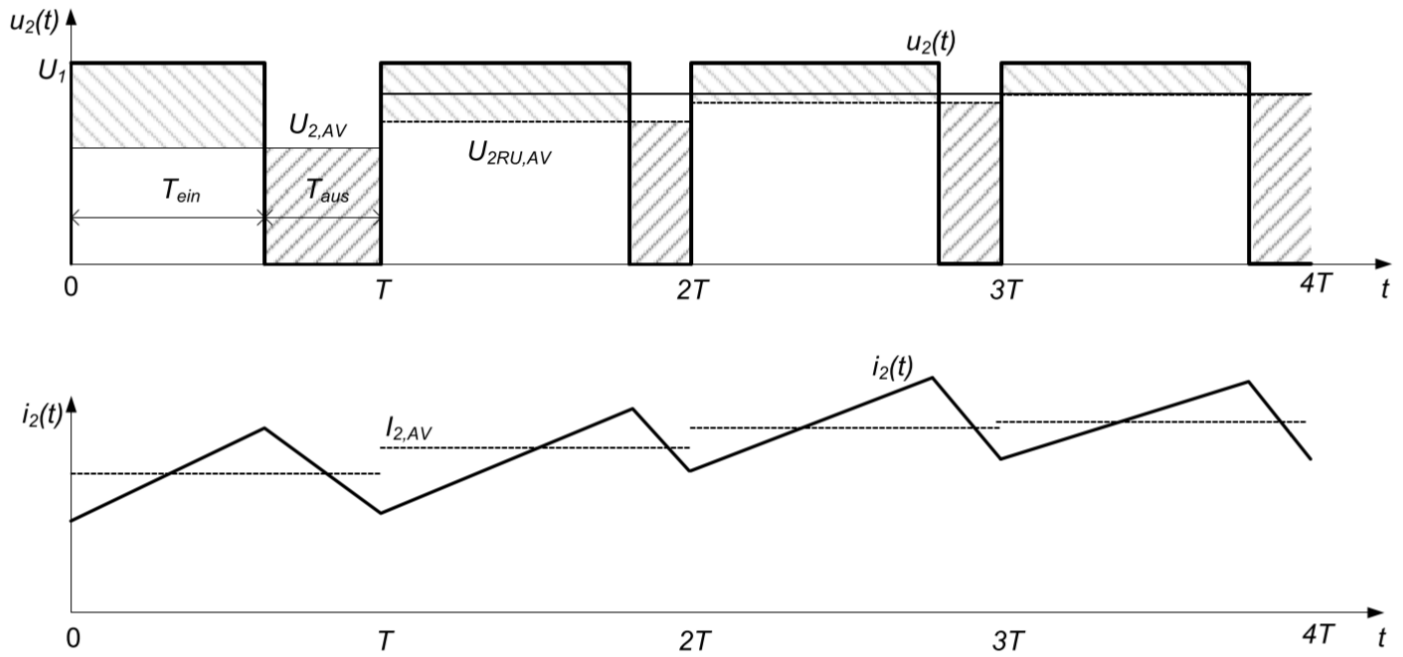
4.1.3 Glättungskondensator

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



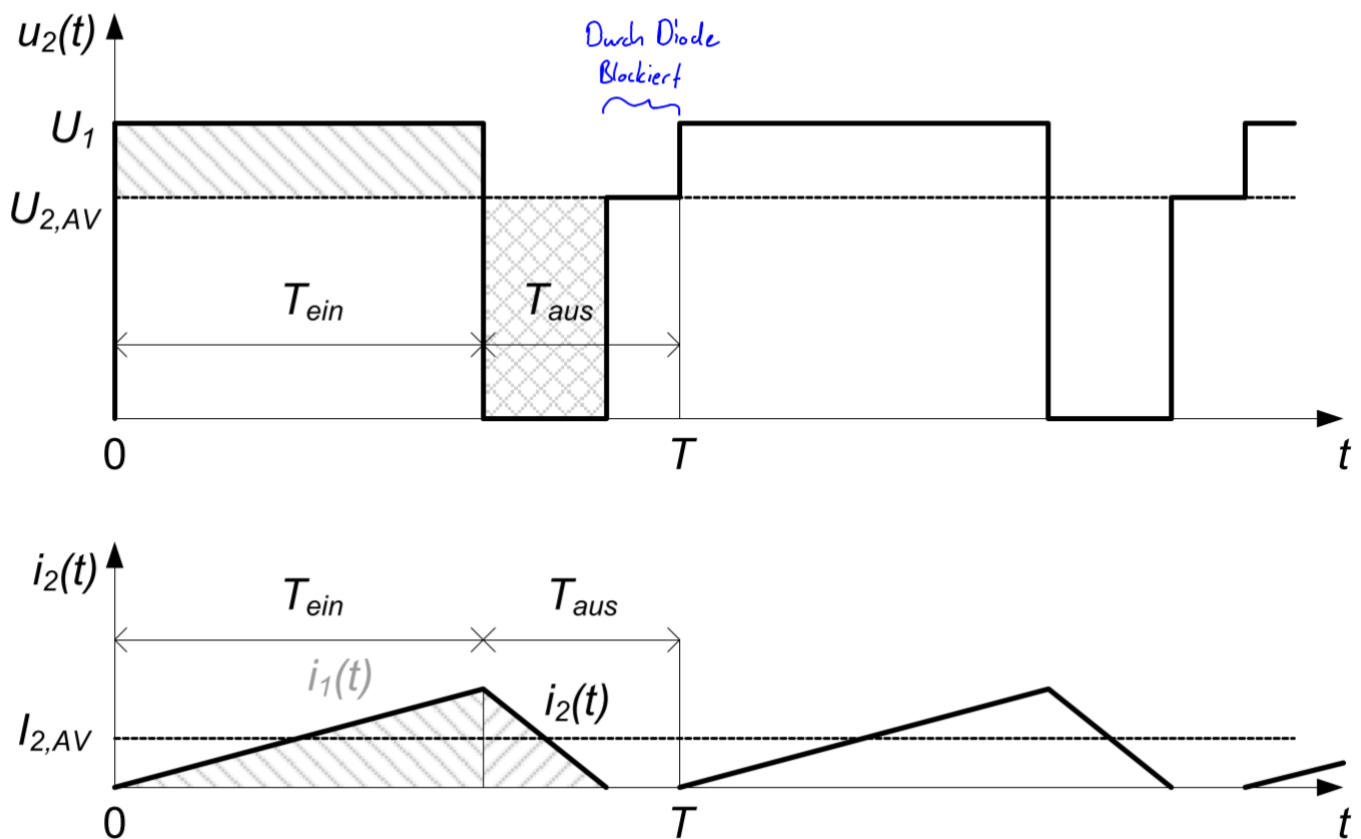
4.1.4 Arbeitspunkteinstellung

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



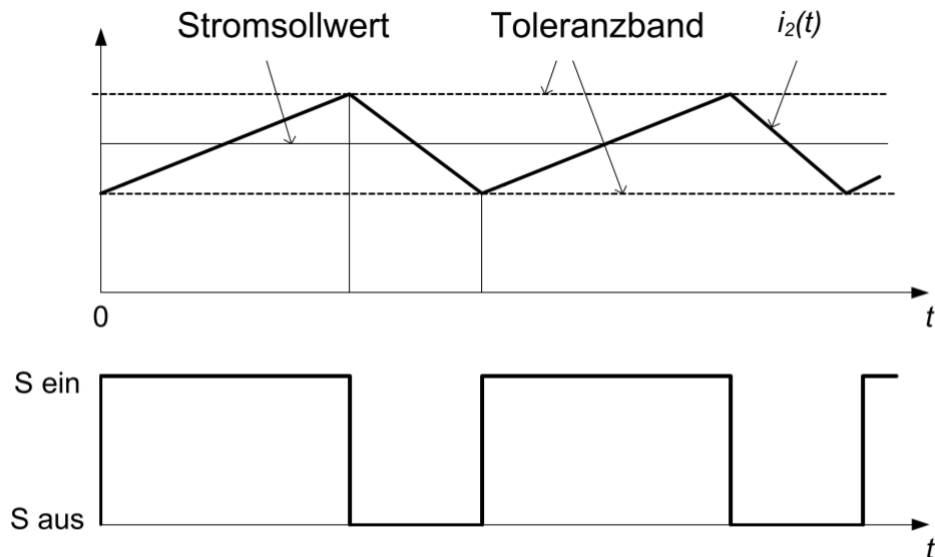
4.1.5 Lückbetrieb

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

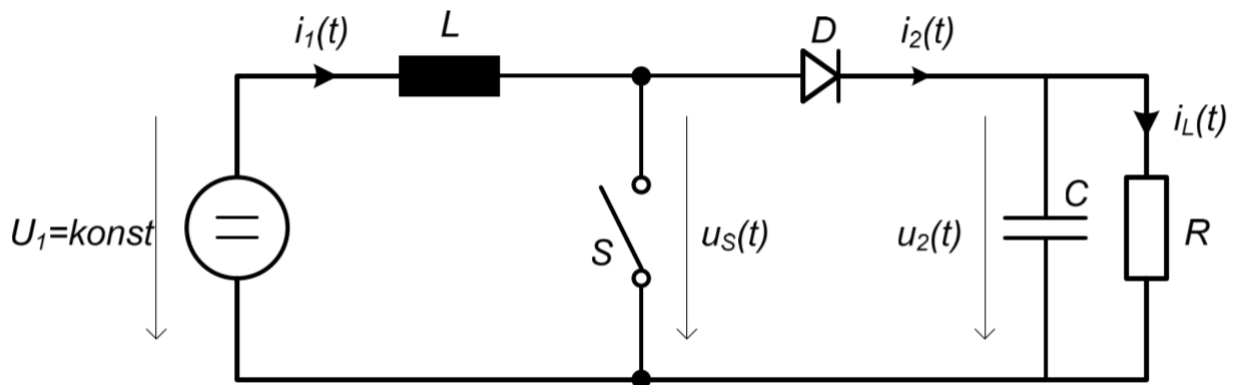


4.1.6 Toleranzbandsteuerung

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.



4.2 Aufwärtssteller



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

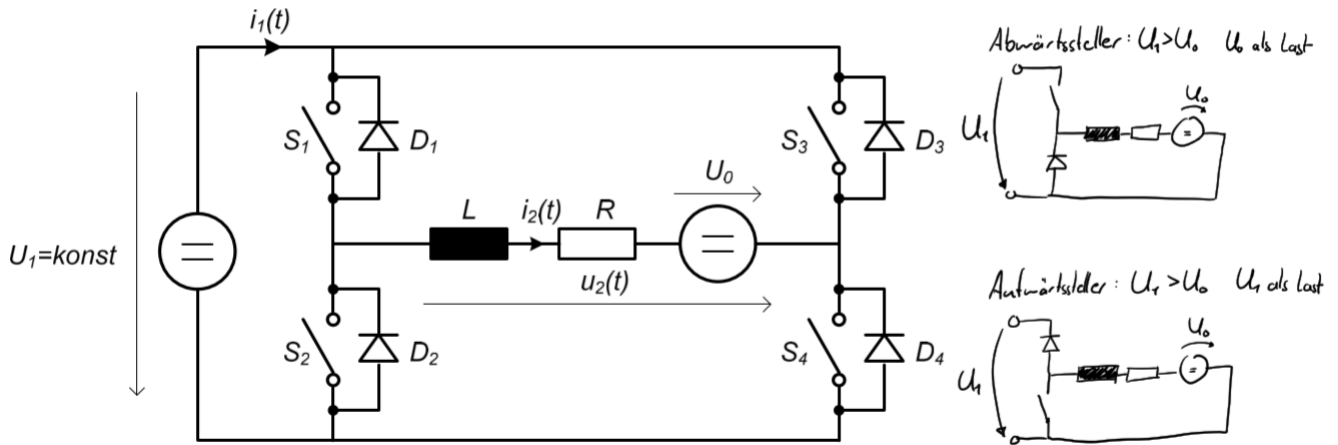
$$U_{2AV} = U_1 \frac{1}{1-a} \quad \text{mit } a = \frac{T_{ein}}{T}$$

Unter der Annahme, dass der Steller verlustfrei arbeitet, gilt

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

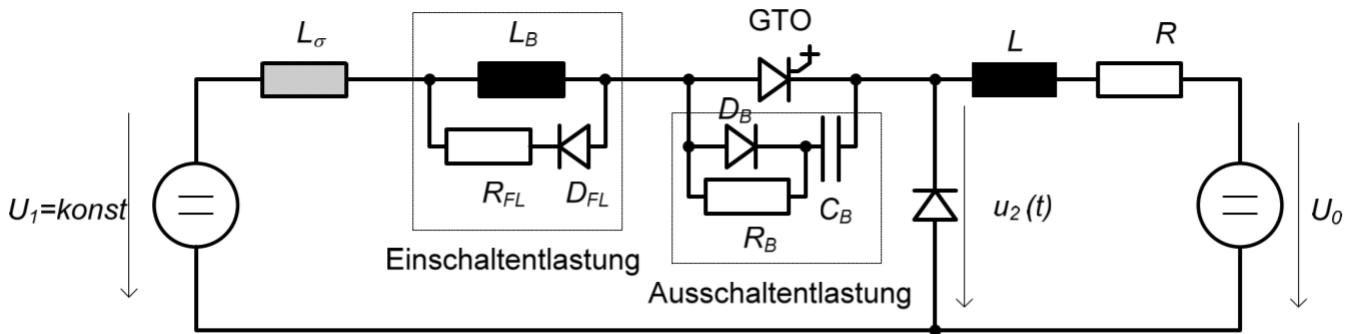
4.3 Vierquadrantensteller

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



4.4 Gleichstromsteller mit GTO

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



Stromteilheitsbegrenzung 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.

Spannungsteilheitsbegrenzung beim Abschalten

Die Spannungsteilheit beim Abschalten muss begrenzt werden, um Abschaltverluste zu minimieren und ungewolltes Wiedereinschalten zu vermeiden. 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.

5. 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 Einwegschtung: Sekundärstrom im Transformator bzw. der Netzstrom ist ein Gleichstrom. Der Mittelpunkt der Sekundärwicklung (Sternpunkt bei dreiphasig) muss zugänglich sein (*Mittelpunktschtung*).

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

Phasenzahl

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

Pulszahl

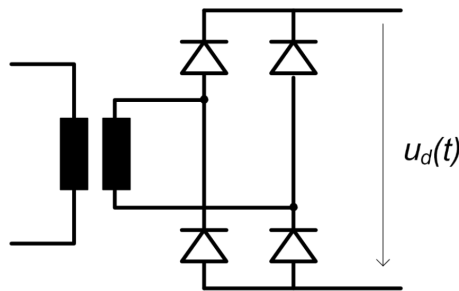
Die Pulszahl entspricht der Welligkeit der erzeugten Gleichspannung.

Steuerungsart

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

i Bsp. B2

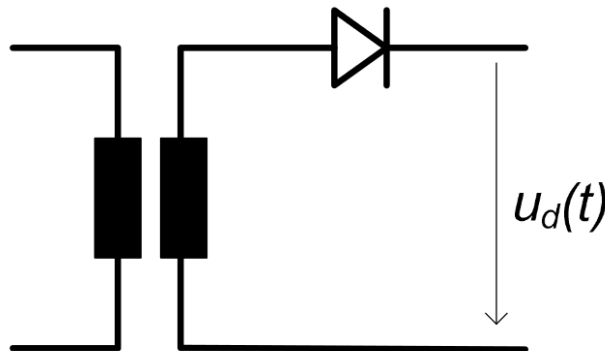
Brückenschaltung mit zweipulsiger Gleichspannung (zwei "Buckel" pro Netzperiode)



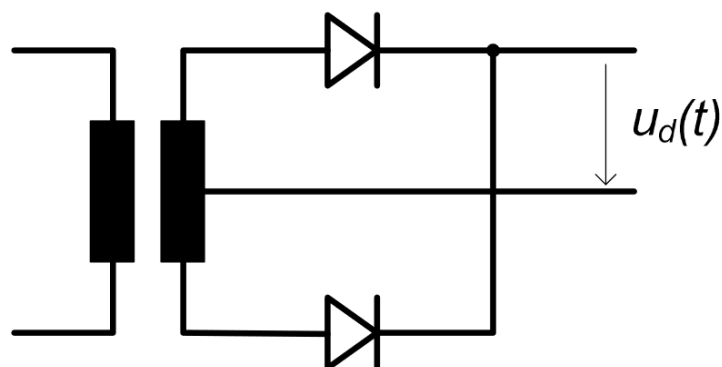
Bez.

Schaltung

M1

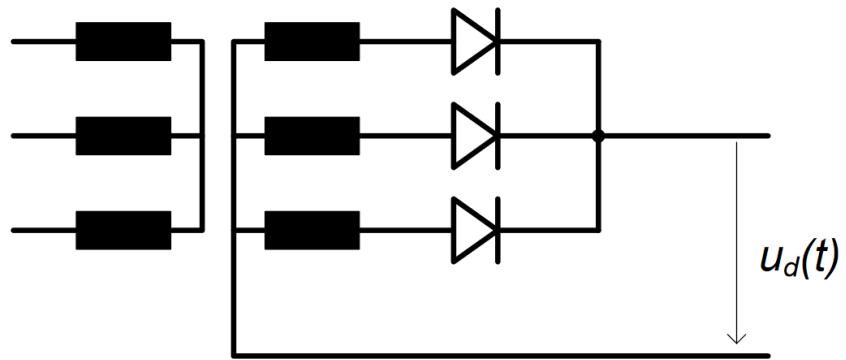


M2

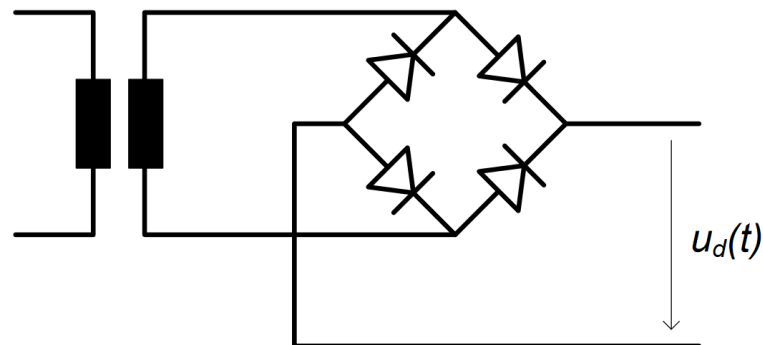


Bez.

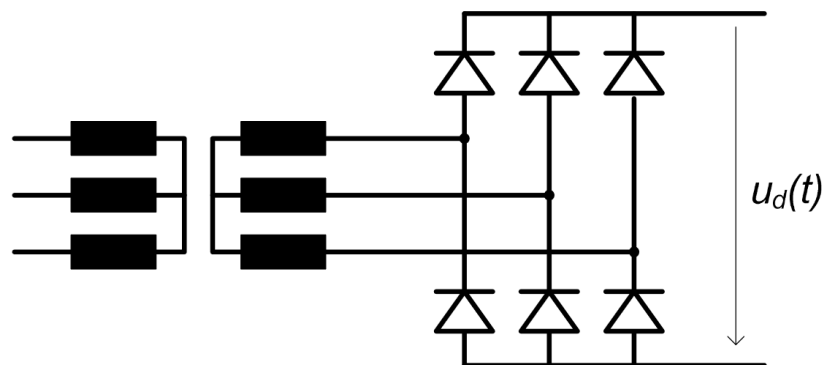
Schaltung



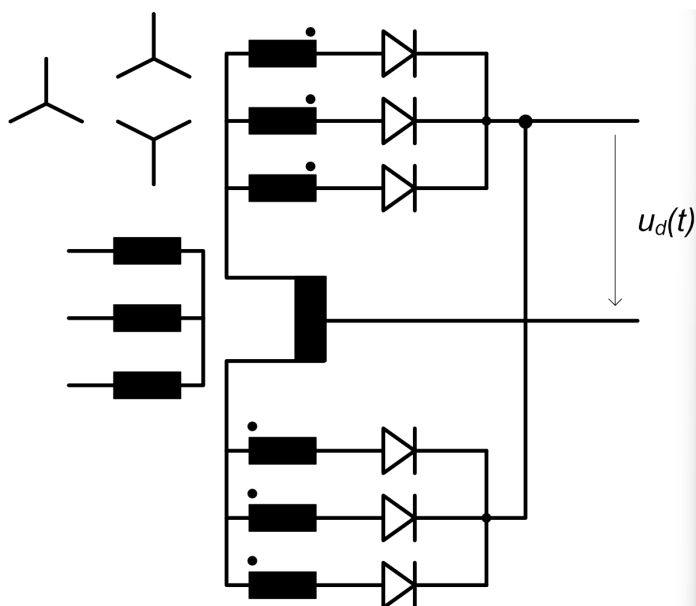
M3



B2



B6



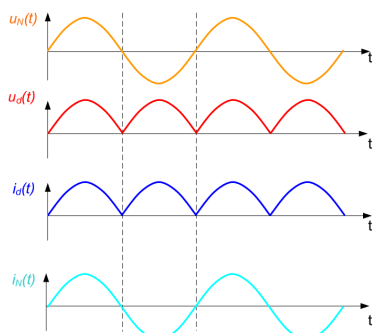
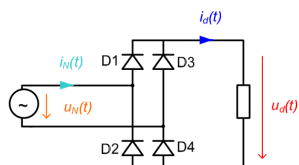
DSS6

5.1 Einphasiger Gleichrichter

Ohm'sche Last

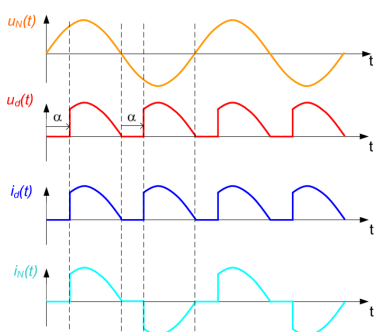
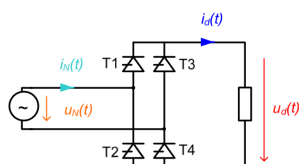
L-Glättung

C-Glättung

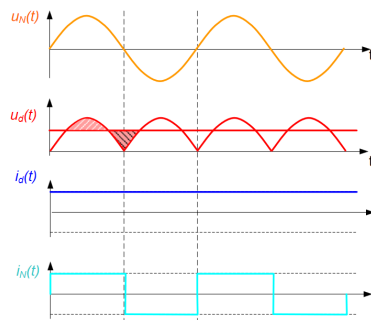
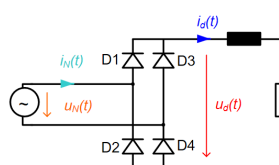


$$U_{di0} = \frac{1}{T} \int_0^T u_d dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_d d\omega$$

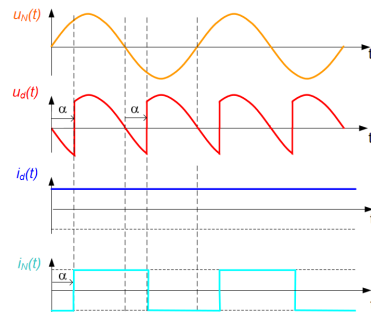
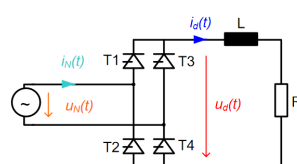
$$= \frac{2}{\pi} \hat{U} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_N \approx 0.9 \cdot U_N$$



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

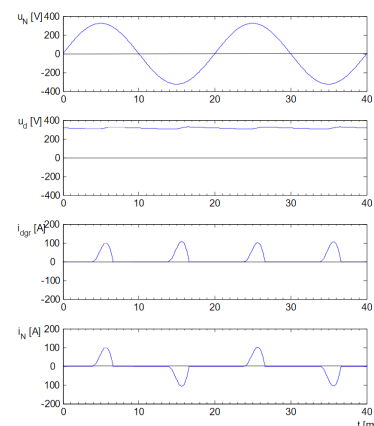
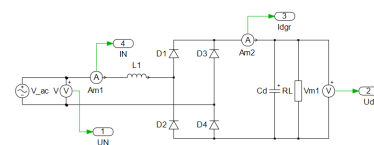


$$U_{di0} \approx 0.9 \cdot U_N$$



$$U_{di\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} u_d d\omega$$

$$= U_{di0} \cos(\alpha) = 0.9 U_N \cos(\alpha)$$



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

5.1.1 Leistung bei L-Glättung

! Im Fall der idealen Glättung des Gleichstroms I_d

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

Für die Wirkleistung gilt

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

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.

Der Leistungsfaktor beträgt

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

5.1.2 Netzurückwirkung L-Glättung

Die Fourieranalyse des rechteckförmigen Netzstroms ergibt

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

⚠️ EMV

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

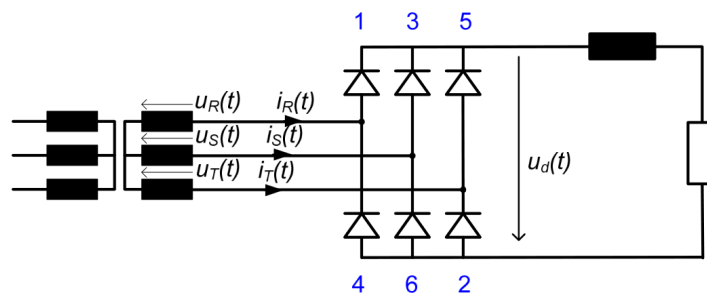
5.1.3 Belastung der Halbleiter bei L-Glättung

Der Strom durch die Halbleiter beträgt

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

5.2 Dreiphasige Gleichrichter

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



Für den Netzstrom gilt

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

Für die Ausgangsspannung gilt analog zum zwei-phasigen Brückengleichrichter

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

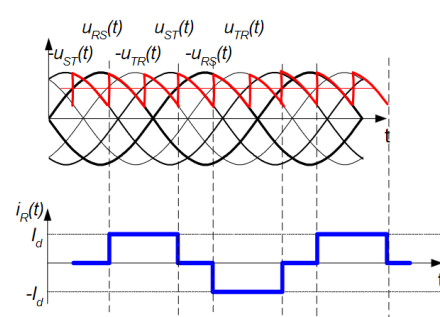
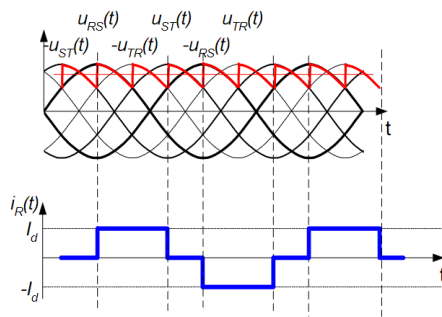
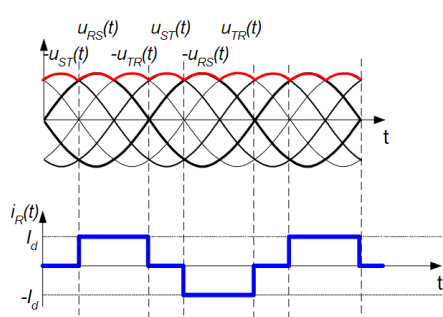
Desweiteren kann auch hier mit dem Zündwinkel die Ausgangsspannung beeinflusst werden

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

$\alpha = 0^\circ$

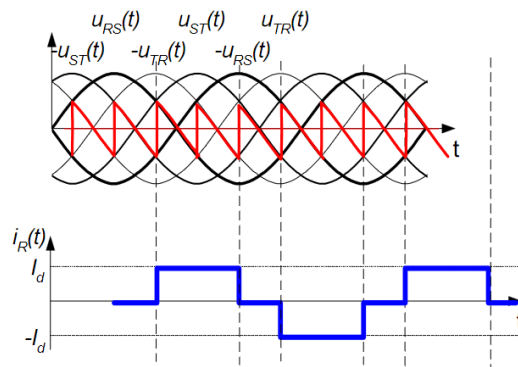
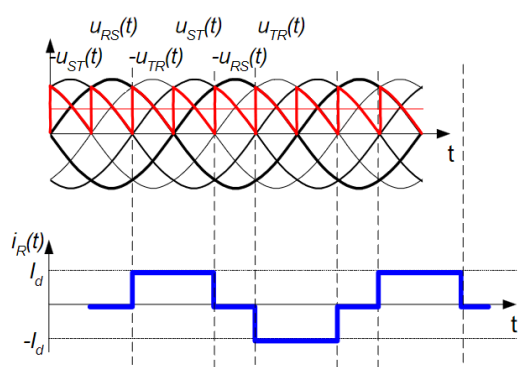
$\alpha = 30^\circ$

$\alpha = 45^\circ$



$\alpha = 60^\circ$

$\alpha = 90^\circ$



6. Leistungshalbleiter

7. Transformatoren

7.1 Parameterbestimmung

7.1.1 Leerlaufversuch

Trafo wird primärseitig gespiesen und sekundärseitig offen gelassen.

8. Drehfeldmaschinen

Drehfeldmaschinen

- Synchronmaschine (SM)
- Asynchronmaschine (ASM)

Kollektormotoren

- Gleichstrommaschine (GM)
- Universalmotor

9. Synchronmaschine (SM)

10. Asynchronmaschine (ASM)

11. Selbstgeführter Wechselrichter

12. Umrichter