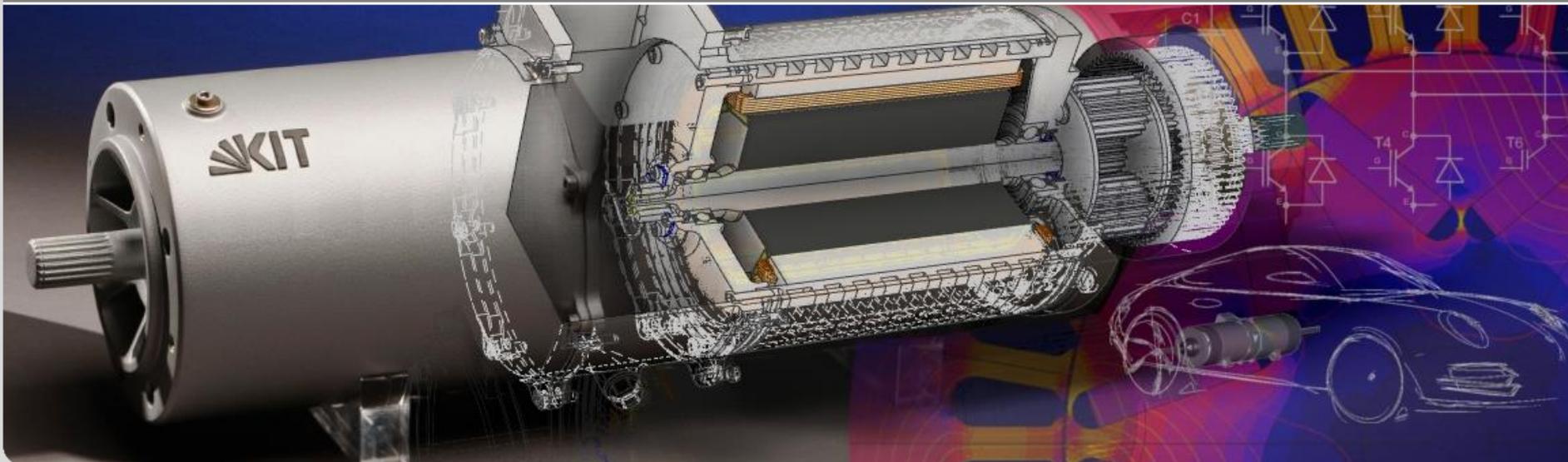


# Übung zur Vorlesung Elektrische Maschinen und Stromrichter

Dennis Bräckle

Elektrotechnisches Institut – Elektrische Antriebe und Leistungselektronik



# Organisatorisches zur Übung



M.Sc.

**Dennis Bräcke**

*Modulare Multilevel-  
Umrichter für  
Netzanwendungen*

Tel.: +49 (721) 608-42922

Dennis.Braeckle@kit.edu

Campus Süd, Geb. 11.10

Raum 103

- Übung dienstags, 11:30 Uhr – 13:00 Uhr im Benz-Hörsaal (10.21)
- Übungsblätter sind im Ilias-Kurs hinterlegt
  - Passwort: „Polradwinkel“

# Klausur

- **Freitag, 14. September 2018, 08:00 Uhr – 10:00 Uhr**
- Erlaubte Hilfsmittel:
  - Formelsammlung
  - Taschenrechner (nicht programmierbar)
- Schreib-/Zeichenutensilien und Papier sind selbst mitzubringen
- Vorbereitung
  - Besuch der Vorlesung und Übung
  - Rechnen der Übungsaufgaben
  - Rechnen der Klausuraufgaben

# Das Elektrotechnische Institut (ETI Geb. 11.10)



# Das Elektrotechnische Institut (ETI)



Prof. Dr.-Ing.  
**Michael Braun**  
*Elektrische Antriebe und Leistungselektronik (EAL)*  
Tel.: +49 (721) 608-42472  
Michael.Braun@kit.edu  
Campus Süd, Geb. 11.10  
Raum 111

- Stromrichter-Systemtechnik
- Modulare Multilevel-Umrichter
- Neuartige Umrichtertopologien
- Maschinenregelung



Prof. Dr.-Ing.  
**Martin Doppelbauer**  
*Professur für Hybride Elektrische Fahrzeuge (HEV)*  
Tel.: +49 (721) 608-46250  
Martin.Doppelbauer@kit.edu  
Campus Süd, Geb. 11.10  
Raum 114

- Elektromagnetische Motorauslegung
- Mechanische Auslegung / Konstruktion
- Antriebssysteme

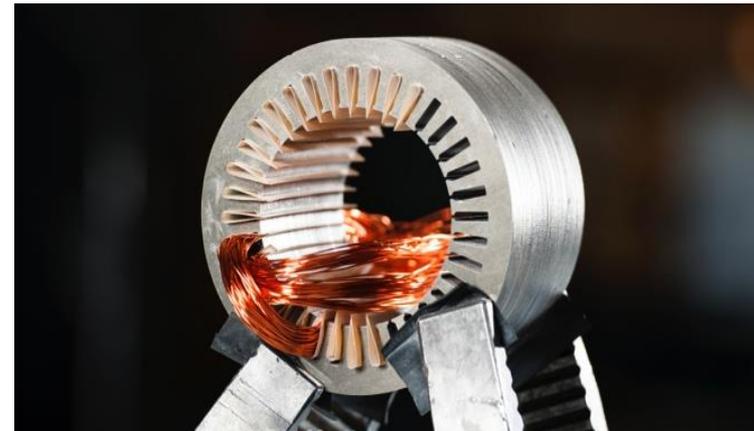


Prof. Dr.-Ing.  
**Marc Hiller**  
*Professur Leistungselektronische Systeme (PES)*  
Tel.: +49 (721) 608-42474  
Marc.Hiller@kit.edu  
Campus Süd, Geb. 11.10  
Raum 116

- Umrichterauslegung
- Elektrische und Thermische Simulation
- LV/MV-Leistungshalbleiter
- Neuartige Applikationen



Permanentterregte Synchronmaschine  
für den Rennsporteinsatz

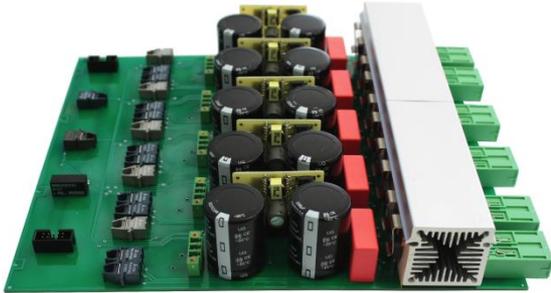


Selbstgewickelter Stator einer  
Drehstrommaschine

# Maschinenprüfstand am ETI



# Leistungselektronik



Bausteine eines  
Modularen Multilevel Umrichters



Modularer Multilevel Matrix Umrichter

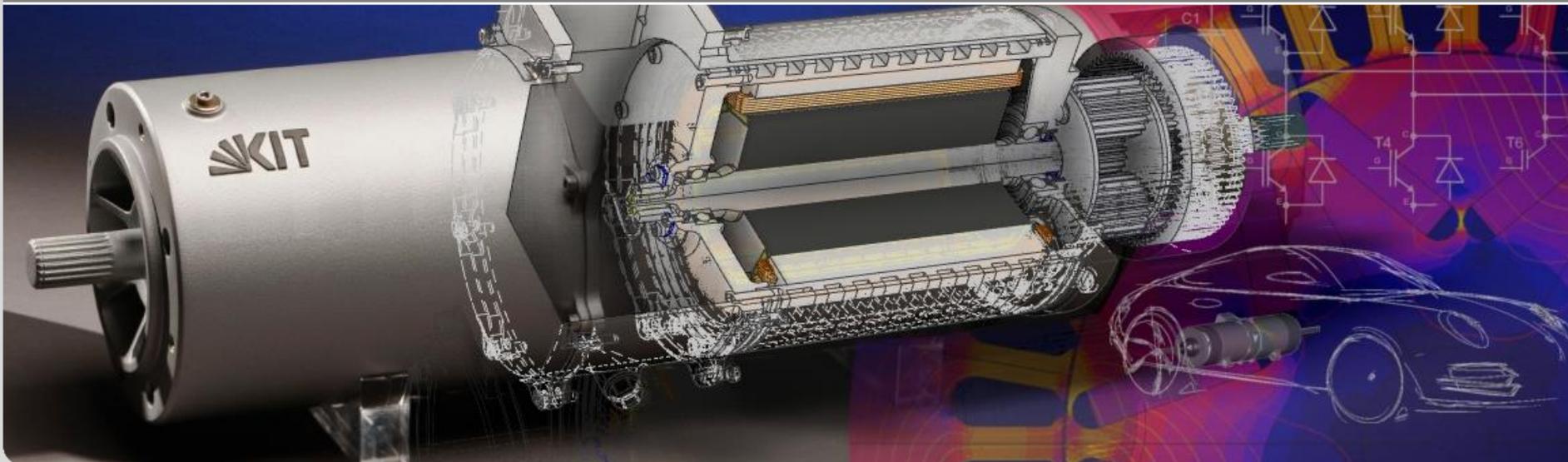


IGBT-Module

# Übung zur Vorlesung Elektrische Maschinen und Stromrichter Gleichstrommaschine

Dennis Bräckle

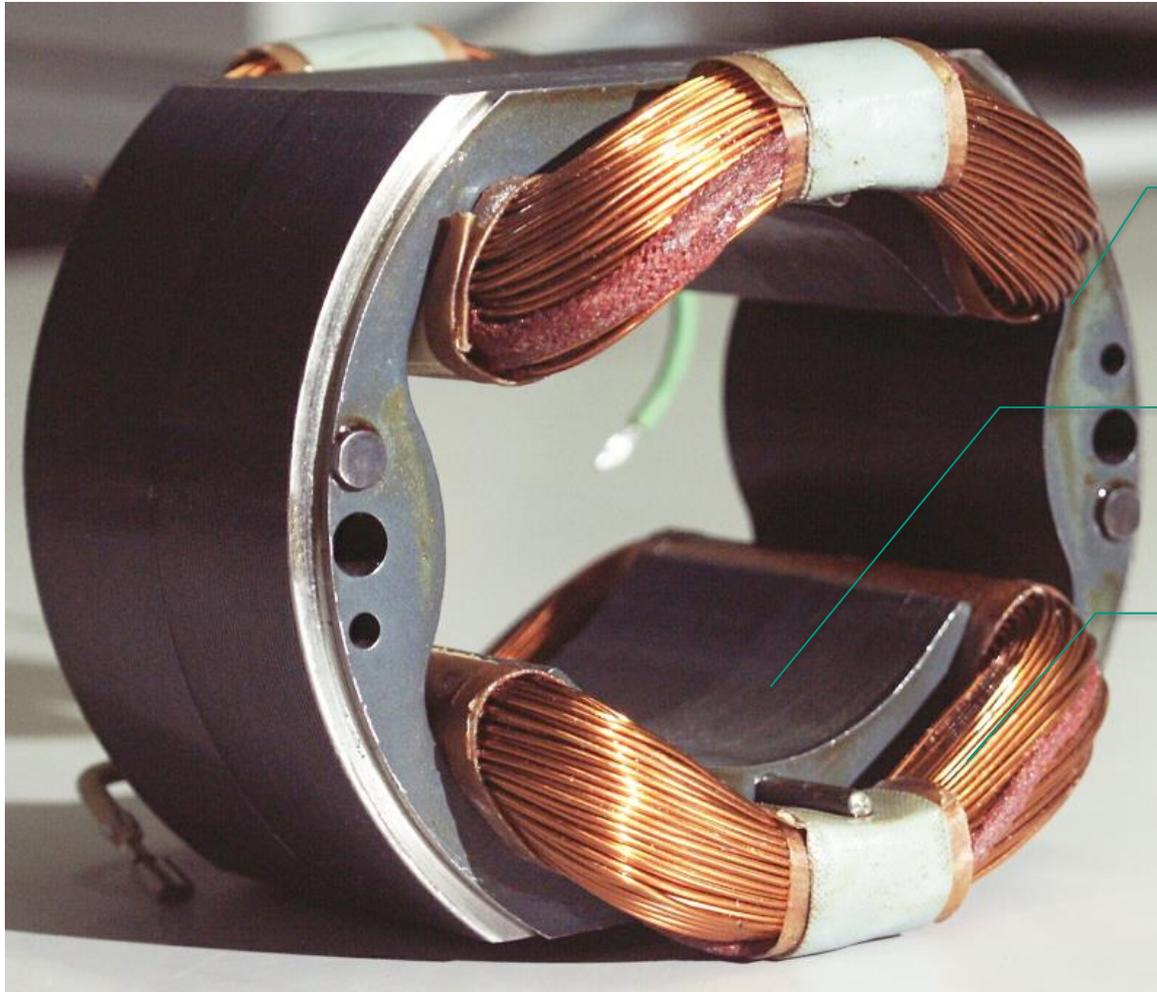
Elektrotechnisches Institut – Elektrische Antriebe und Leistungselektronik



# Translatorische und rotatorische Bewegung

Translation			Rotation		
Name, Symbol	Gleichung	Einheit	Name, Symbol	Gleichung	Einheit
Weg $s$		m	Winkel $\varphi$		rad
Geschwindigkeit $v$	$v = \frac{ds}{dt}$	$\frac{m}{s}$	Winkelgeschw. $\dot{\varphi}$	$\Omega = \frac{d\varphi}{dt}$	$\frac{rad}{s}$
Beschleunigung $a$	$a = \frac{dv}{dt}$	$\frac{m}{s^2}$	Winkelbeschl. $\ddot{\varphi}$	$\alpha = \frac{d\Omega}{dt}$	$\frac{rad}{s^2}$
Masse $m$		kg	Massenträgheitsmoment $J$	$J = \int r^2 dm$	kg · m <sup>2</sup>
Kraft $F$	$F = m \cdot a$	N	Drehmoment $M$	$M = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$	Nm
Leistung $P$	$P = F \cdot v$	W	Leistung $P$	$P = M \cdot \Omega$	W
Arbeit $W$	$W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$	J	Arbeit $W$	$W = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \Omega^2$	J

# Stator einer Gleichstrommaschine

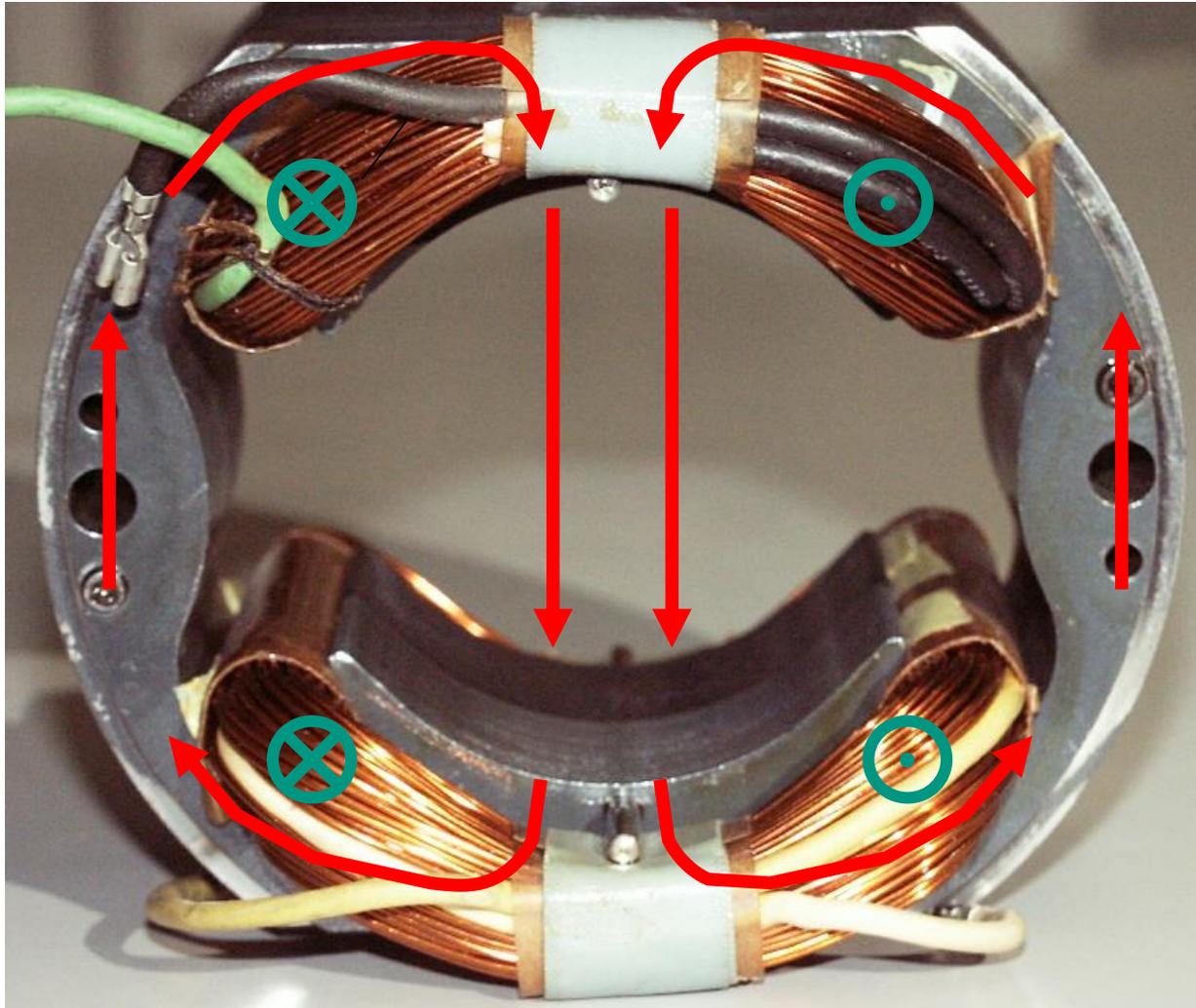


Joch

Polschuh

Feldwicklung/  
Erregerwicklung

# Stator einer Gleichstrommaschine

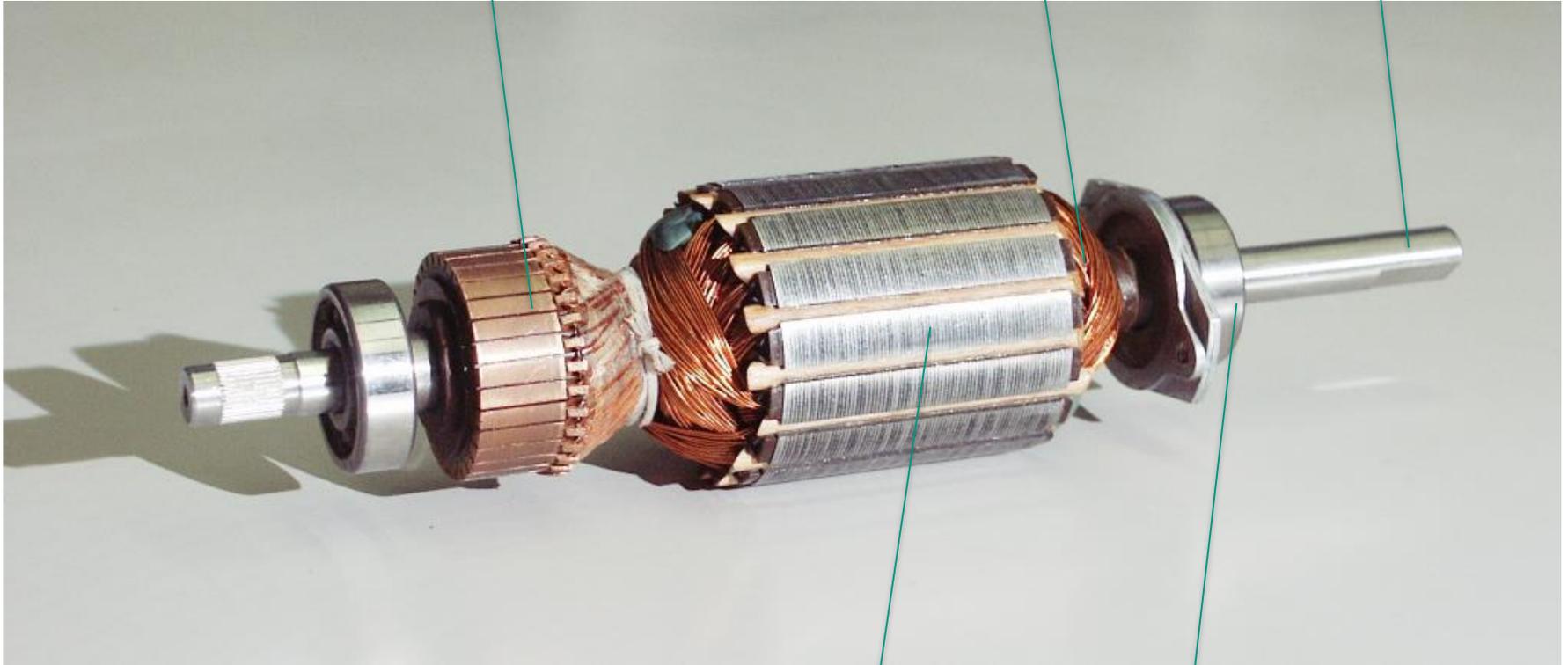


# Rotor einer Gleichstrommaschine

Kommutator

Wickelkopf

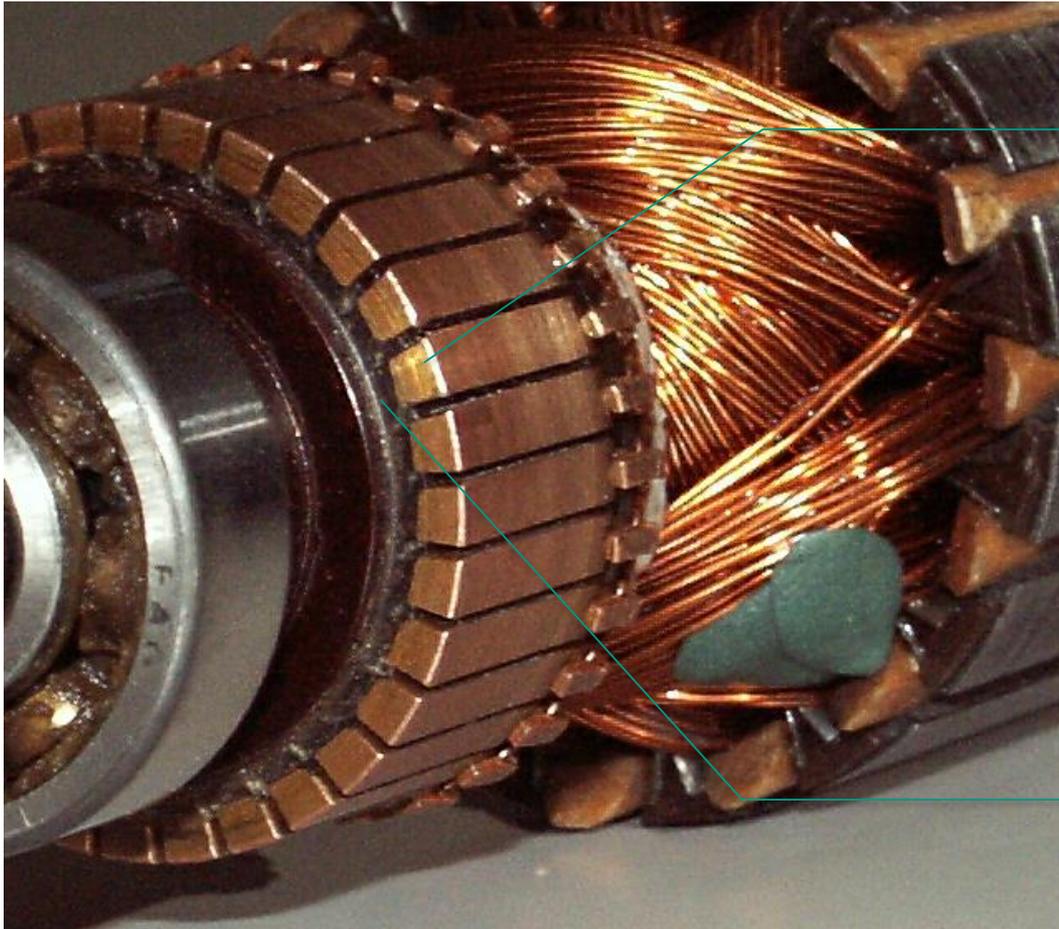
Welle



Rotorblechpaket

Lager

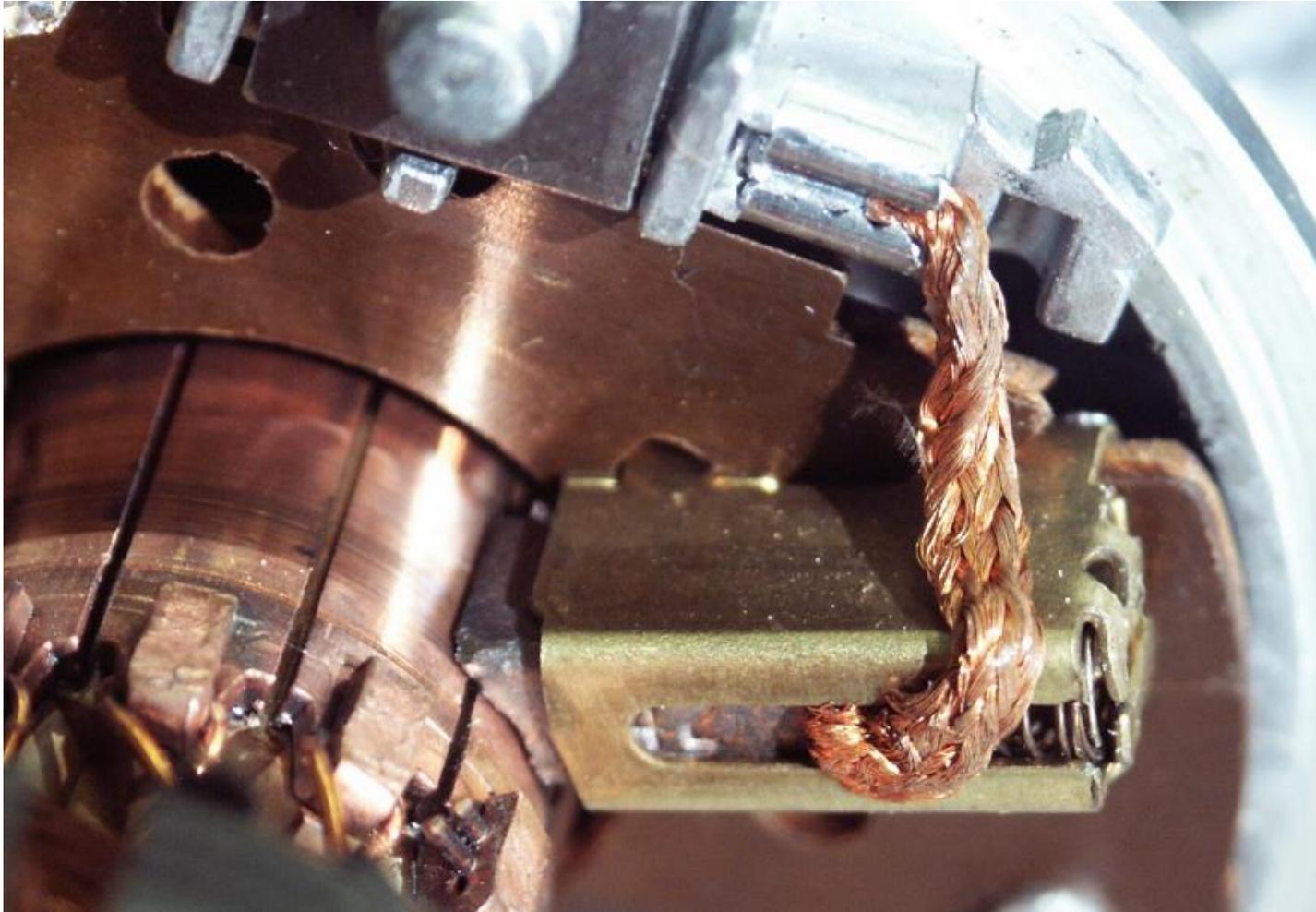
# Kommutator einer Gleichstrommaschine



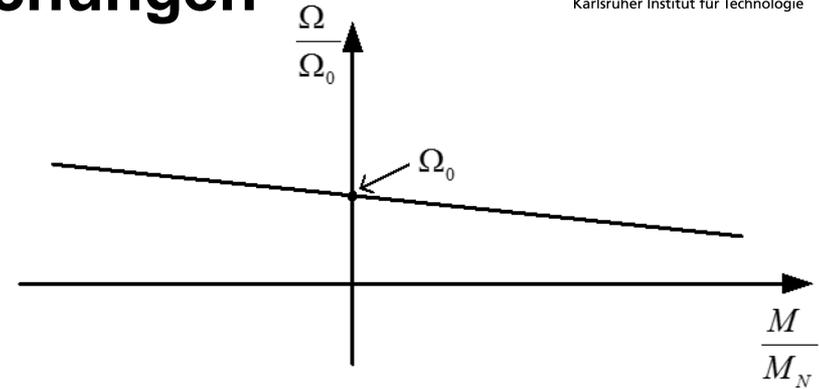
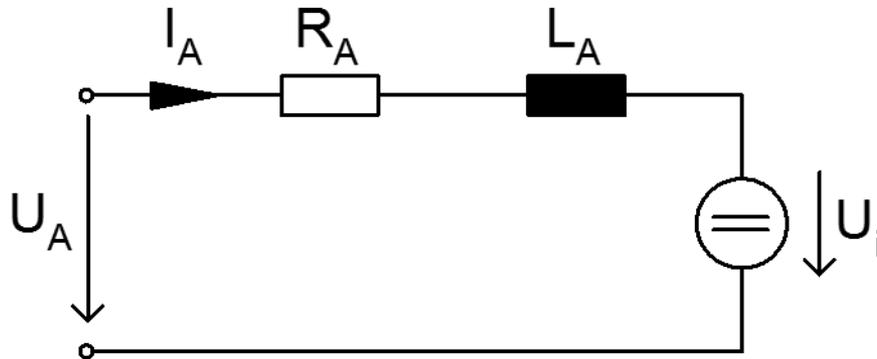
Kommutator-  
lamellen

Isolation

# Kohlebürste einer Gleichstrommaschine



# Ersatzschaltbild und Grundgleichungen



Innere Spannung:

$$u_i = c\Phi\Omega$$

Ankerspannungsgleichung:

$$u_A = R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + c\Phi\Omega$$

Ankerspannungsgleichung stationär:

$$U_A = R_A I_A + c\Phi\Omega$$

Momentengleichung:

$$M_i = c\Phi I_A$$

Kennlinie:

$$\Omega = \underbrace{\frac{U_A}{c\Phi}}_{\Omega_0} - \frac{R_A}{(c\Phi)^2} M_i$$

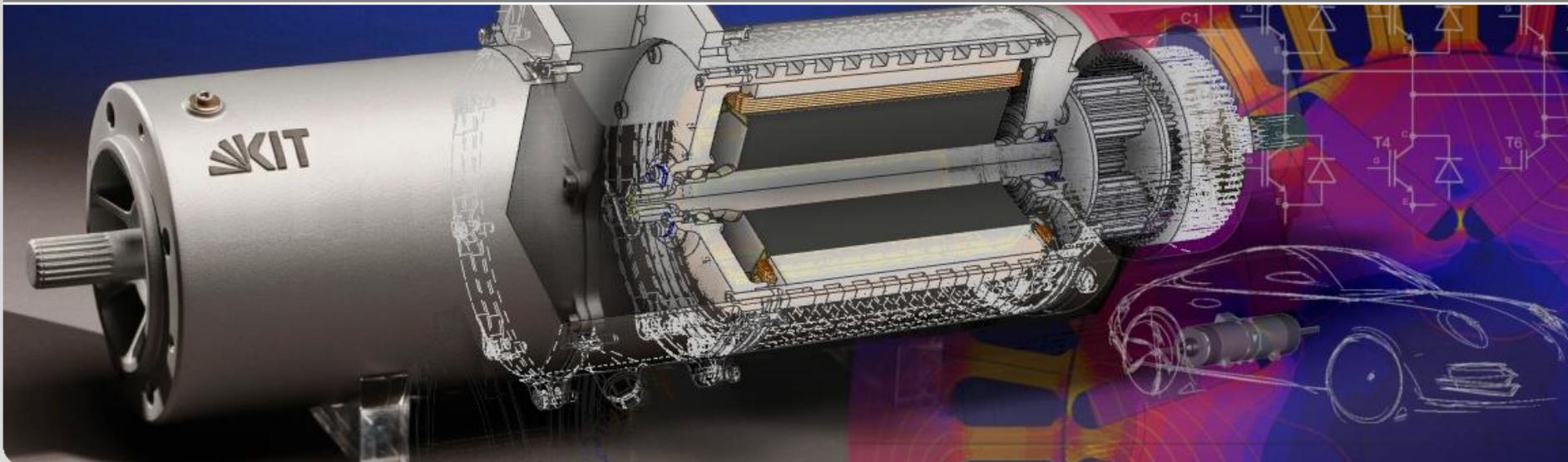
Erregung:

$$c\Phi \sim I_F$$

# Übung zur Vorlesung Elektrische Maschinen und Stromrichter Allgemeines

Dennis Bräckle

Elektrotechnisches Institut – Elektrische Antriebe und Leistungselektronik



# Formelsymbole

- Zeitveränderliche Größen werden üblicherweise mit Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

$$i(t) = \hat{I} \cdot \cos(\omega t + \varphi_I)$$

- Effektivwerte werden mit Großbuchstaben bezeichnet

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) dt}$$

- Komplexe Größen erhalten einen Unterstrich

$$\underline{I} = I \cdot (\cos(\varphi_I) + j \cdot \sin(\varphi_I))$$

# Indizierung

- Index für eindeutige Zuordnung:

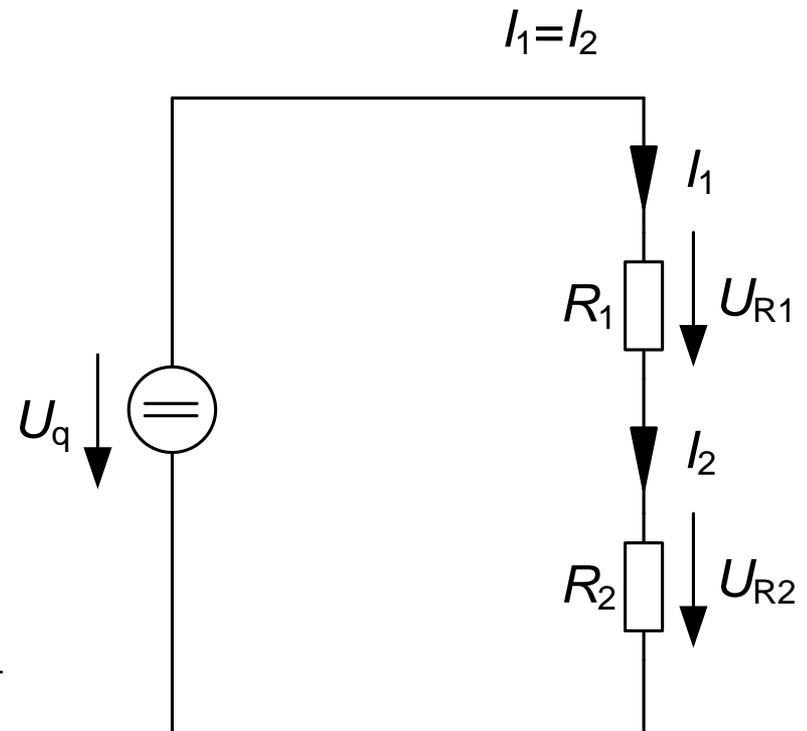
- allgemein:

$$U = R \cdot I$$

- speziell:

$$U_{R1} = R_1 \cdot I_1$$

$$U_{R2} = R_2 \cdot I_2 = R_2 \cdot I_1$$



# Einheiten von physikalischen Größen

- Rechnungen immer vollständig mit Einheiten durchführen

$$I_1 = 5 \text{ A}$$

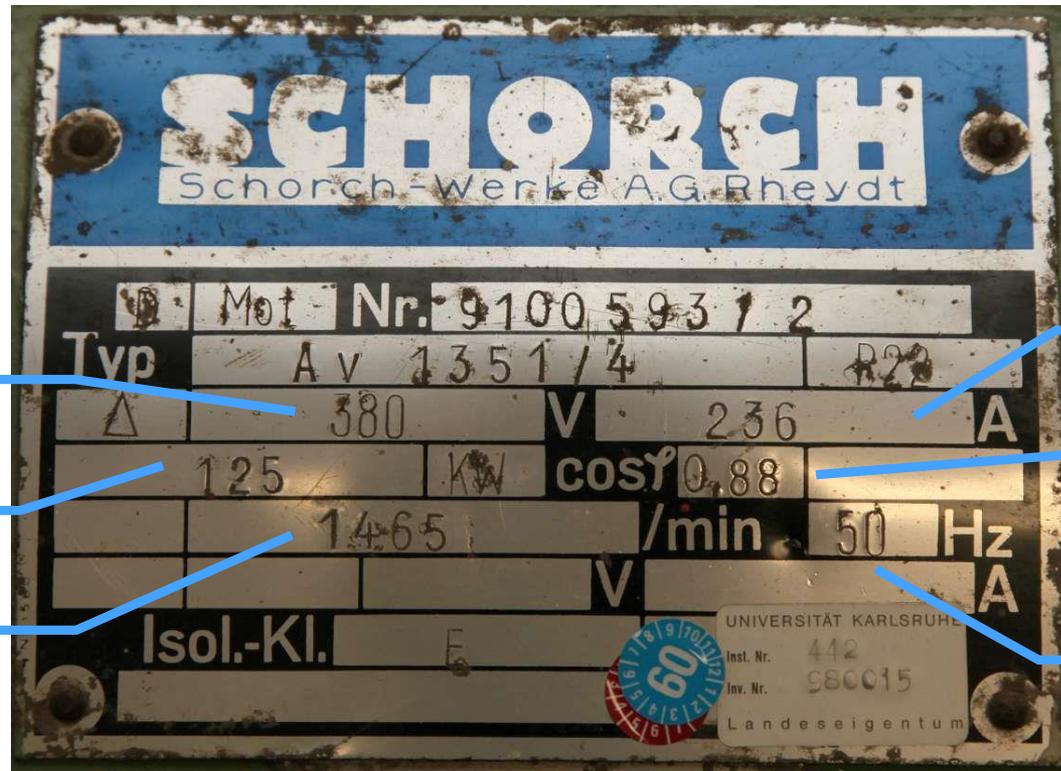
↑                    ↑    ↑  
physik.           Wert    |  
Größe            Einheit

- Ermöglicht zusätzliche Kontrolle während der Rechnung

# Nenngrößen

- Nenngrößen werden durch die Auslegung einer Maschine oder eines Gerätes bestimmt (Hersteller, Datenblatt, Typenschild).
- Der Nennpunkt ist genau der Betriebspunkt der Maschine/des Geräts, in dem sämtliche Größen den Nenngrößen entsprechen
- Meist kennzeichnen sie die maximal zulässigen Werte, mit der ein Gerät dauerhaft betrieben werden darf
- Begrenzung beispielsweise durch gewählten Drahtquerschnitt (Erwärmung durch Verluste)
- Kennzeichnung durch ein großes N im Index
  - z.B.  $I_1 = I_{1N}$

# Typenschild einer Asynchronmaschine



Nennspannung

Nennleistung

Nennzahl

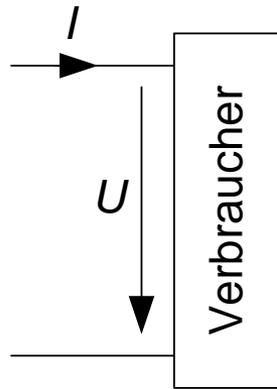
Nennstrom

Nennleistungs-  
faktor

Nennfrequenz

# Zählpfeilsysteme

Verbraucherzählpfeilsystem:



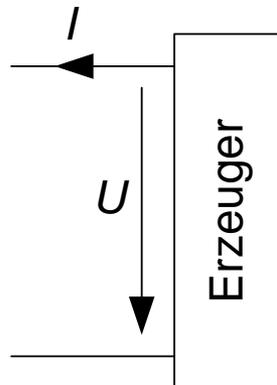
$$P > 0W$$

der Verbraucher nimmt Leistung auf

$$P < 0W$$

der Verbraucher gibt Leistung ab

Erzeugerzählpfeilsystem:



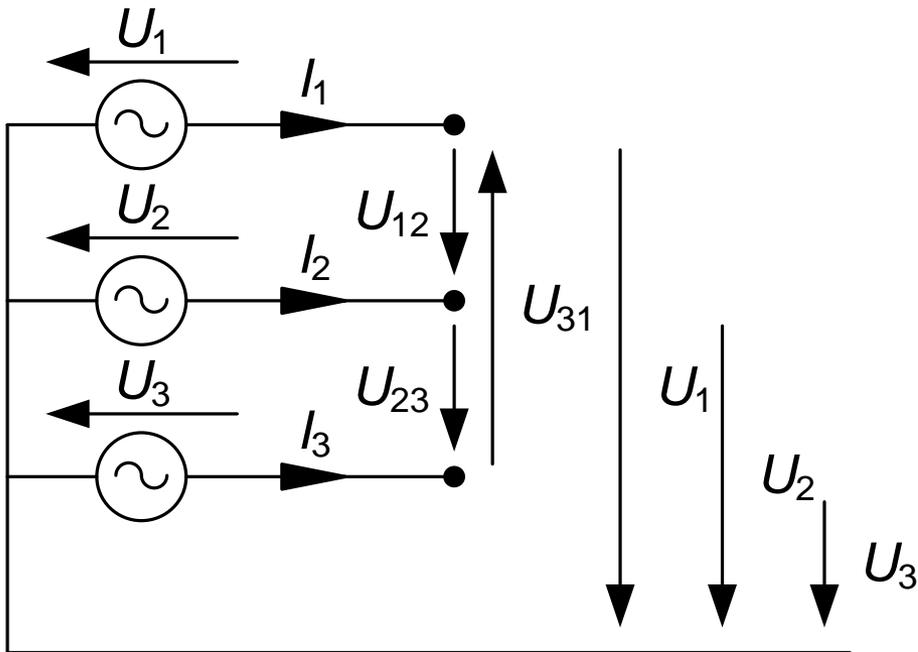
$$P > 0W$$

der Erzeuger gibt Leistung ab

$$P < 0W$$

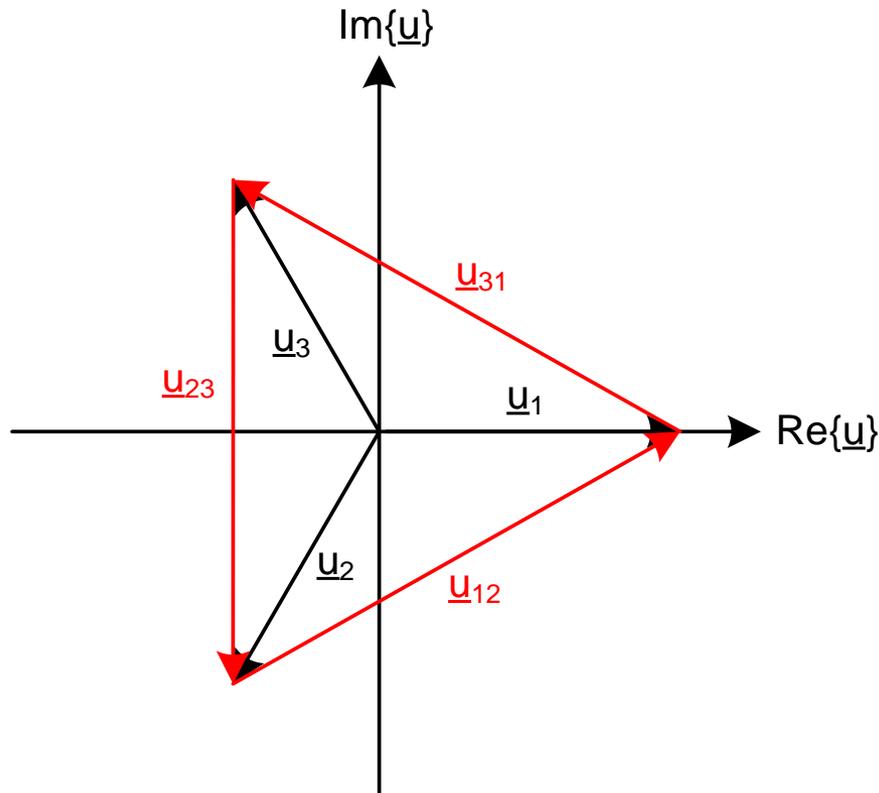
der Erzeuger nimmt Leistung auf

# Drehspannungssystem



- Die Strangspannung  $U_S$  liegt von einer Phase zum Sternpunkt an
  - $U_S = U_1 = U_2 = U_3$
- Die Leiterspannung  $U_L$  liegt zwischen zwei Phasen an. Die Nennspannung  $U_N$  bezieht sich in der Energietechnik auf die Leiterspannung ( $U_N = U_L = U_{12} = U_{23} = U_{31}$ )
- $120^\circ$  Phasenverschiebung zwischen den Phasen
  - $u_1 + u_2 + u_3 = 0V$
- Der Strom in einer Phase wird als Strangstrom  $I_S$  bezeichnet.
  - $I_S = I_1 = I_2 = I_3$

# Strang- und Leiterspannungen



$$u_1(\omega t) = \hat{U} \cos(\omega t)$$

$$u_2(\omega t) = \hat{U} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$u_3(\omega t) = \hat{U} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

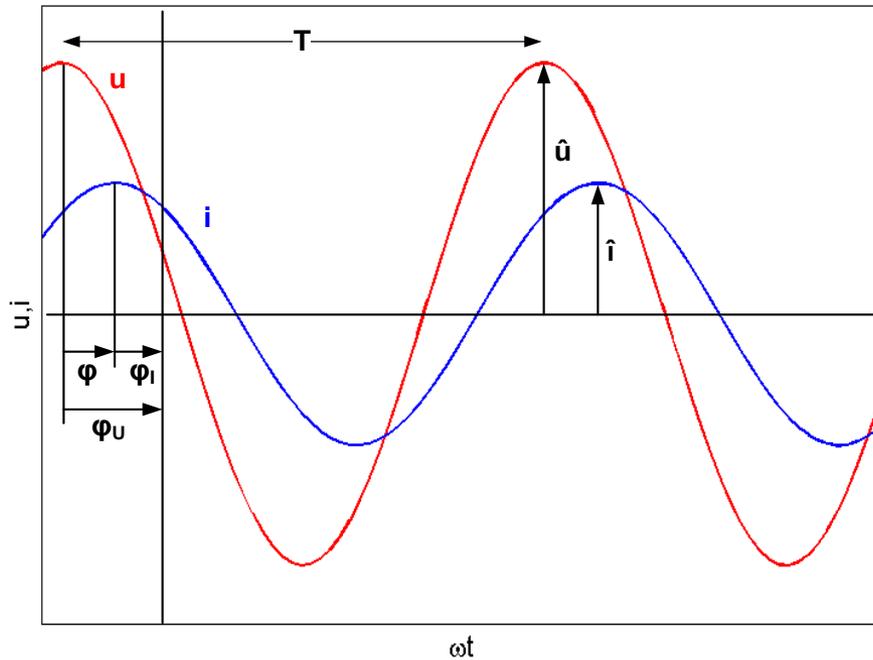
$$u_{12}(\omega t) = \hat{U}\sqrt{3} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$u_{23}(\omega t) = \hat{U}\sqrt{3} \cos\left(\omega t + \frac{3\pi}{2}\right)$$

$$u_{31}(\omega t) = \hat{U}\sqrt{3} \cos\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right)$$

■ Es gilt:  $U_N = \sqrt{3} \cdot U_{SN}$      $\hat{U} = \sqrt{2} \cdot U_{SN}$

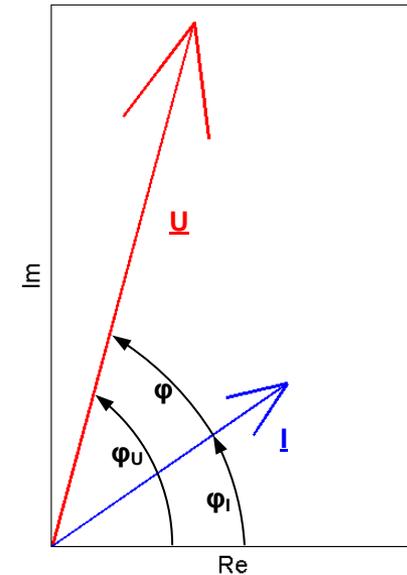
# Komplexer Effektivwert



$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos(\omega t + \varphi_U)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \cos(\omega t + \varphi_I)$$

$$\varphi = \varphi_U - \varphi_I$$



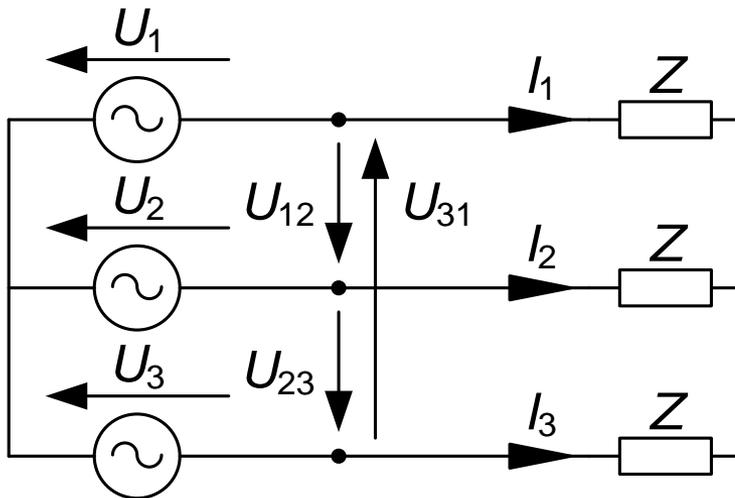
$$\underline{U} = U \cdot e^{j\varphi_U}$$

$$\underline{I} = I \cdot e^{j\varphi_I}$$

- zeitunabhängige Größe
- gilt nur für sinusförmige Größen

# Leistungsrechnung im dreiphasigen System

- Für ein symmetrisches Drehstromsystem gilt:



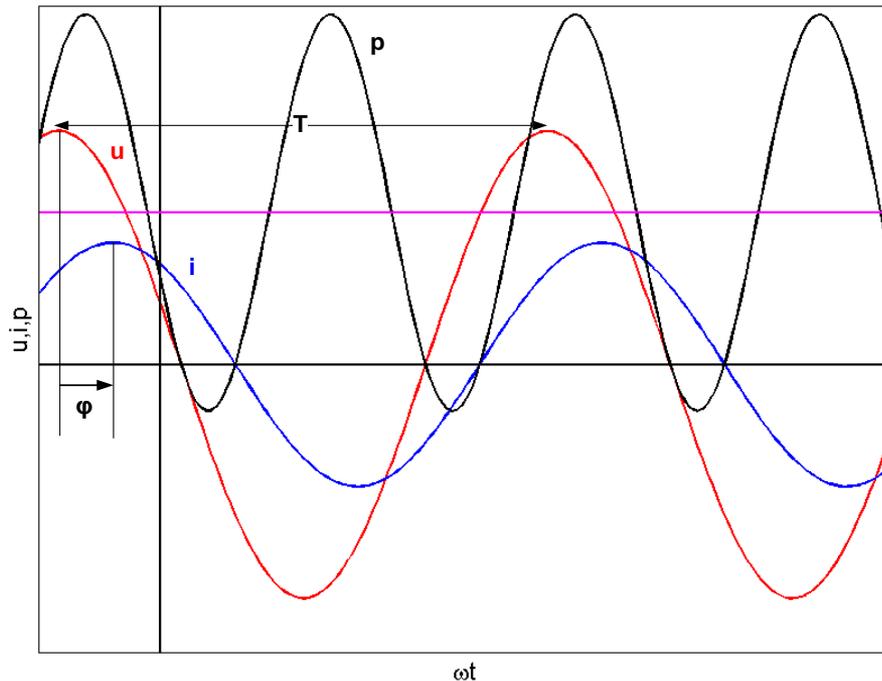
Scheinleistung  $S = 3U_S I_S$

$$\Rightarrow S = 3 \frac{U_N}{\sqrt{3}} I_S = \sqrt{3} U_N I_S$$

$$P = 3U_S I_S \cos \varphi = S \cos \varphi$$

$$Q = 3U_S I_S \sin \varphi = S \sin \varphi$$

# Momentanleistung und Wirkleistung

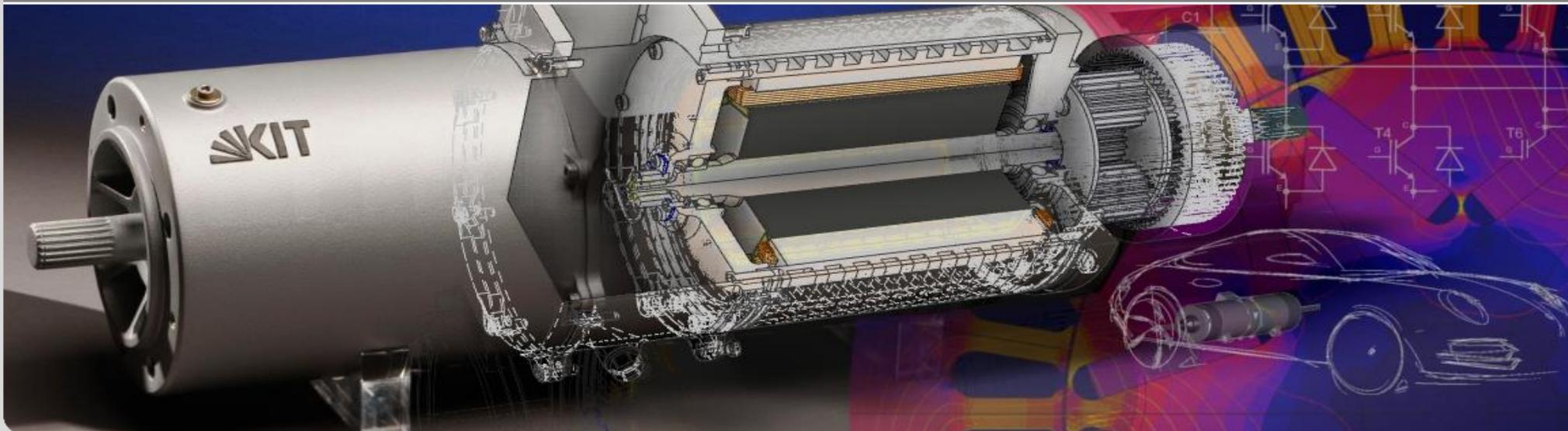


- Die Momentanleistung ergibt sich zu
 
$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$
- Die Wirkleistung entspricht dem Mittelwert des Zeitverlaufs der Momentanleistung

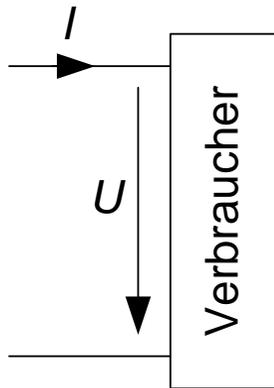
# Übung zur Vorlesung Elektrische Maschinen und Stromrichter Synchronmaschine

Dennis Bräckle

Elektrotechnisches Institut – Elektrische Antriebe und Leistungselektronik



# Zählpfeilsystem

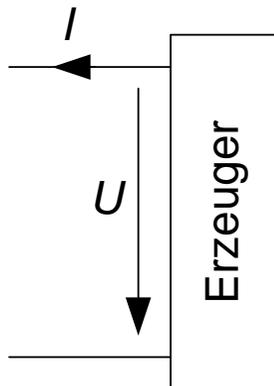
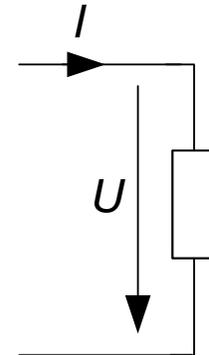


$$P > 0W$$

der Verbraucher nimmt Leistung auf

$$P < 0W$$

der Verbraucher gibt Leistung ab

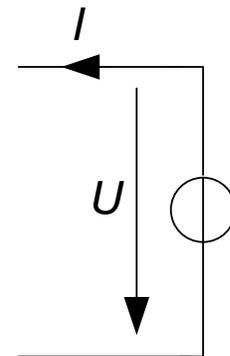


$$P > 0W$$

der Erzeuger gibt Leistung ab

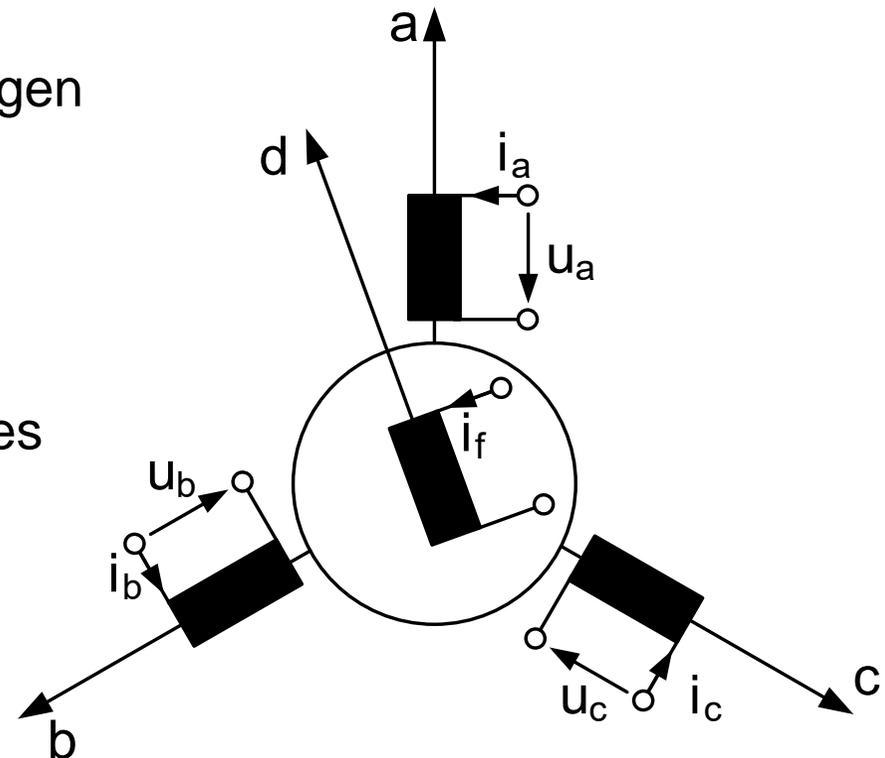
$$P < 0W$$

der Erzeuger nimmt Leistung auf



# Synchronmaschine

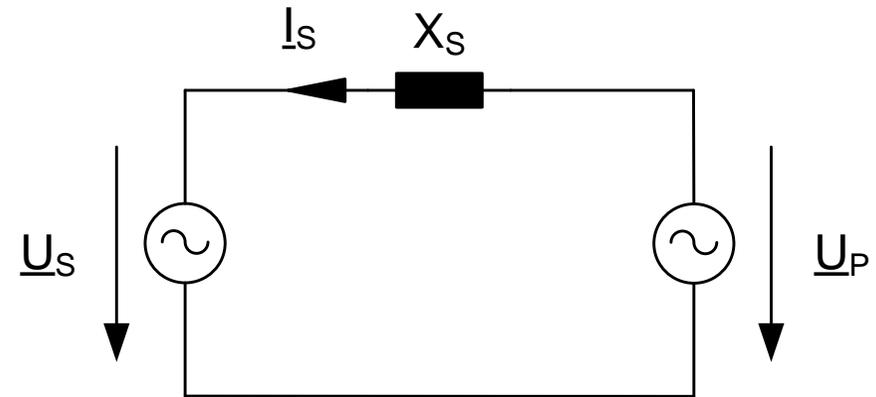
- Ständerwicklung (Drehstromwicklung)
- Räumlich um  $120^\circ$  versetzt (Polpaarzahl  $p=1$ )
- Die Magnetfelder der einzelnen Wicklungen bilden ein gemeinsames, rotierendes Magnetfeld
- Erregerwicklung auf dem Läufer oder Permanentmagnet erzeugt ein konstantes Magnetfeld



# Einphasiges Ersatzschaltbild

Annahmen:

- Symmetrische Maschine
- Speisung am symmetrischen Drehstromnetz
- Erzeugerzählpfeilsystem
- Turboläufer:  $X_S = X_d = X_q$
- Für große Maschinen wird der Wicklungswiderstand vernachlässigt
- Die Nennspannung bezieht sich bei Drehstrommaschinen immer auf die Leiterspannung



$$U_L = U_S \cdot \sqrt{3}$$

$$U_N = U_{SN} \cdot \sqrt{3}$$

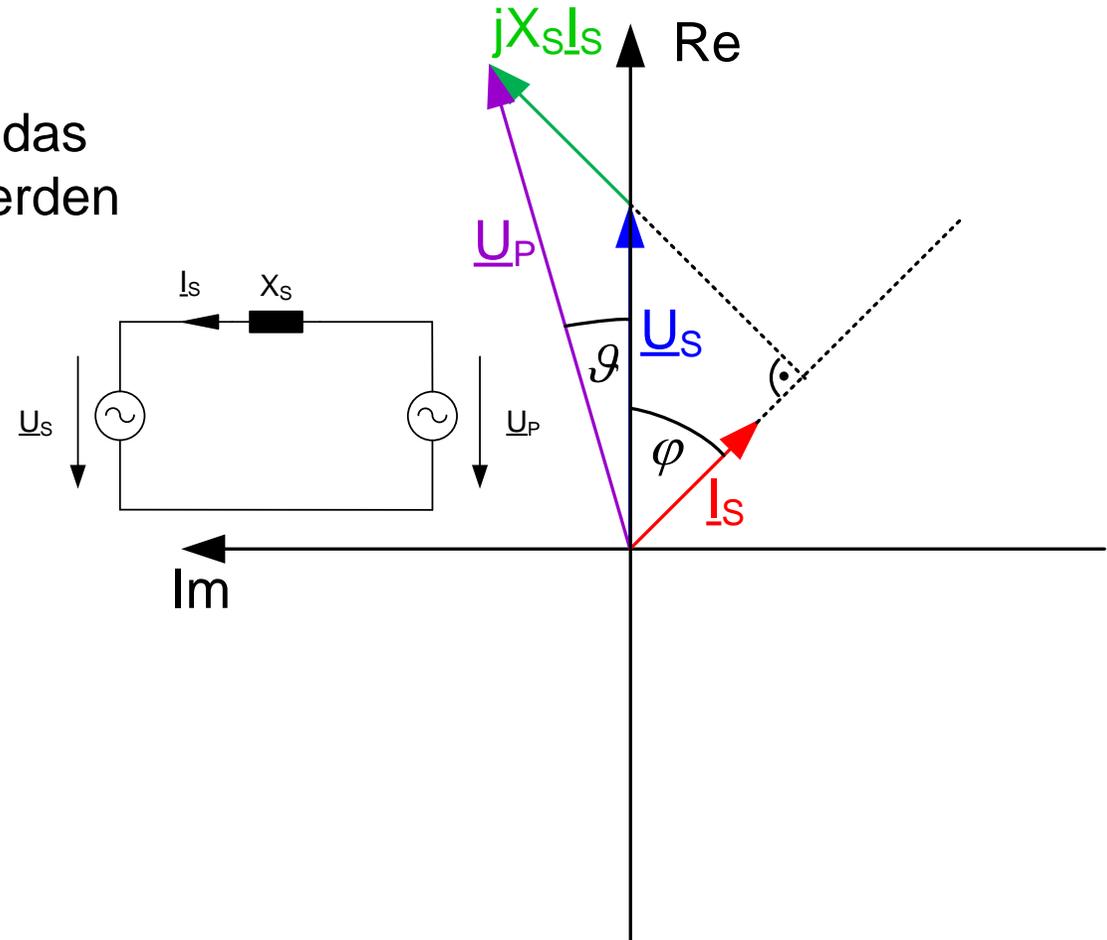
# Zeigerdiagramm

- Der Betriebszustand der Synchronmaschine kann über das Zeigerdiagramm dargestellt werden (Lage des Stromzeigers in der komplexen Ebene)
- $\cos(\varphi) = \cos(-\varphi) \Rightarrow$   
 $\cos(\varphi)$  ist nicht eindeutig

Es muss zwischen

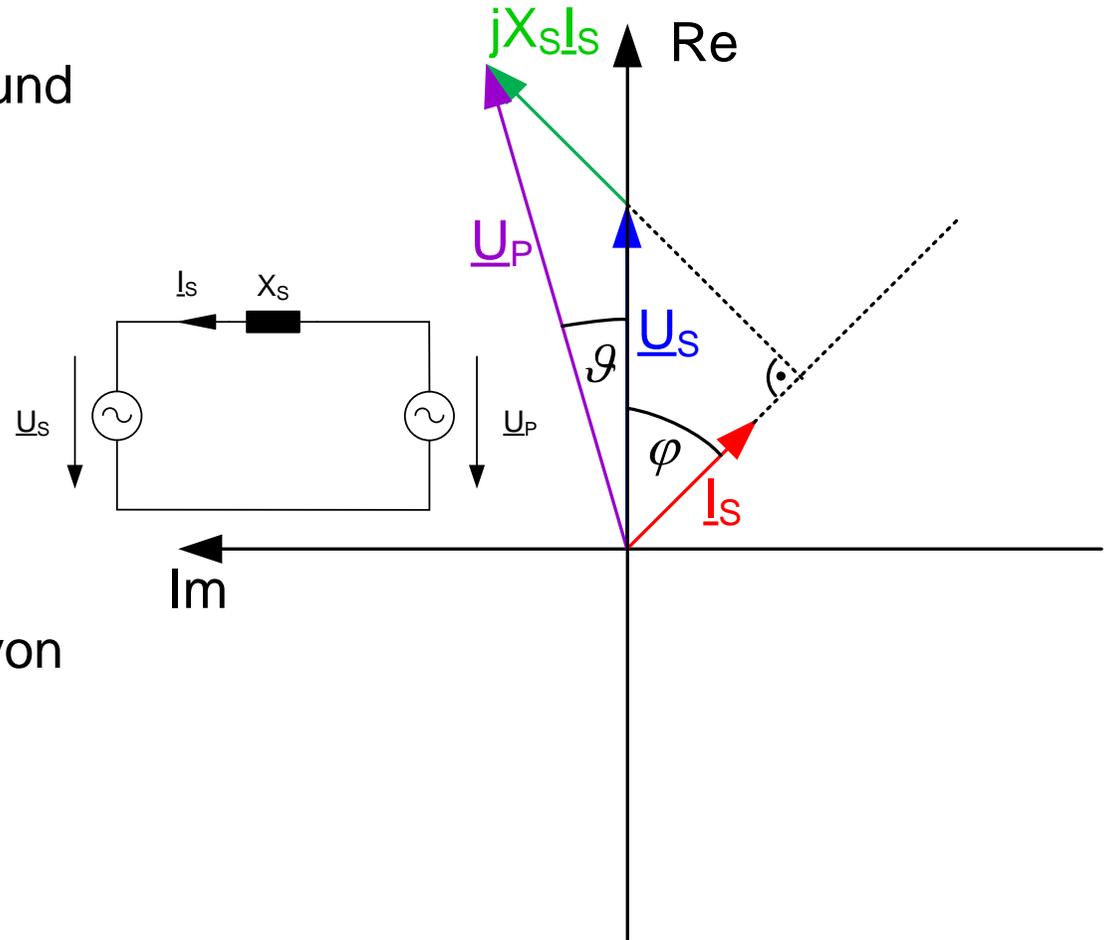
- $\cos(\varphi)$  übererregt
- $\cos(\varphi)$  untererregt

unterschieden werden



# Zeigerdiagramm

- Der Winkel  $\varphi$  wird zwischen  $\underline{I}_S$  und  $\underline{U}_S$  eingezeichnet.
- Der Winkel zwischen der Strangspannung  $\underline{U}_S$  und der Polradspannung  $\underline{U}_P$  wird als Polradwinkel  $\vartheta$  bezeichnet.



- Der Polradwinkel ist abhängig von der Belastung der Maschine

$$M_{el} = M_k \sin \vartheta$$

# Blindleistungseinstellung und Drehzahl

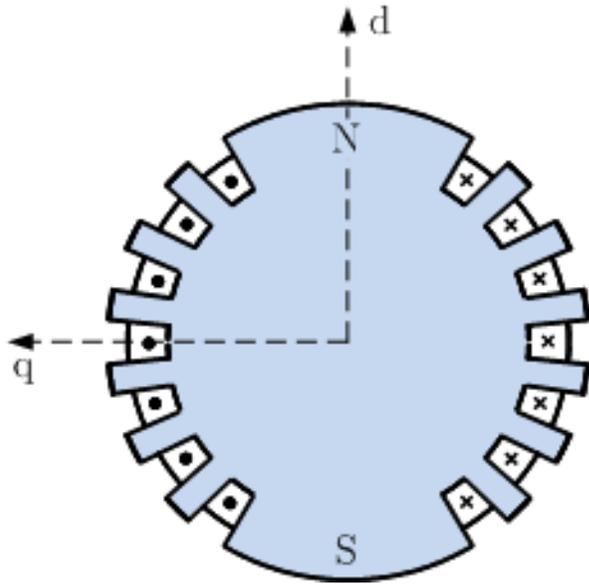
- Durch Variation des Erregerstroms kann die Aufnahme bzw. Abgabe von Blindleistung an der Synchronmaschine eingestellt werden.
- Eine übererregte Synchronmaschine zeigt kapazitives Verhalten
- Eine untererregte Synchronmaschine zeigt induktives Verhalten
- Die Polradspannung  $U_p$  ist proportional zum Erregerstrom  $I_f$  (Sättigung vernachlässigt) und proportional zur Drehzahl  $n$

$$U_p \sim I_f \qquad U_p \sim n$$

- Die Drehzahl einer Synchronmaschine ist durch die Frequenz des speisenden Drehstromsystems und die Polpaarzahl bestimmt:

$$\Omega = \frac{\omega_S}{p} = \frac{2\pi f}{p}$$

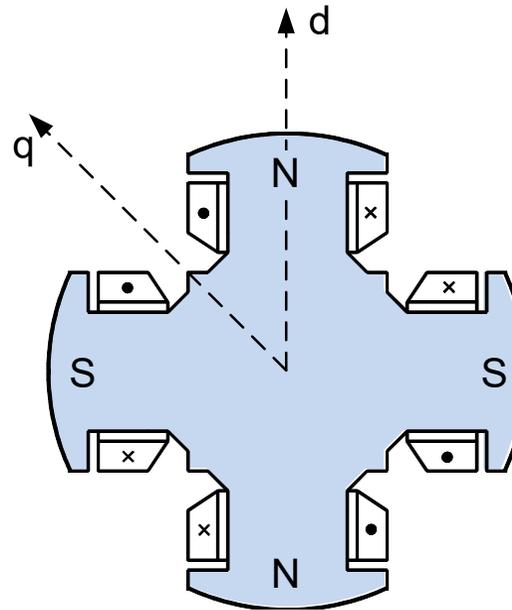
# Läuferbauformen



Elektrisch erregter  
Turborotor

$$p = 1$$

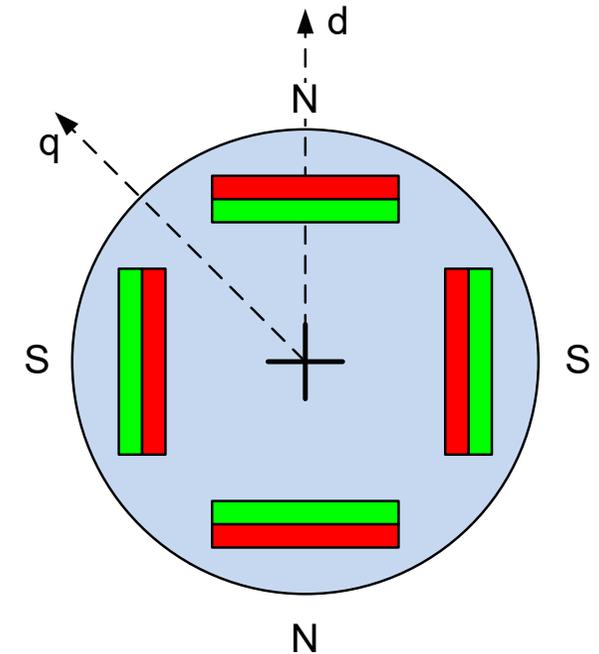
$$L_d = L_q$$



Elektrisch erregter  
Schenkelpolrotor

$$p = 2$$

$$L_d > L_q$$

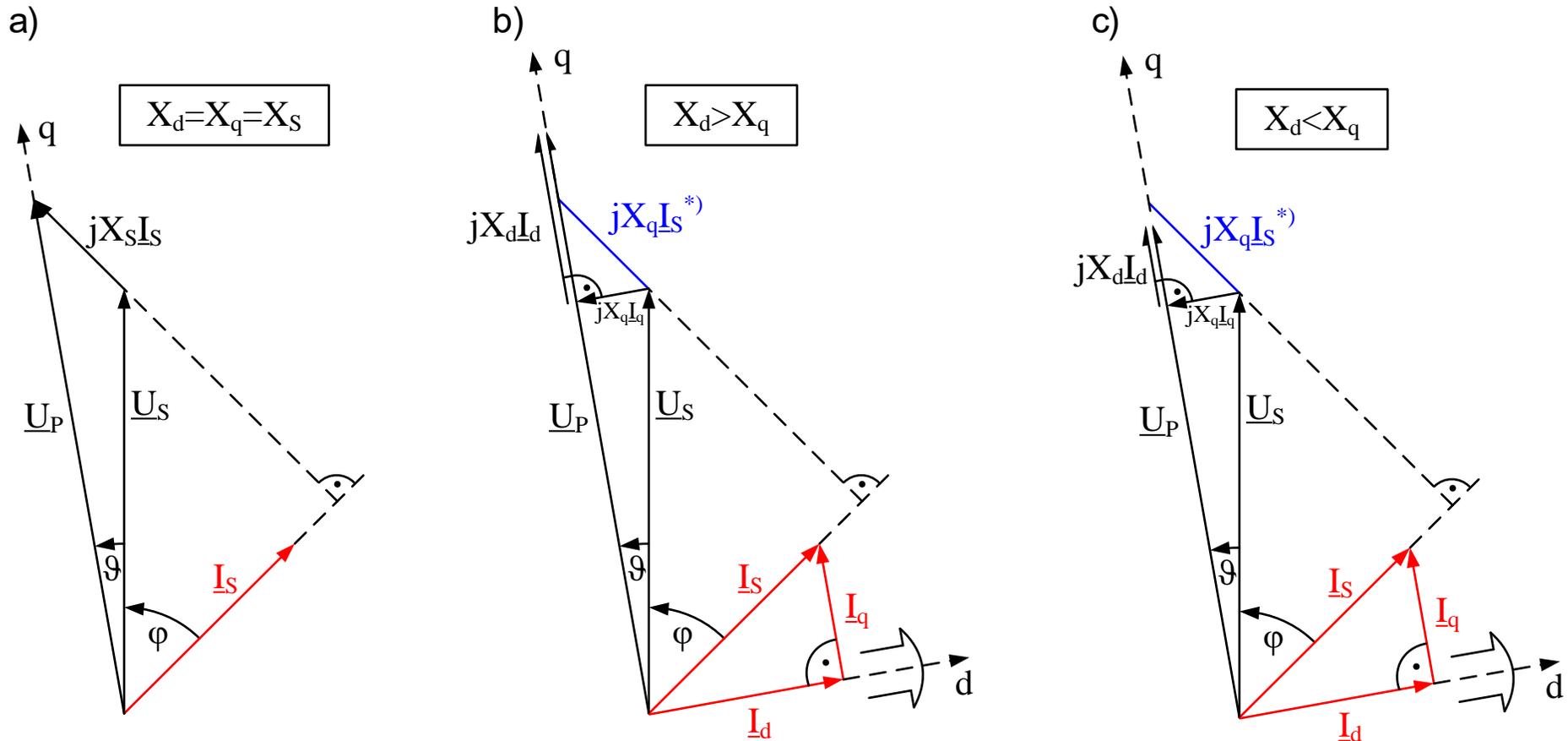


Rotor mit vergrabenen  
Magneten

$$p = 2$$

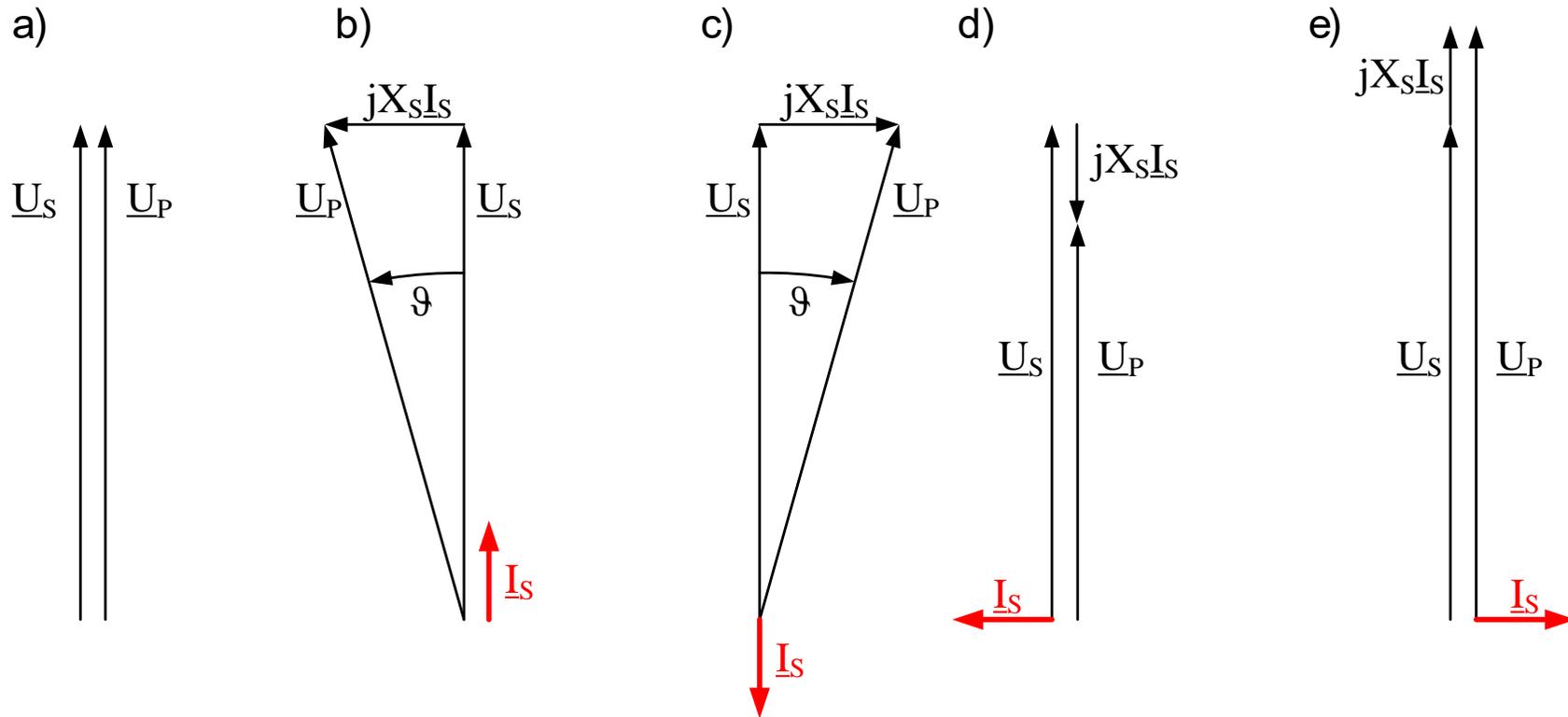
$$L_d < L_q$$

# Zeigerdiagramm für verschiedene Läuferbauformen



\*) Hilfskonstruktion zur Festlegung der Richtung von  $\underline{U}_P$

# Zeigerdiagramm für verschiedene Betriebszustände



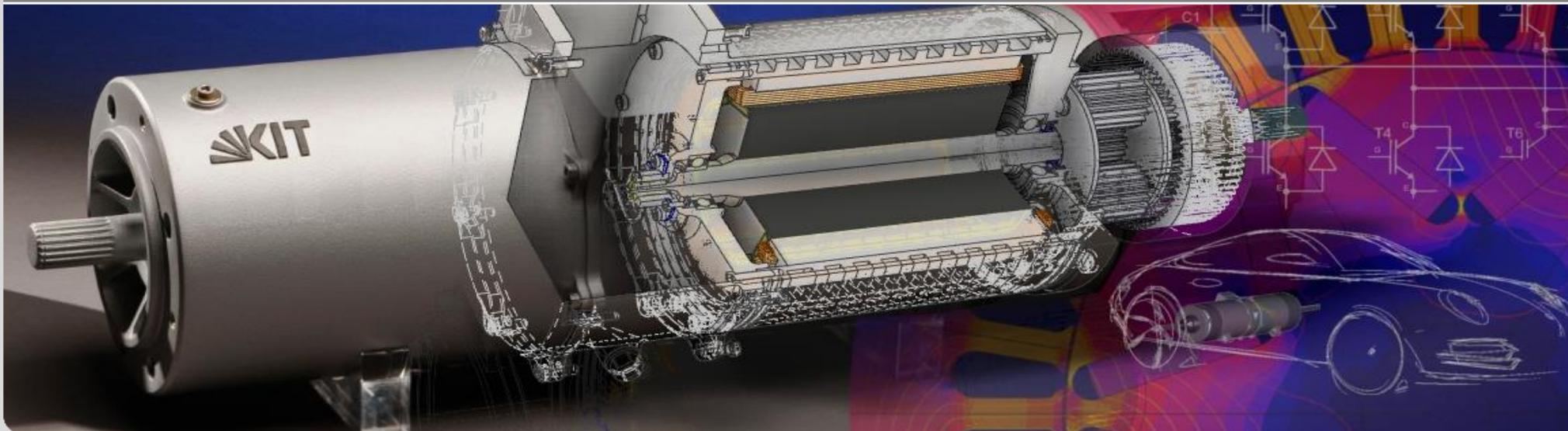
Synchronmaschine mit Turboläufer am starren Netz

- Leerlauf nach Synchronisierung
- Generatorischer Betrieb ohne Blindleistungsaufnahme oder -abgabe
- Motorischer Betrieb ohne Blindleistungsaufnahme oder -abgabe
- Phasenschieberbetrieb untererregt (SM wirkt wie eine Dreiphasendrossel)
- Phasenschieberbetrieb übererregt (SM wirkt wie ein Kondensator je Phase)

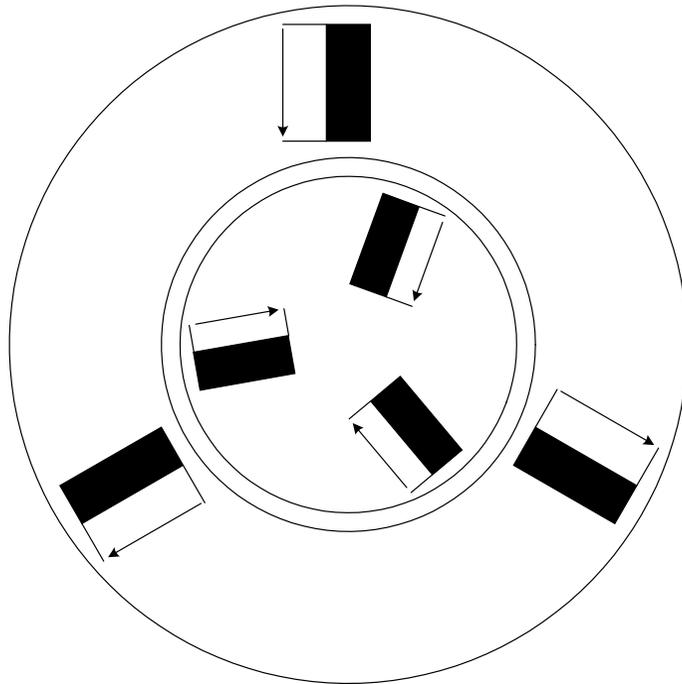
# Übung zur Vorlesung Elektrische Maschinen und Stromrichter Asynchronmaschine

Dennis Bräckle

Elektrotechnisches Institut – Elektrische Antriebe und Leistungselektronik



# Aufbau Asynchronmaschine



- Drehstromwicklung im Stator, wie bei der Synchronmaschine
- Drehstromwicklung auf dem Rotor beim Schleifringläufer
- Stäbe anstatt Läuferwicklung beim Kurzschlussläufer
- Generierung des Läufermagnetfelds durch das Statorfeld



■ Kurzschlussläufer

■ Schleifringläufer



©ETI Vo

# Rotorfrequenz

- Im asynchronen Betrieb wird im Rotor ein Drehspannungssystem induziert mit der Frequenz:

$$f_R = f_S - p \cdot n$$

- Die im Rotor induzierte Spannung führt zu einem Stromfluss in der Rotorwicklung, der mit dem Magnetfeld des Stators zur Bildung des Drehmoments an der Welle führt.

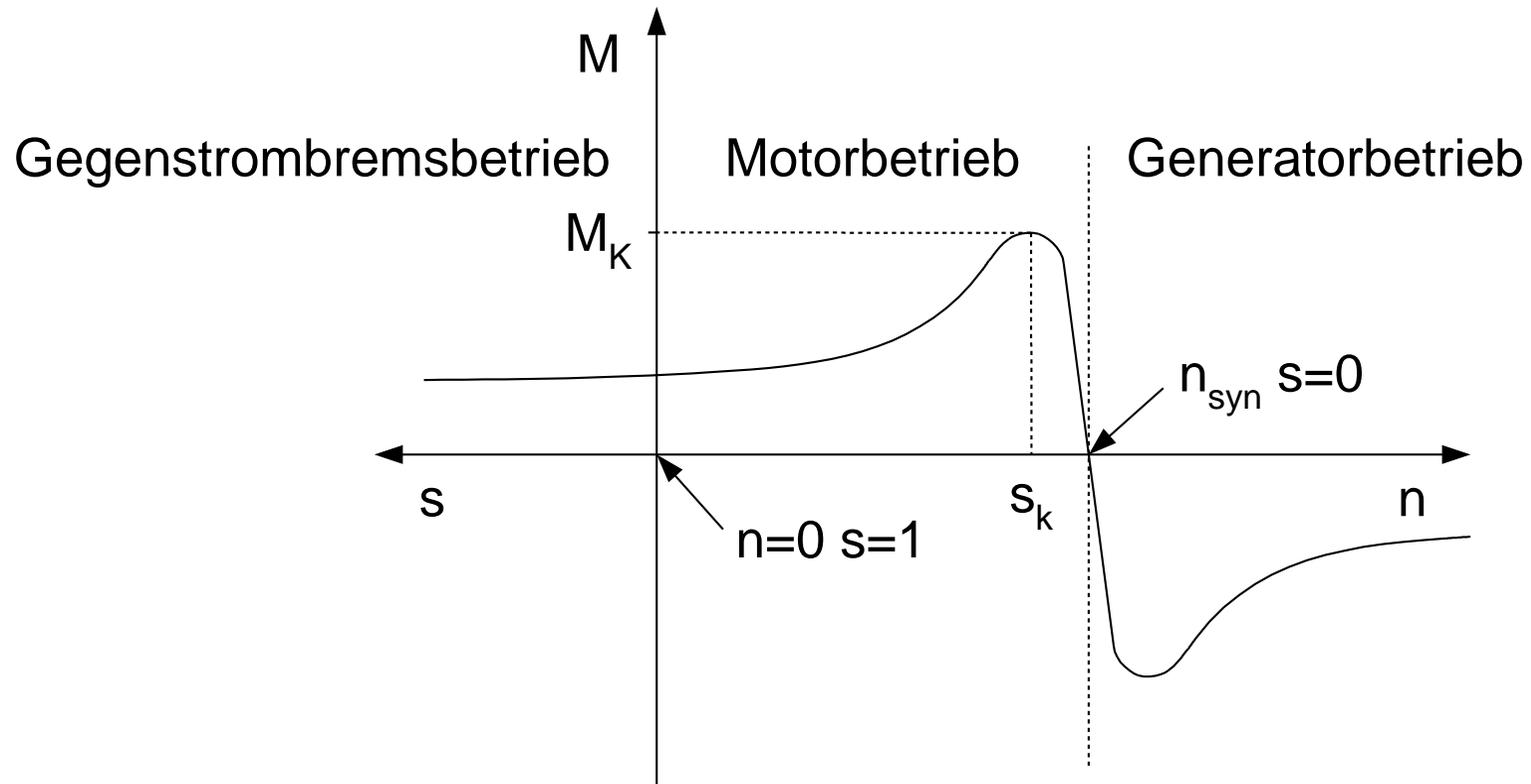
# Schlupf

- Bezieht man  $f_R$  auf die Frequenz des Ständerfelds  $f_S$ , erhält man den Schlupf  $s$ :

$$s = \frac{f_R}{f_S}$$

- Dieser kann auch durch die Drehzahl ausgedrückt werden:

$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} \quad \text{mit} \quad n_{syn} = \frac{f_S}{p}$$



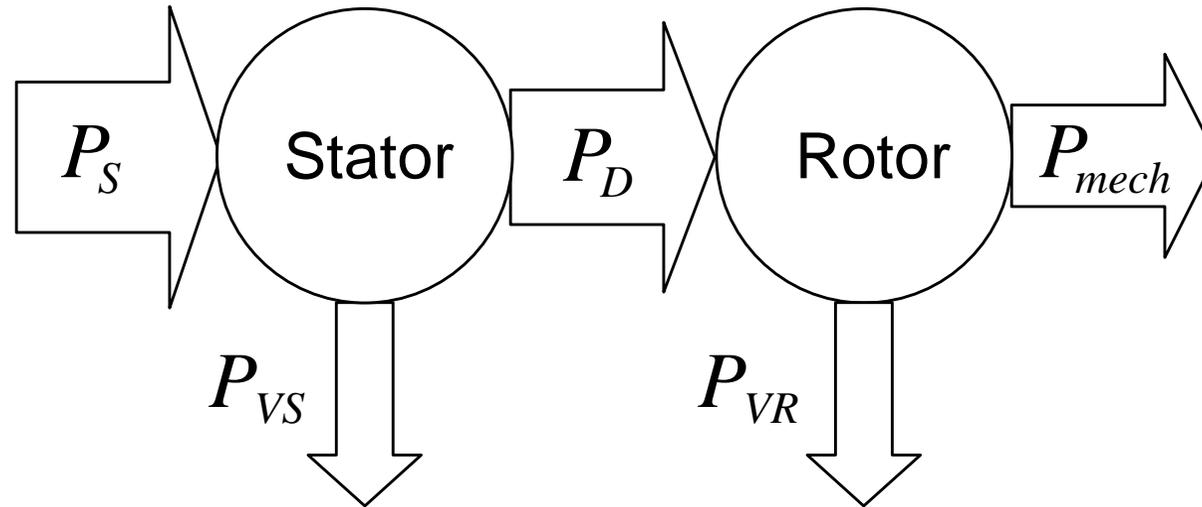
Typische Kennlinie einer Asynchronmaschine

# Kloss'sche Formel

- Der Verlauf der Kennlinie wird beschrieben durch die Kloss'sche Formel:

$$\frac{M_i}{M_k} = \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

# Leistungsaufteilung (Motor ohne Reibungsverluste)



$$P_S = 3U_S I_S \cos \varphi$$

$$P_D = P_S - P_{VS} = P_S - 3R_S I_S^2 = M_i \Omega_{syn}$$

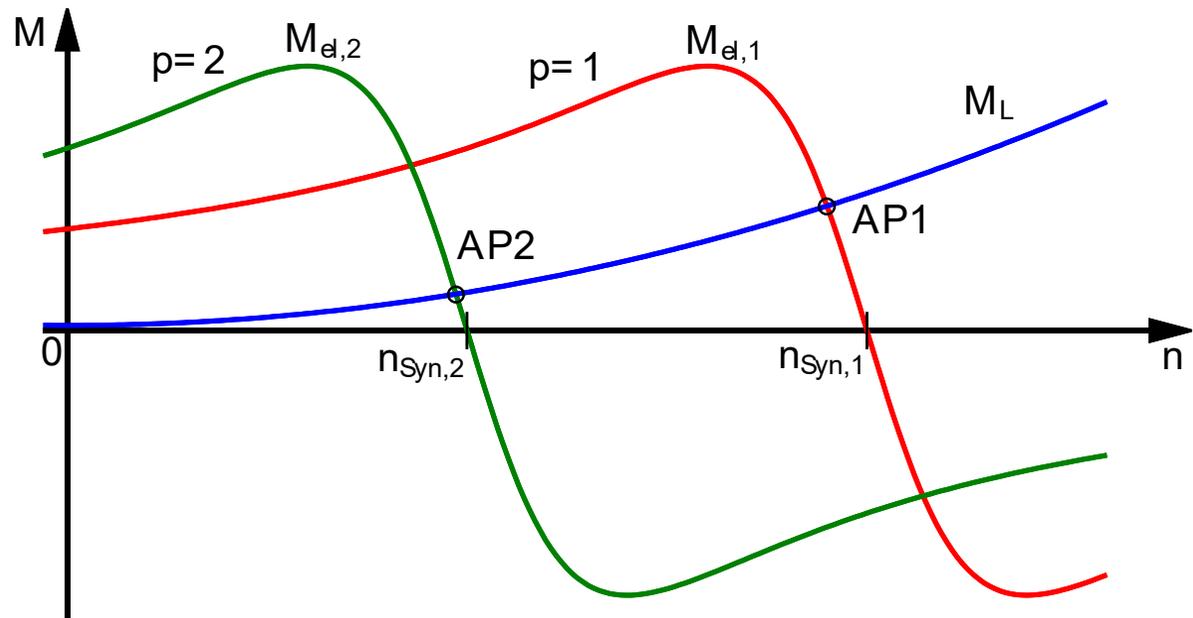
$$P_{VR} = sP_D = 3R'_R I_R'^2$$

$$P_{mech} = P_D - P_{VR} = (1 - s)P_D = M_i \Omega$$

# Drehzahlverstellung: Polumschaltung

## Polumschaltung:

- Verschieben des synchronen Punktes
- Grobe Abstufung
- Aufwändige Wicklung



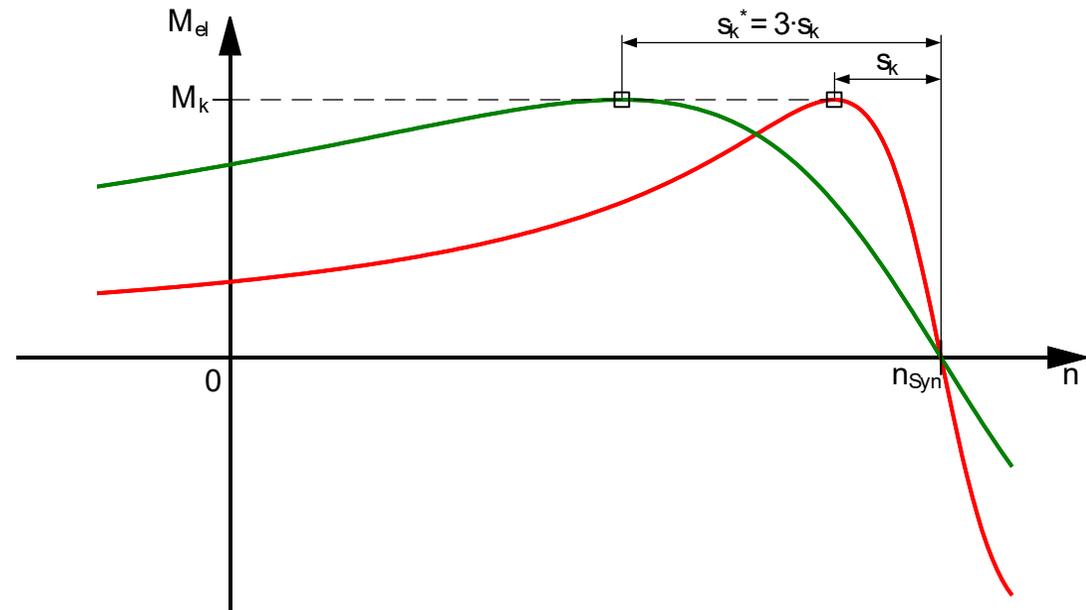
AP1: Arbeitspunkt mit  $p=1$   
 AP2: Arbeitspunkt mit  $p=2$   
 $n_{\text{Syn},1}$ : Synchrondrehzahl für  $p=1$   
 $n_{\text{Syn},2}$ : Synchrondrehzahl für  $p=2$

# Läuferwiderstand

## Horizontale Streckung der Kennlinie

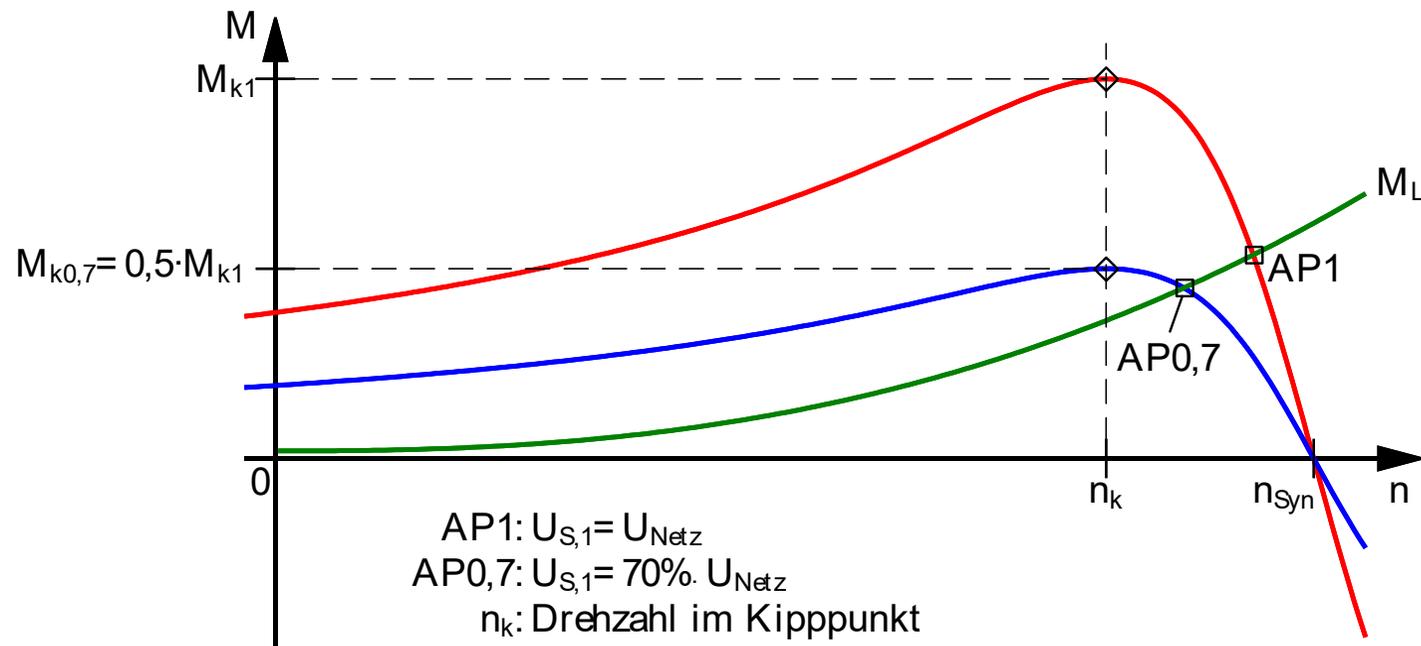
$$\frac{s^*}{s} = \frac{R_R + R_V}{R_R}$$

- + Feine Stufung möglich
- + Einfaches Verfahren
- Hohe Verluste
- Schleifringläufer erforderlich



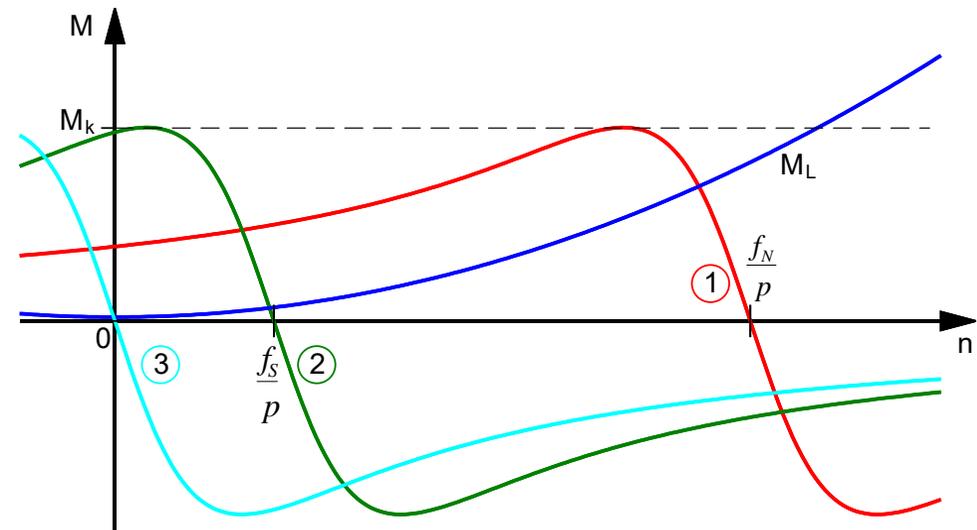
# Drehzahlverstellung

- Verringerung der Statorspannung
  - Drehmoment fällt mit dem Quadrat der Spannung



# Drehzahlverstellung

- Umrichterspeisung der Maschine (Spannungs-Frequenz-Steuerung)
- Drehspannungssystem in Amplitude und Frequenz steuerbar
- Verschieben der Kennlinie auf der Drehzahlachse
- + Geringe Verluste
- + stufenlos verstellbar
- hoher elektronischer Aufwand



- ① Kennlinie im Netzbetrieb ( $f_s = f_N$ )
- ② Kennlinie bei einstellbarer Frequenz  $f_s$
- ③ Kennlinie bei  $f_s = 0$

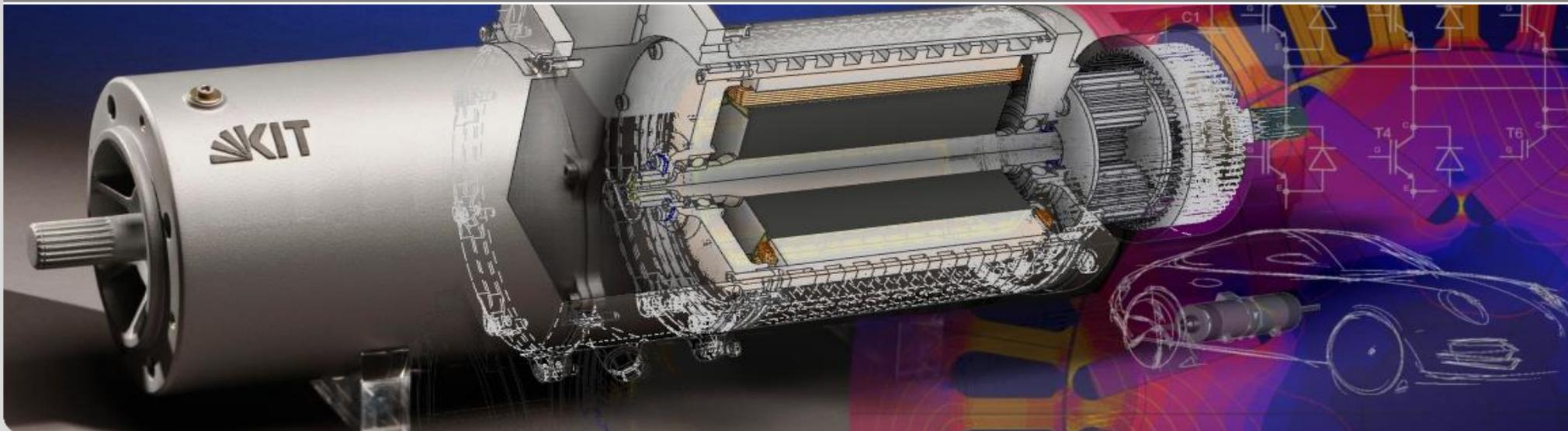
# Übung zur Vorlesung

## Elektrische Maschinen und Stromrichter

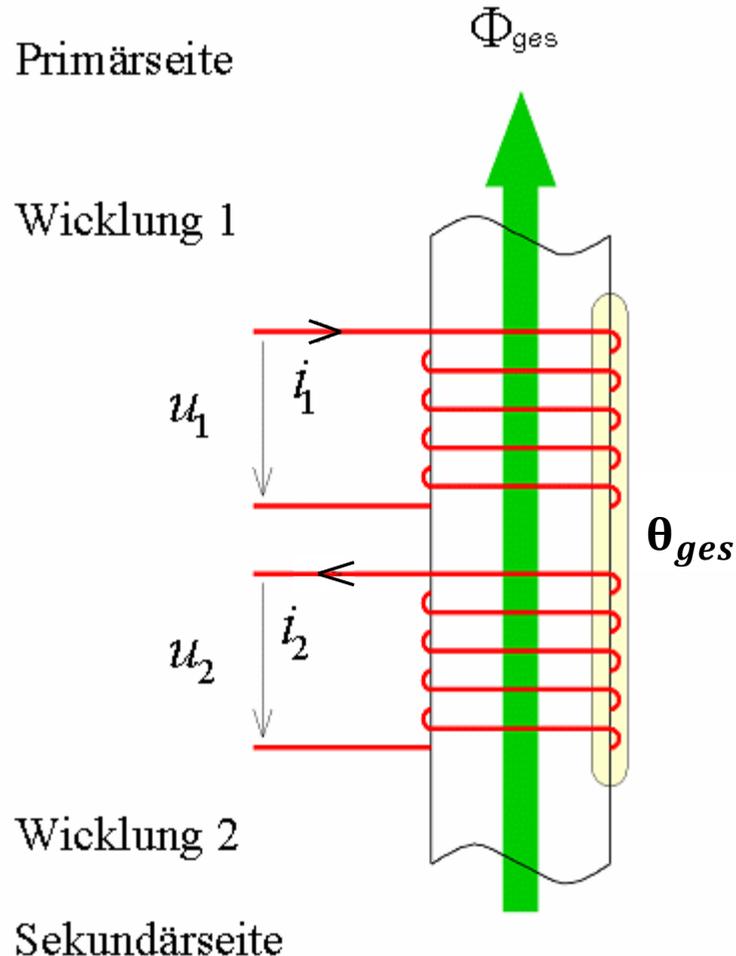
### 6. Übung – Transformator

Dennis Bräckle

Elektrotechnisches Institut – Elektrische Antriebe und Leistungselektronik



# Funktionsprinzip Transformator (Streuung vernachlässigt)



Strom in einer Wicklung erzeugt die Durchflutung:

$$\theta = w i$$

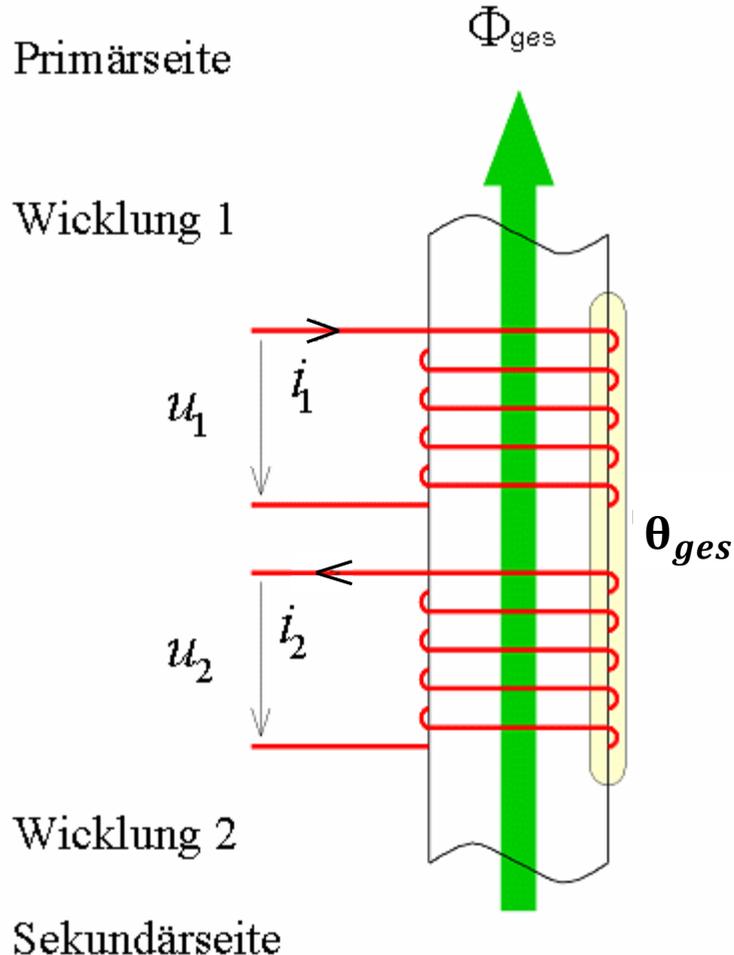
Magnetischer Fluss abhängig vom Kernmaterial:

$$\Phi = \Lambda w i$$

Alle Wicklungen erzeugen den Gesamtfluss:

$$\Phi_{ges} = \Lambda(\theta_1 - \theta_2) = \Lambda(w_1 i_1 - w_2 i_2)$$

# Funktionsprinzip Transformator (Streuung vernachlässigt)



Die Änderung der magnetischen Flussdichte induziert eine Spannung in der Wicklung:

$$u = w \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\Psi}{dt}$$

Spannungsübersetzung:

$$u_1 = w_1 \frac{d\Phi_{ges}}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{u_1}{u_2} = \frac{w_1}{w_2} = \ddot{u}$$

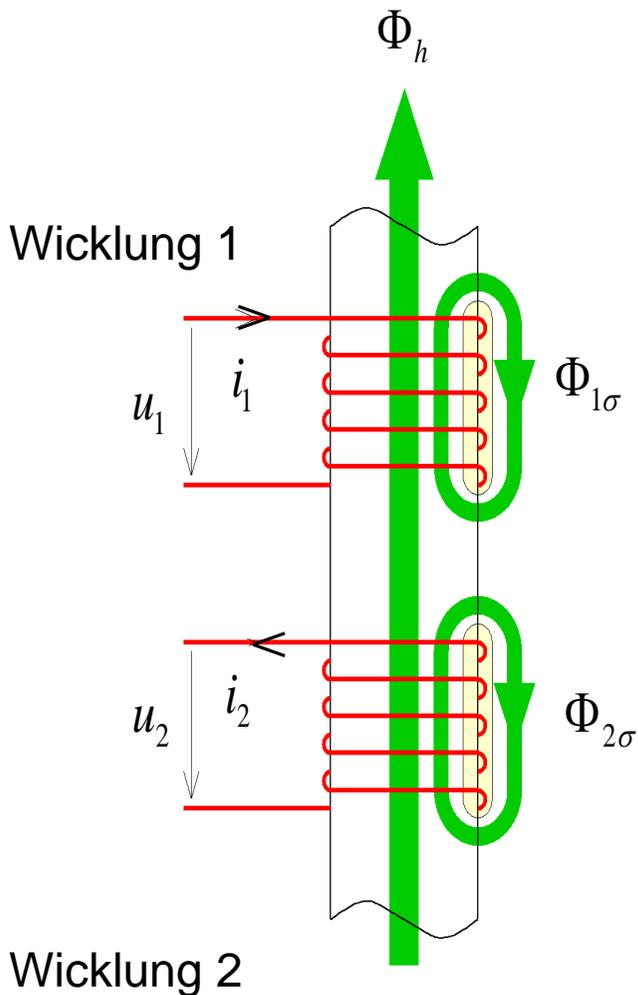
$$u_2 = w_2 \frac{d\Phi_{ges}}{dt}$$

Stromübersetzung:

$$S_1 = S_2 = U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

$$\Rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \ddot{u} \quad \Rightarrow \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{\ddot{u}}$$

# Streuinduktivität



- Der Fluss, der in Summe von den Durchflutungen beider Wicklungen erzeugt wird und beide Wicklungen durchtritt, ist der Hauptfluss
- Die Durchflutung jeder Wicklung erzeugt einen Streufluss, der die andere Wicklung nicht erreicht und nur in ihr selbst eine Spannung induziert

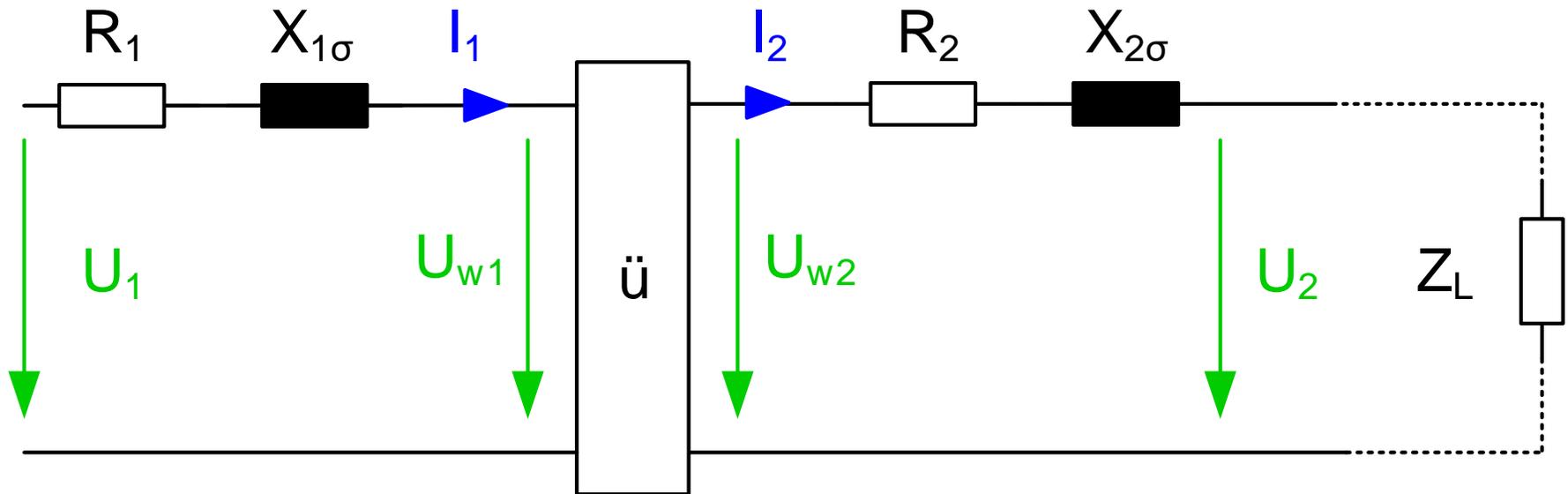
$$u_1 = w_1 \cdot \left( \frac{d\Phi_h}{dt} + \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt} \right) \quad u_2 = w_2 \cdot \left( \frac{d\Phi_h}{dt} + \frac{d\Phi_{2\sigma}}{dt} \right)$$

$$\Phi_h = \Lambda_h \cdot (w_1 i_1 - w_2 i_2)$$

$$\Phi_{1\sigma} = \Lambda_\sigma \cdot w_1 i_1$$

$$\Phi_{2\sigma} = -\Lambda_\sigma \cdot w_2 i_2$$

# Ersatzschaltbild



# Umgerechnete Größen

- Um das T-Ersatzschaltbild zeichnen zu können, müssen die Größen der Primär- oder Sekundärwicklung auf die jeweils andere Seite umgerechnet werden.
- Beispiel: Wicklungswiderstand der Sekundärseite  $R_2$  auf Primärseite umrechnen:
  - Die Verlustleistung, die an dem umgerechneten Widerstand abfällt, soll identisch sein:

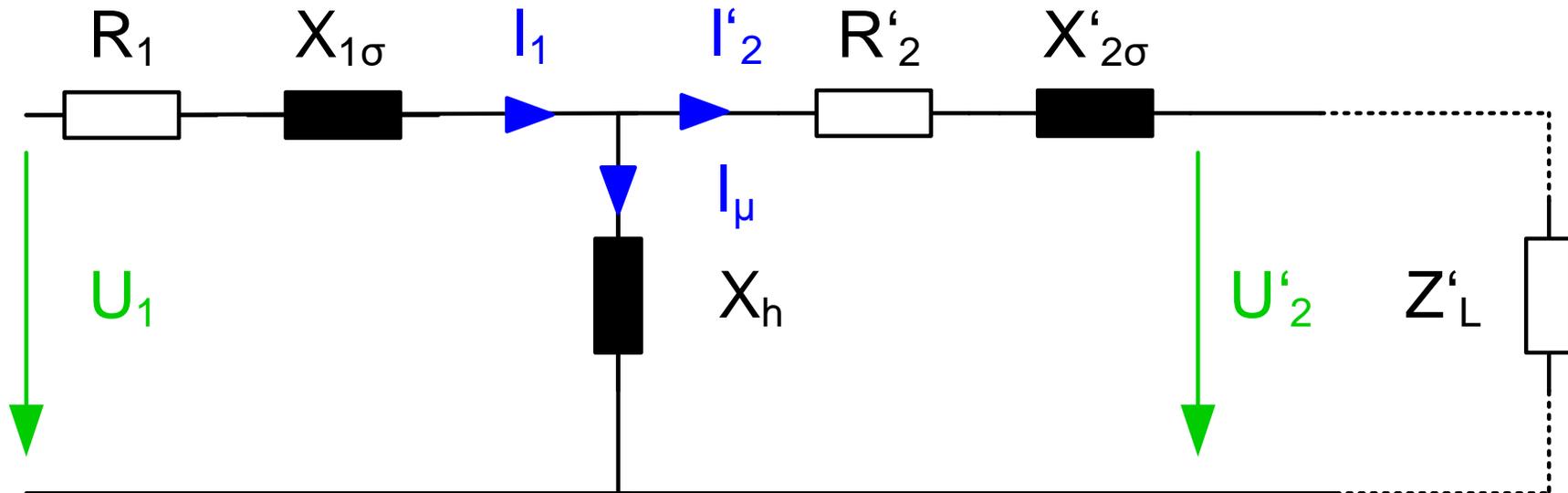
$$P_{R2} = R_2 \cdot I_2^2 = P'_{R2} = R'_2 \cdot I_2'^2$$

$$\frac{R_2}{R'_2} = \left( \frac{I_2'}{I_2} \right)^2 = \frac{1}{\ddot{u}^2} \quad \Rightarrow \quad R'_2 = \ddot{u}^2 \cdot R_2$$

Für die Streuinduktivität gilt analog:

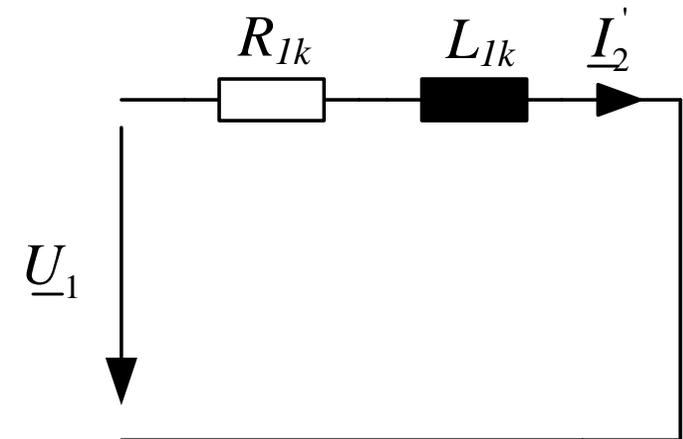
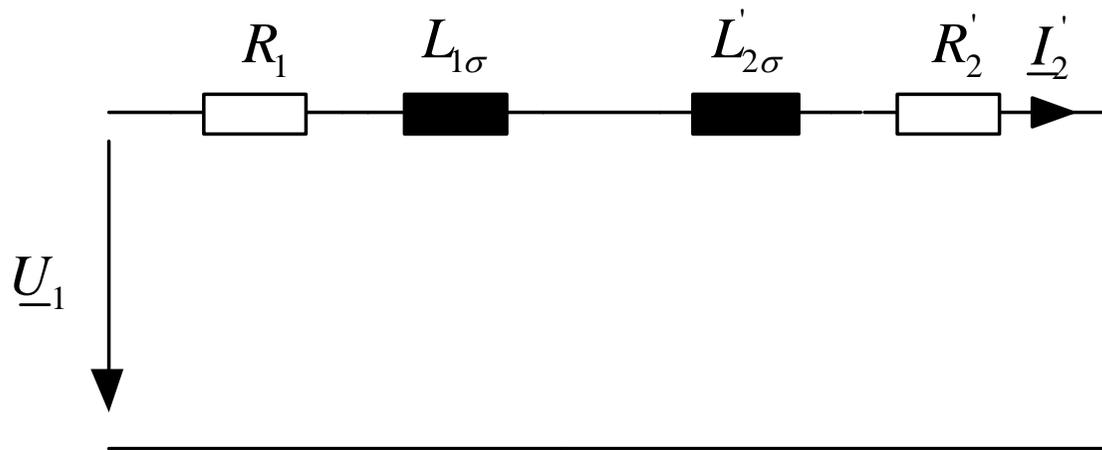
$$L'_{2\sigma} = \ddot{u}^2 \cdot L_{2\sigma}$$

# Ersatzschaltbild



# Kurzschlussersatzschaltbild

- Im Kurzschluss kann der Magnetisierungsstrom vernachlässigt werden.



Für große Transformatoren kann der Magnetisierungsstrom, wie beim Kurzschlussfall, auch für den Nennbetrieb vernachlässigt werden.

$$R_{1k} = R_1 + R'_2$$

$$L_{1k} = L_{1\sigma} + L'_{2\sigma}$$

# Relative Kurzschlussspannung

- Durch die Verwendung von bezogenen Größen kann das Betriebsverhalten des Transformators unabhängig von seiner Leistung dargestellt werden.

$$u_k = \frac{Z_{1k} \cdot I_{1N}}{U_{1N}} = \frac{Z_{2k} \cdot I_{2N}}{U_{2N}}$$

$$u_r = \frac{R_{1k} \cdot I_{1N}}{U_{1N}} = \frac{R_{2k} \cdot I_{2N}}{U_{2N}}$$

$$u_x = \frac{X_{1k} \cdot I_{1N}}{U_{1N}} = \frac{X_{2k} \cdot I_{2N}}{U_{2N}}$$

$$u_k = \sqrt{u_r^2 + u_x^2}$$

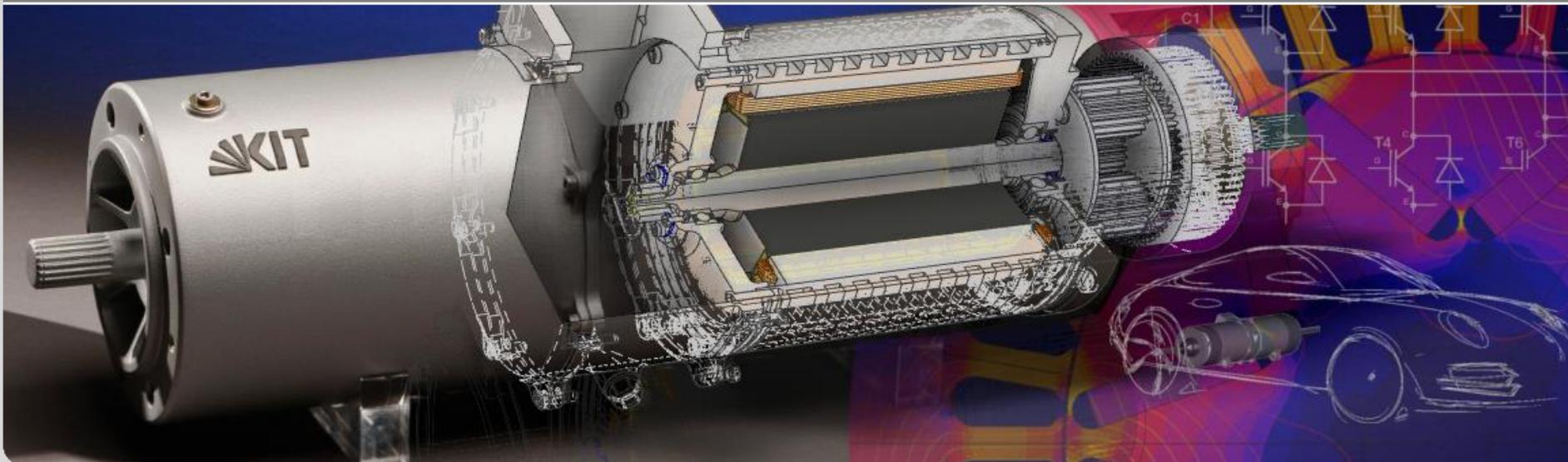
# Übung zur Vorlesung

## Elektrische Maschinen und Stromrichter

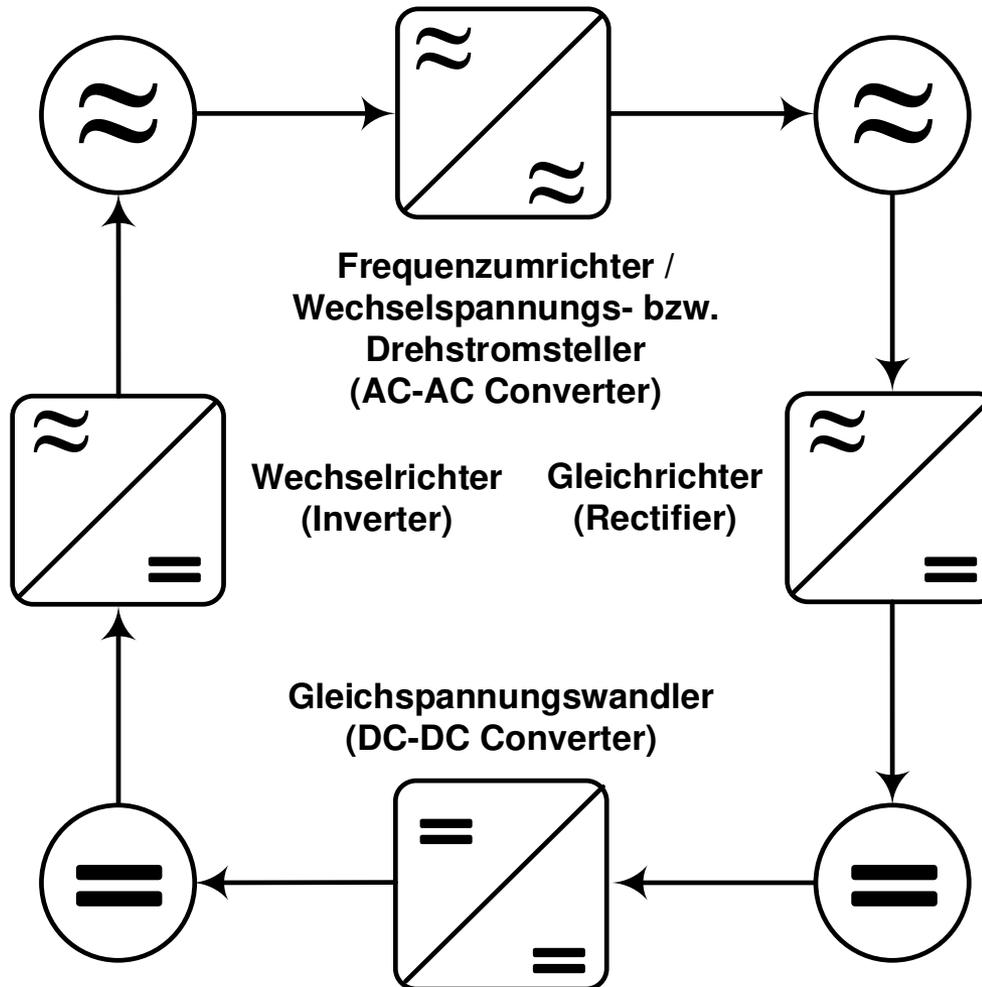
### 9. Übung – netzgeführte Stromrichter

Daniel Bernet

Elektrotechnisches Institut – Elektrische Antriebe und Leistungselektronik



- Verlustarme Umwandlung und Steuerung von elektrischer Energie (Amplitude, Frequenz) durch den Einsatz von Leistungshalbleiterschaltern
- Steuerbare Strom- oder Spannungsquelle





Industrie



Elektromobilität



Leistungselektronik



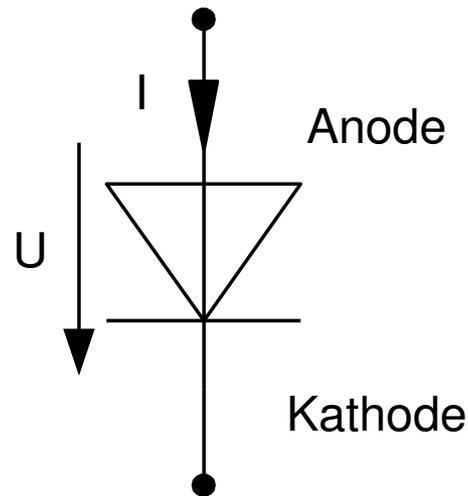
Erneuerbare  
Energien

und viele mehr...

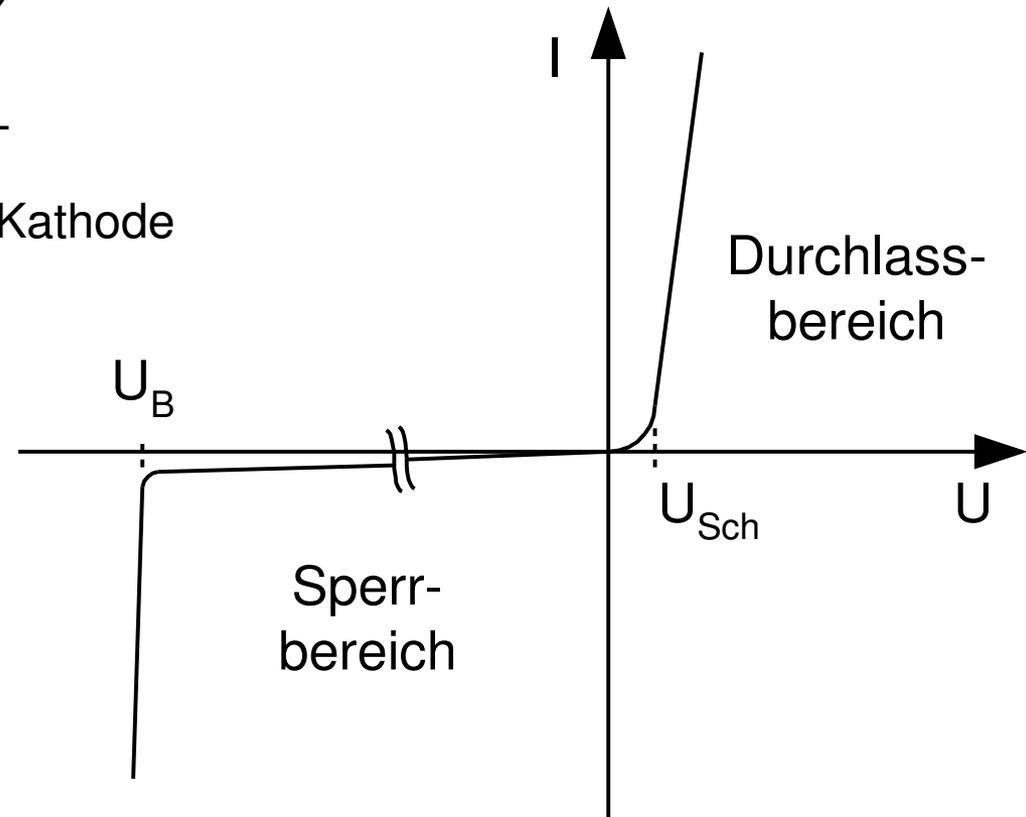


**33%-50% der Elektroenergie in  
Industrieländern wird durch  
Leistungselektronik umgeformt**

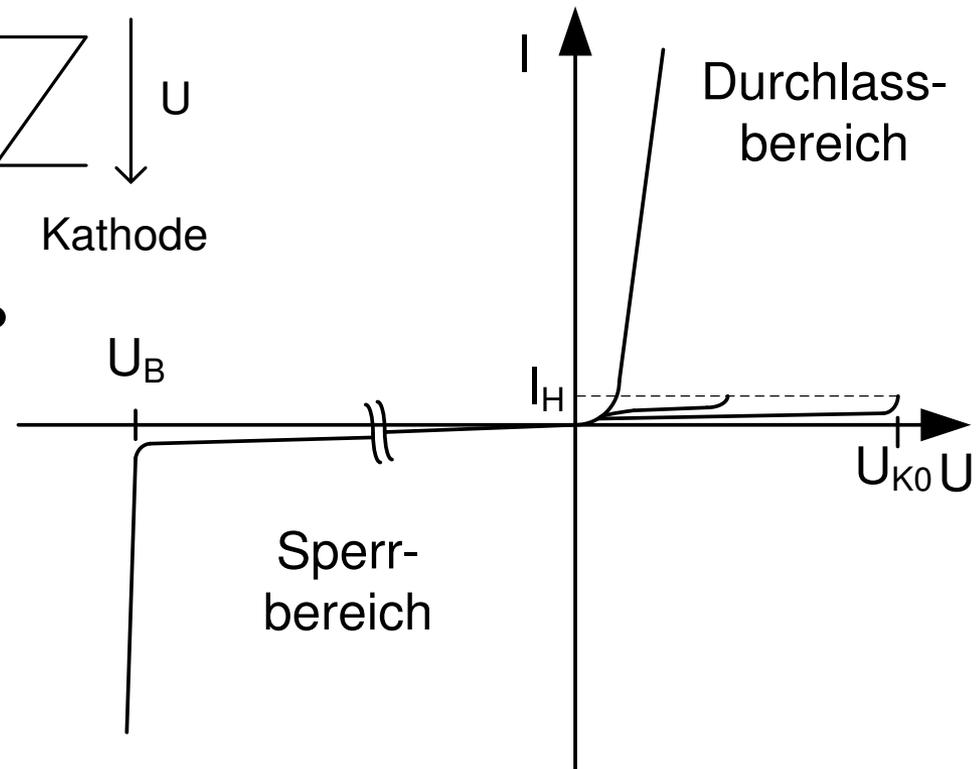
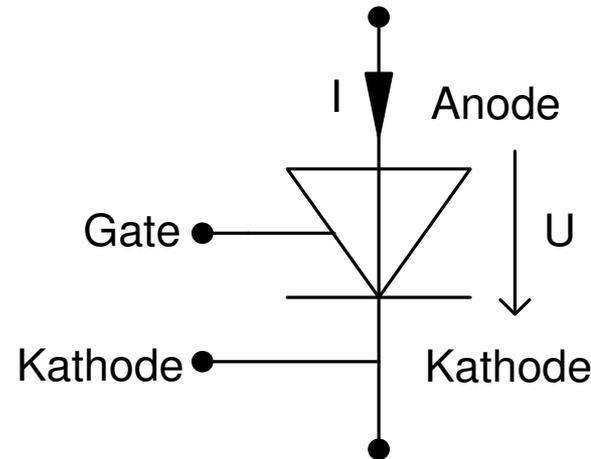
# Diode



- Nicht steuerbares Bauteil:
  - Wird leitend, wenn:  $U > 0V$
  - Wird sperrend, wenn:  $I < 0A$

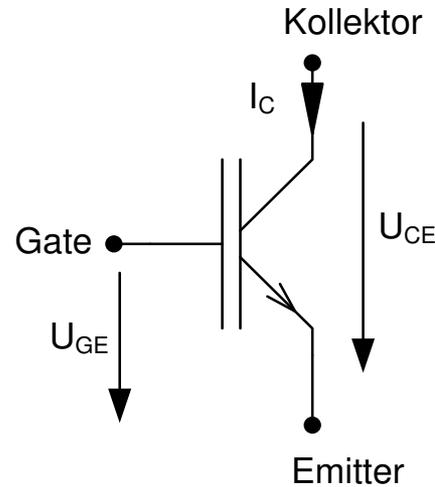


# Thyristor

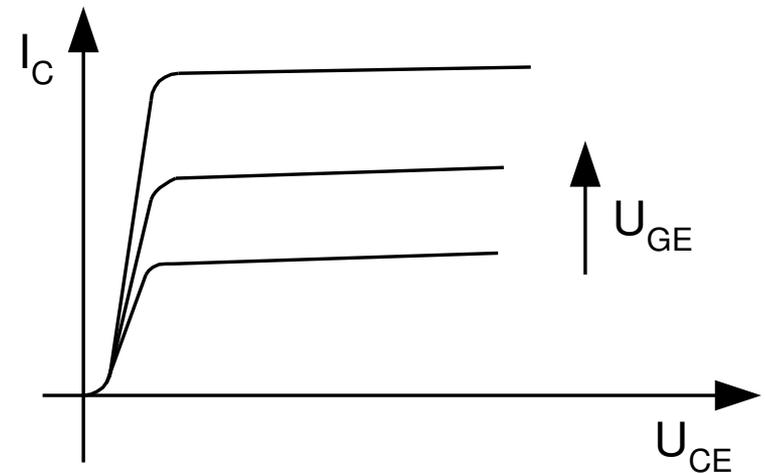


- Nur einschaltbares Bauteil:
  - Wird leitend, wenn:
    - $U > 0V$  und **Zündimpuls** anliegt
  - Wird sperrend, wenn:  $I < 0A$

# Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

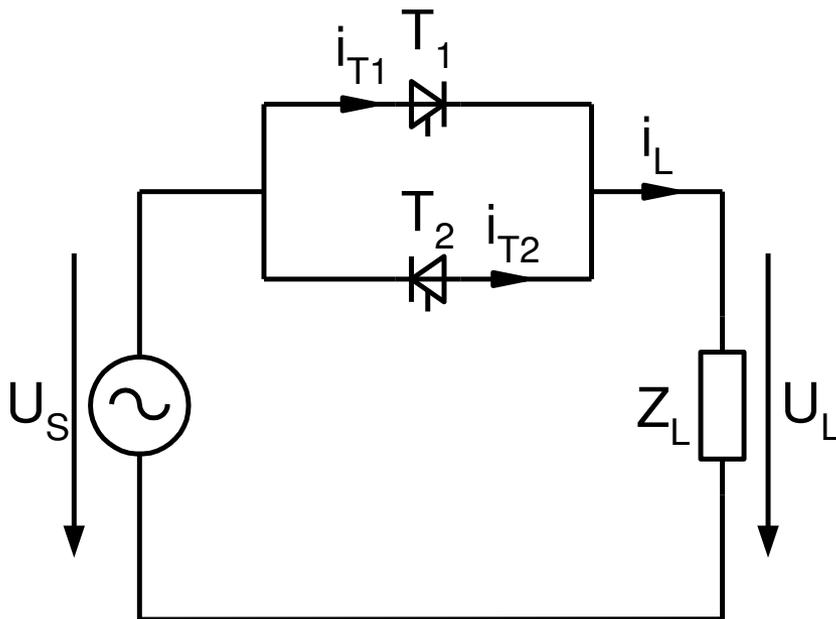


- Steuerbares Bauteil:
  - Durch entsprechende Signale am Steuereingang des Bauteils kann es ein- und ausgeschaltet werden



# Wechselstromsteller

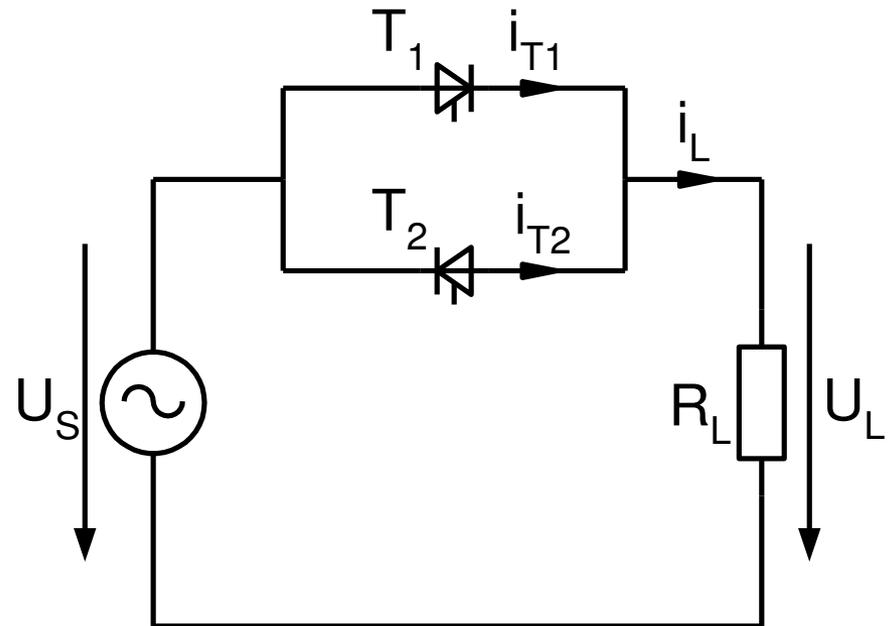
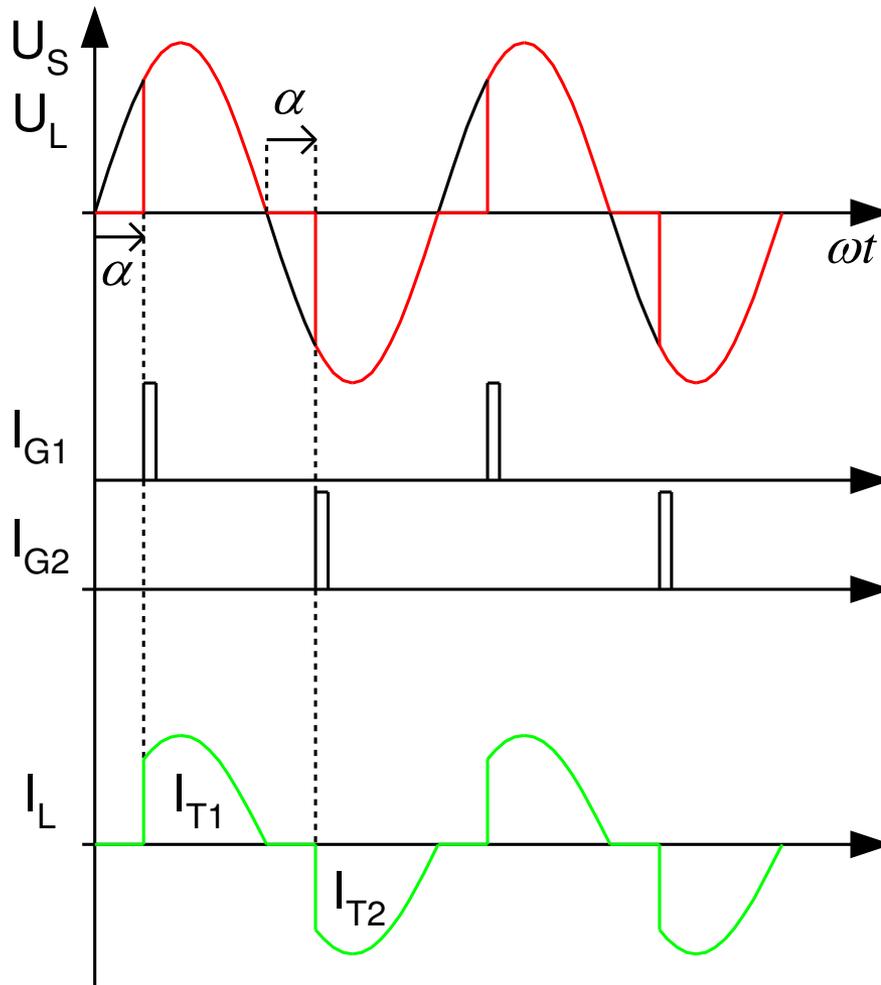
- Funktion: Verkleinern der Grundschiwingung einer Wechselspannung
- Anwendungen: z.B. Dimmer (Helligkeit), Bohrmaschine (Drehzahl), Elektroheizung (Wärme)



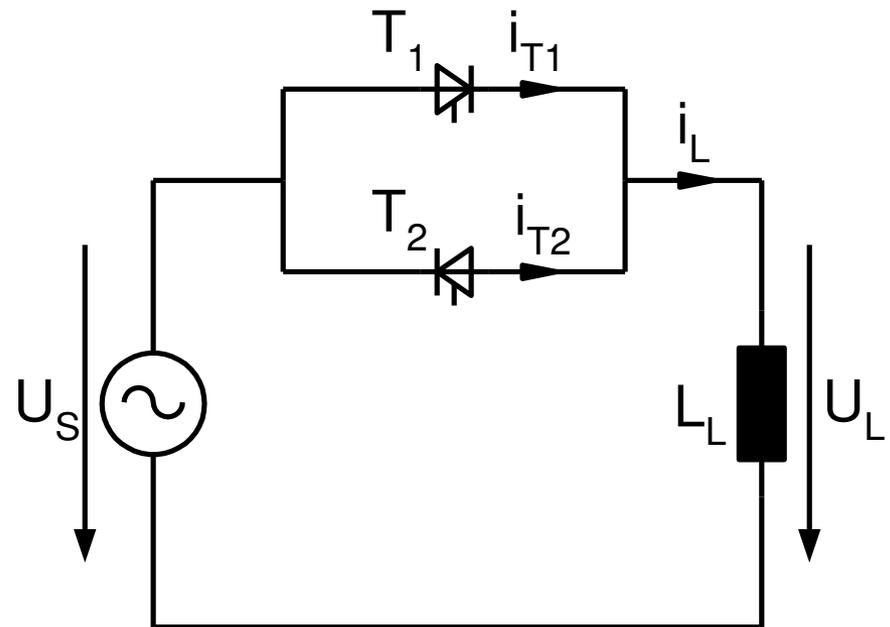
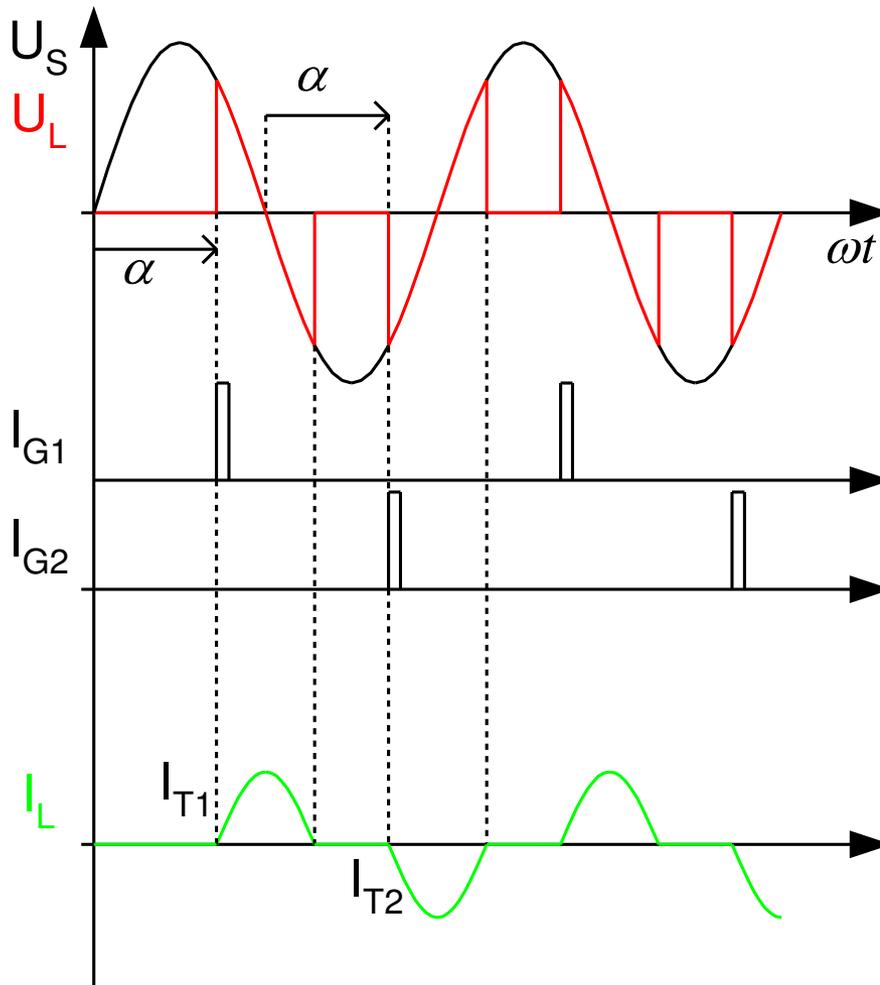
## Funktionsprinzip:

- Verzögertes Einschalten der Thyristoren  
→ Effektivwert der Ausgangsspannung beeinflussen
- Beschreibung der Verzögerung durch den Steuerwinkel  $\alpha$
- Ausgangsspannung einstellbar  $0V \dots U_S$
- der erforderliche Steuerwinkel ist abhängig von der Belastung

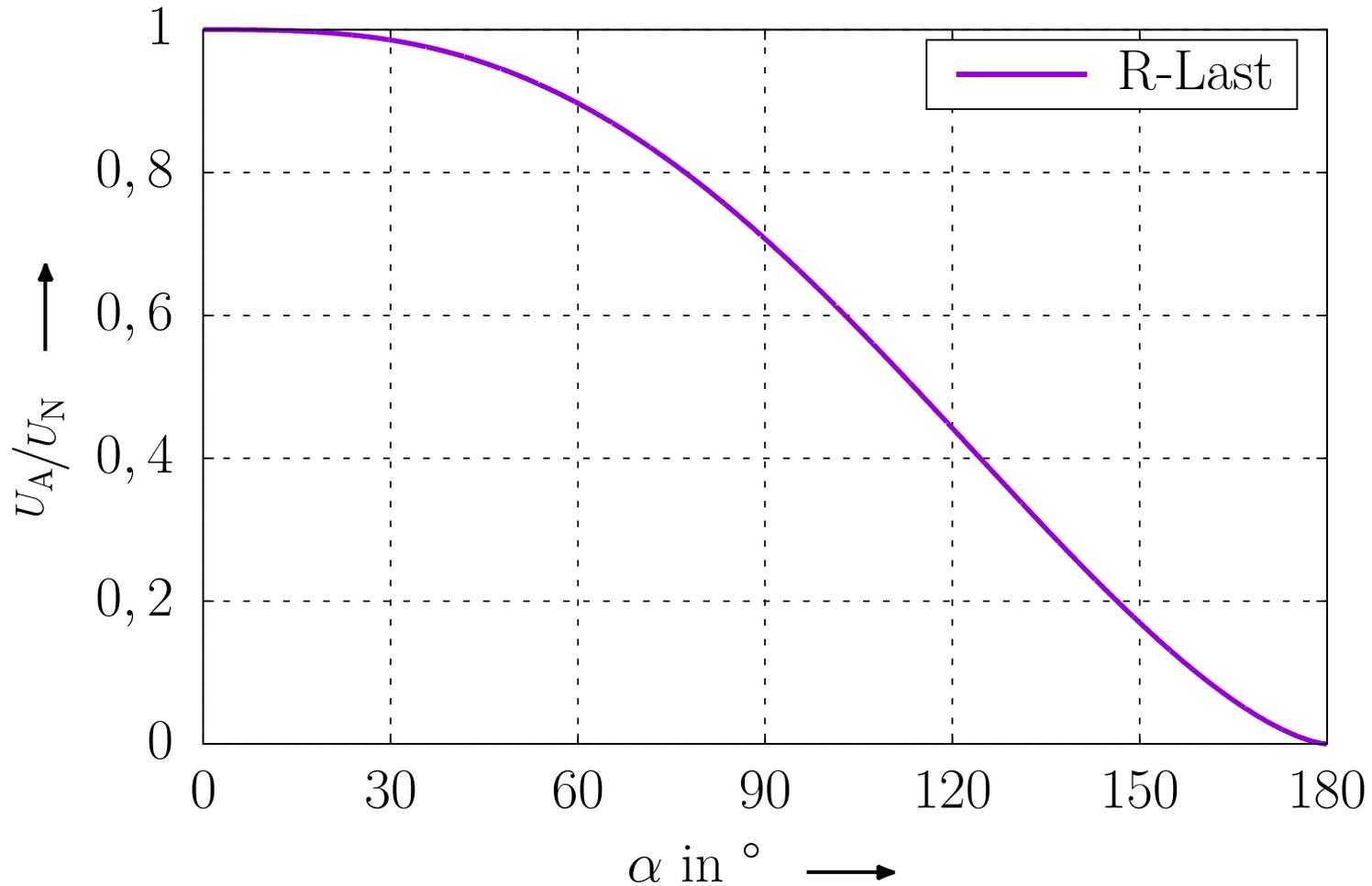
# Wechselstromsteller an ohmscher Last



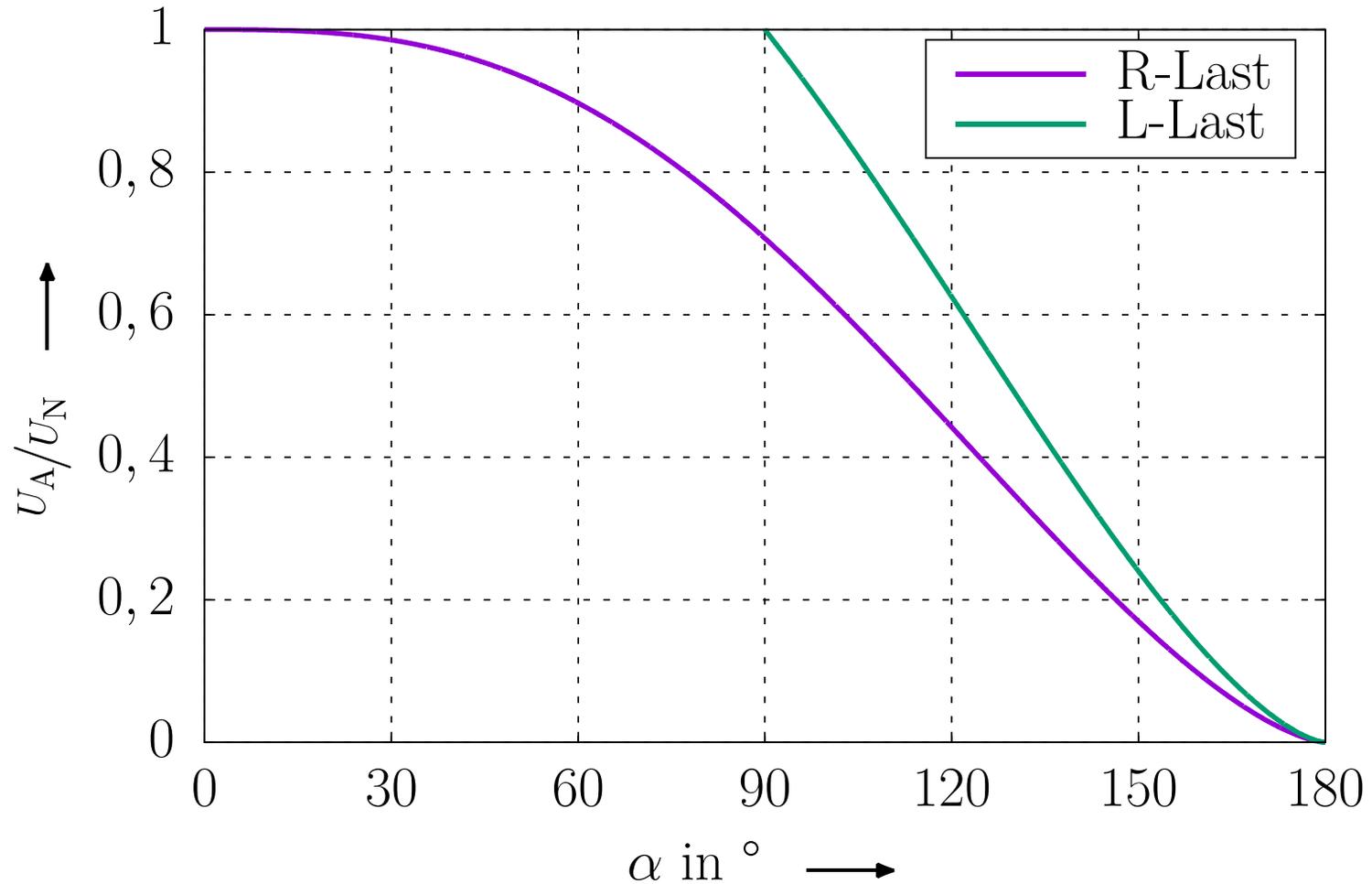
# Wechselstromsteller an induktiver Last



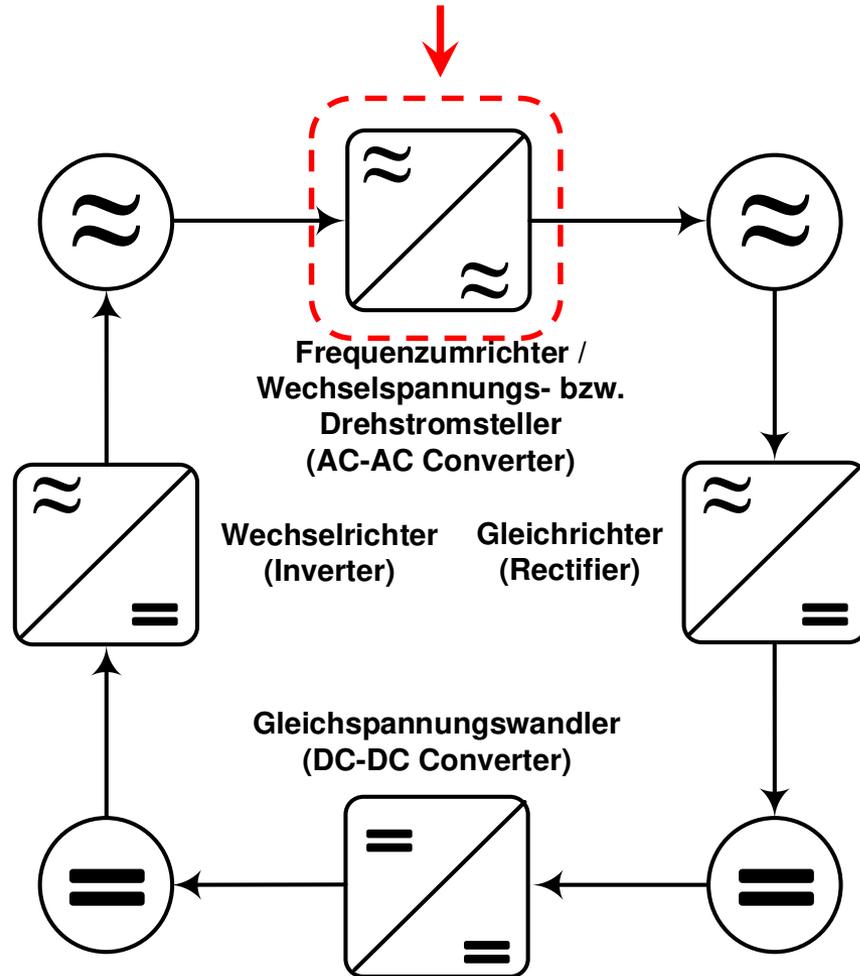
# Effektivspannung des Wechselstromstellers



# Effektivspannung des Wechselstromstellers



# Wechselstromsteller



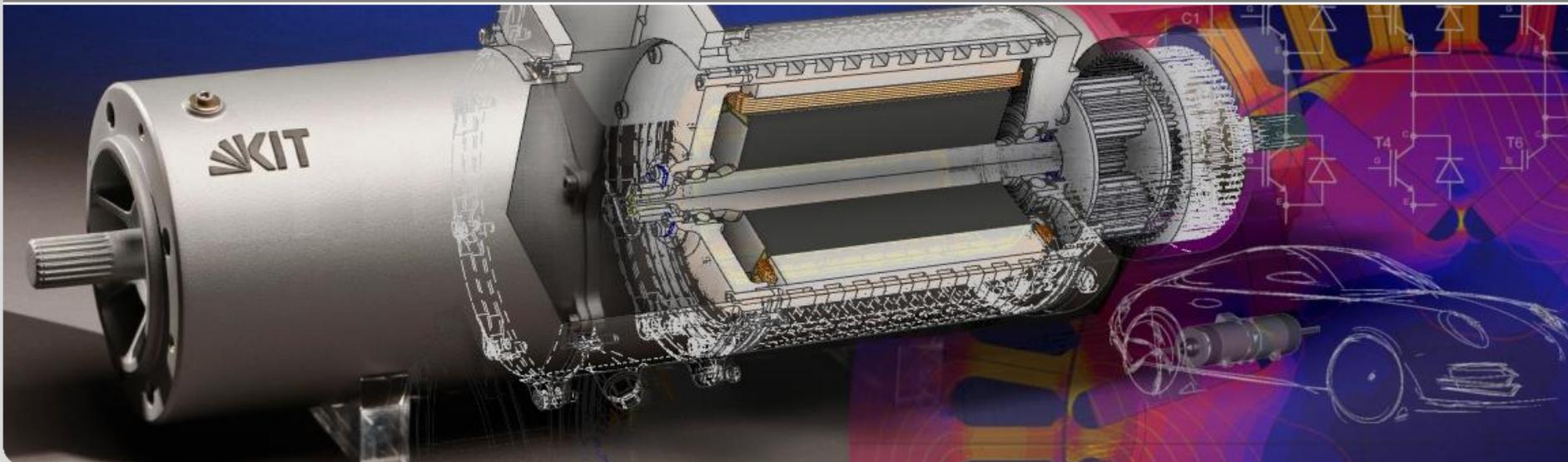
# Übung zur Vorlesung

## Elektrische Maschinen und Stromrichter

### 9. Übung – netzgeführte Stromrichter

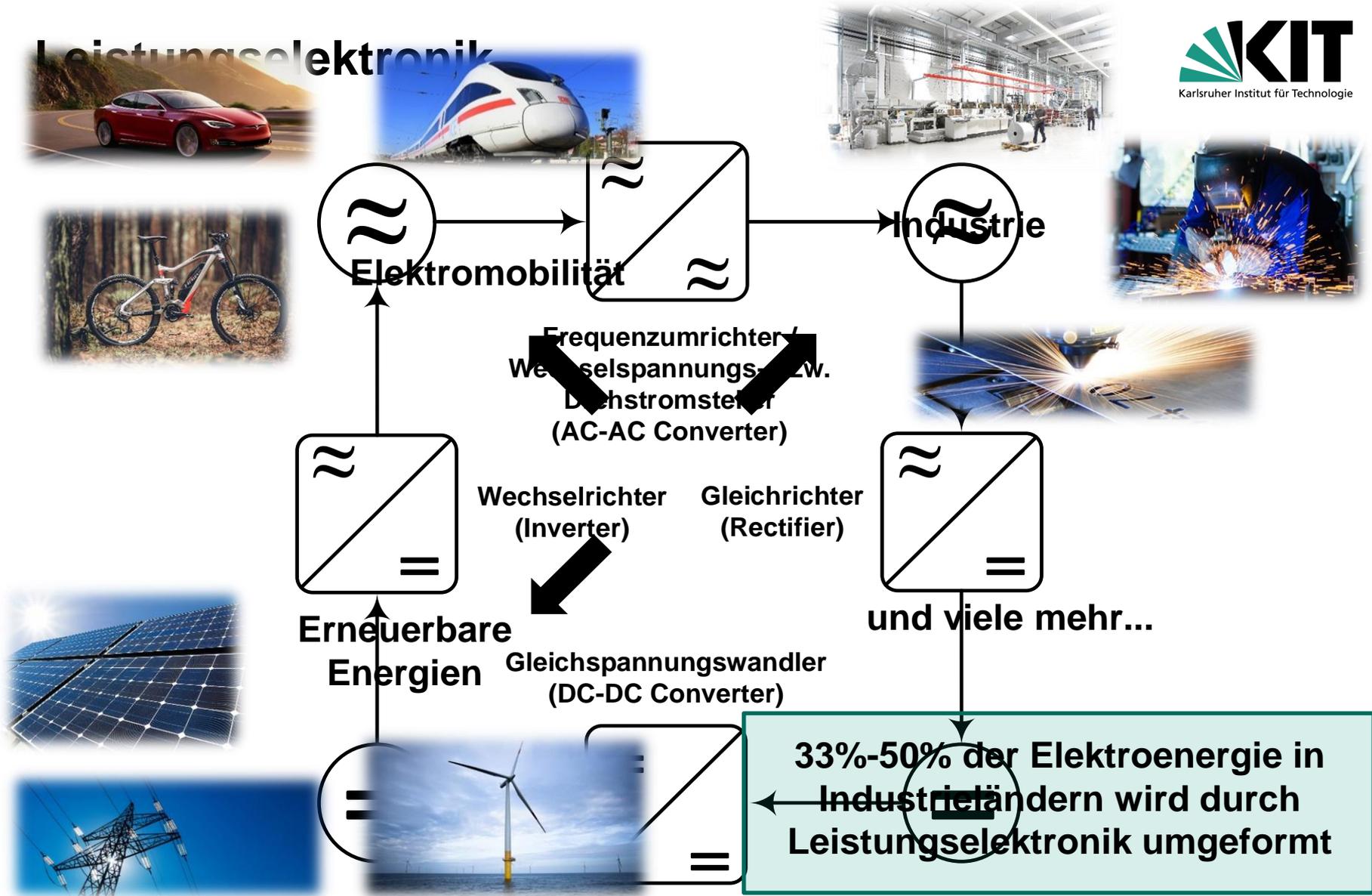
Daniel Bernet

Elektrotechnisches Institut – Elektrische Antriebe und Leistungselektronik



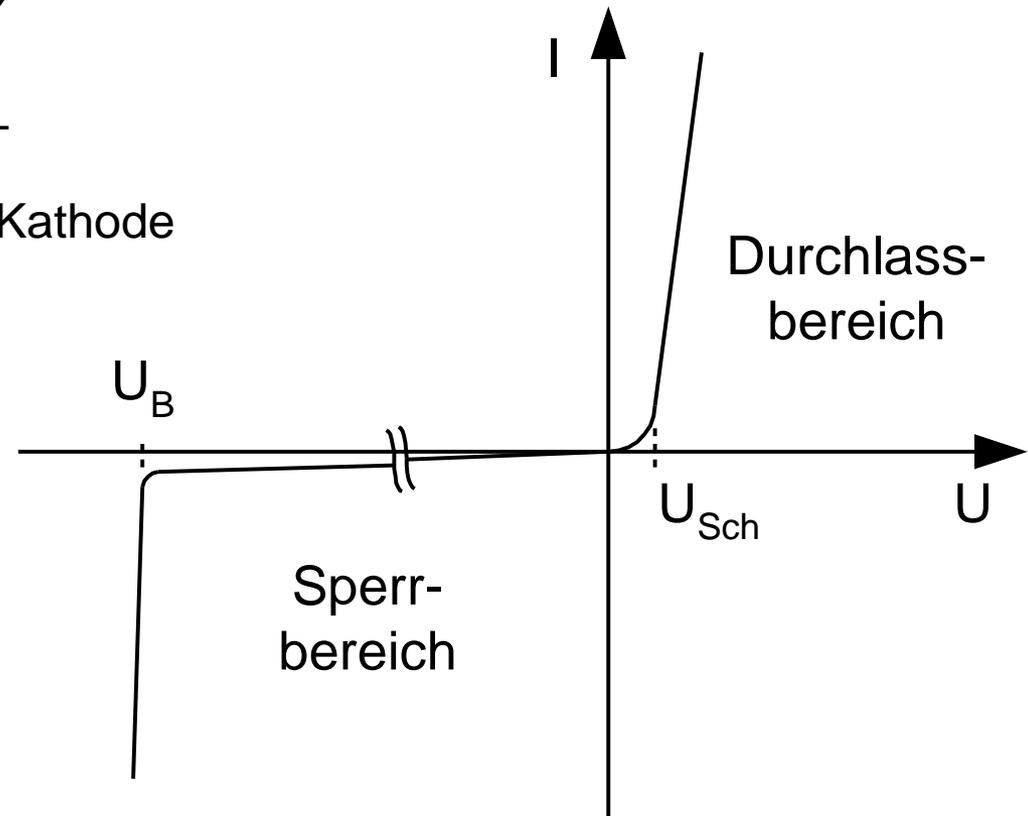
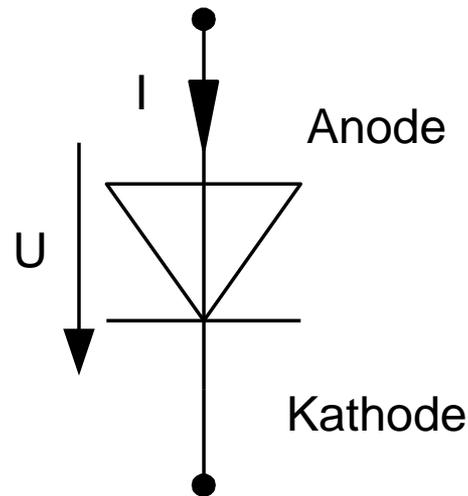
- Verlustarme **Umwandlung** und **Steuerung** von elektrischer **Energie** (Amplitude, Frequenz) durch den Einsatz von **Leistungshalbleitern**
- **Steuerbare** Strom- oder Spannungs**quelle**

# Leistungselektronik



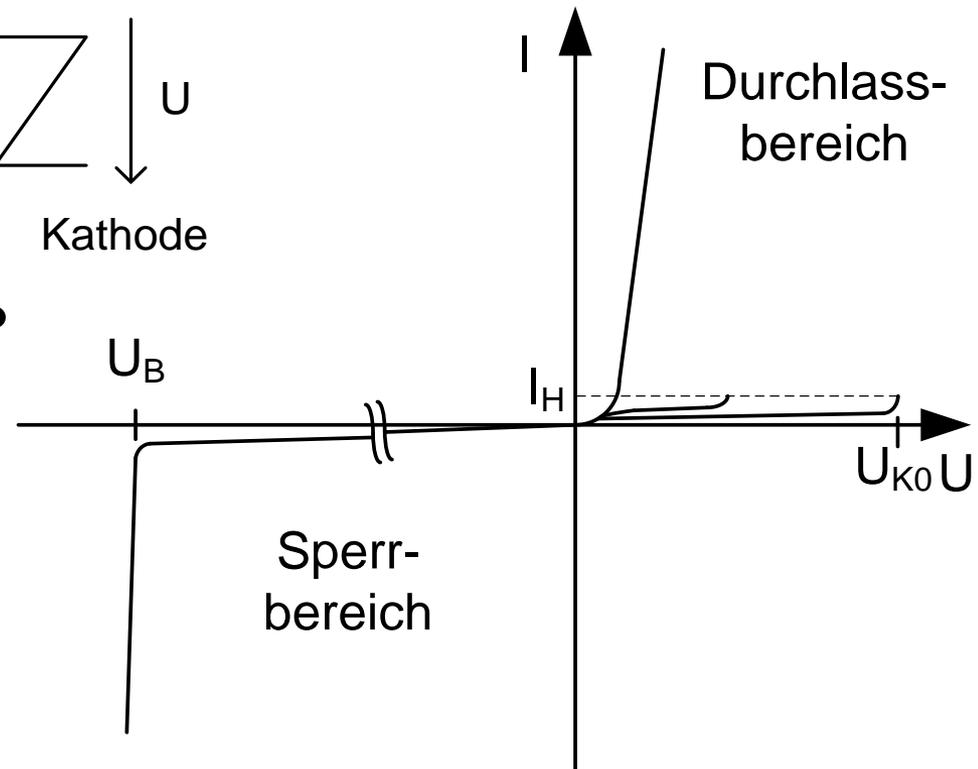
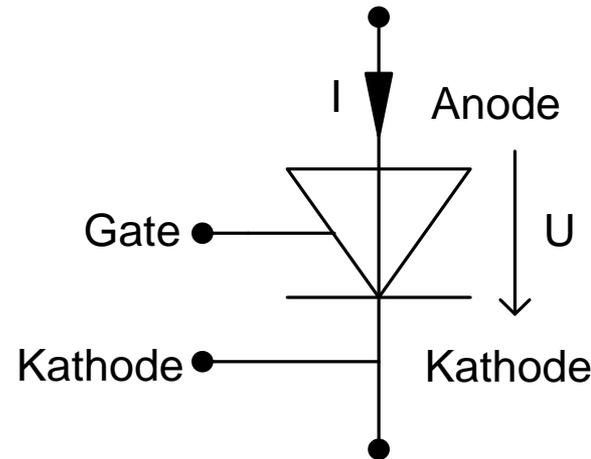
**33%-50% der Elektroenergie in Industrieländern wird durch Leistungselektronik umgeformt**

# Diode



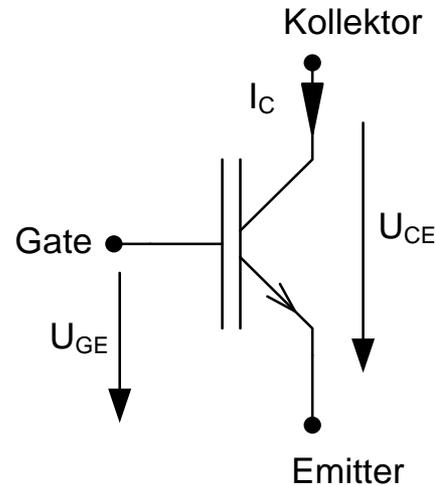
- Nicht steuerbares Bauteil:
  - Wird leitend, wenn:  $U > 0V$
  - Wird sperrend, wenn:  $I < 0A$

# Thyristor

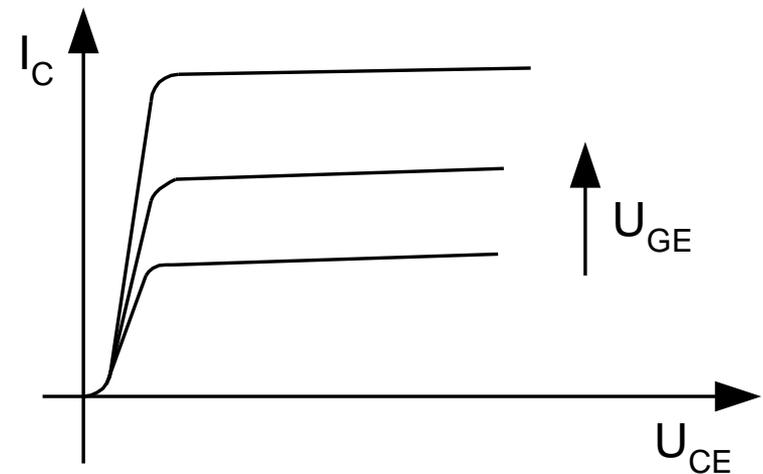


- Nur einschaltbares Bauteil:
  - Wird leitend, wenn:
    - $U > 0V$  und **Zündimpuls** anliegt
  - Wird sperrend, wenn:  $I < 0A$

# Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

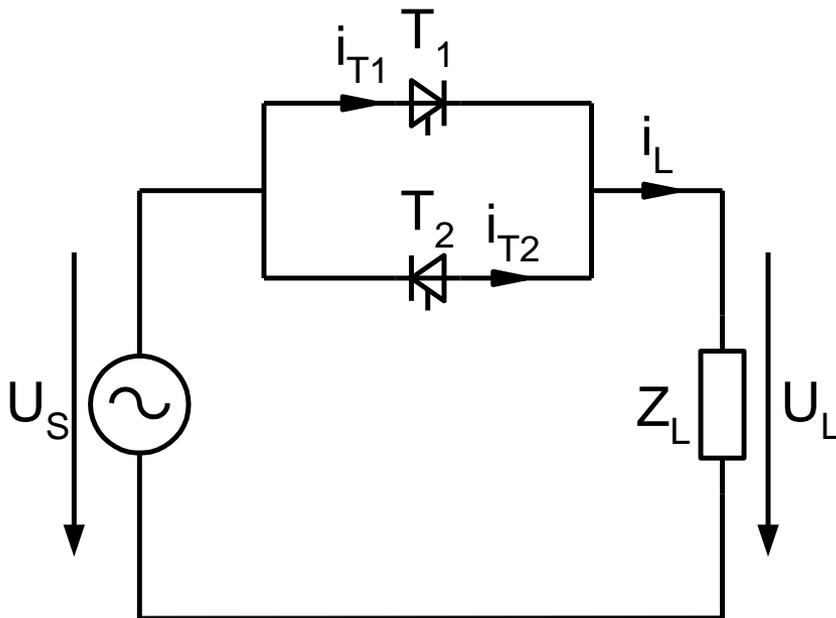


- Steuerbares Bauteil:
  - Durch entsprechende Signale am Steuereingang des Bauteils kann es ein- und ausgeschaltet werden



# Wechselstromsteller

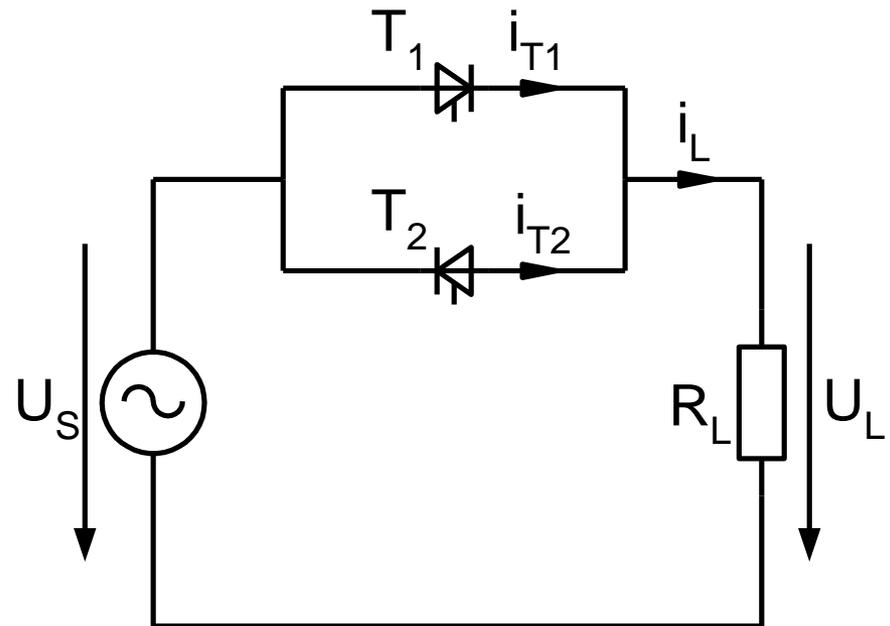
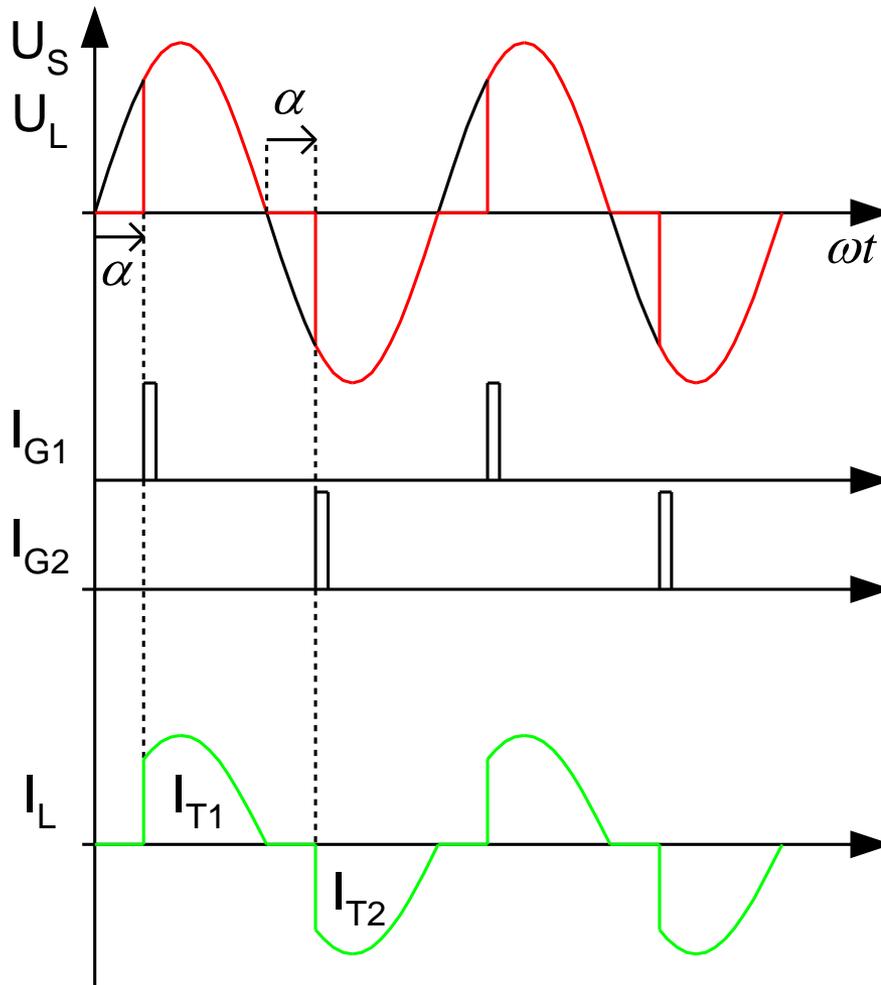
- Funktion: Verkleinern der Grundschiwingung einer Wechselspannung
- Anwendungen: z.B. Dimmer (Helligkeit), Bohrmaschine (Drehzahl), Elektroheizung (Wärme)



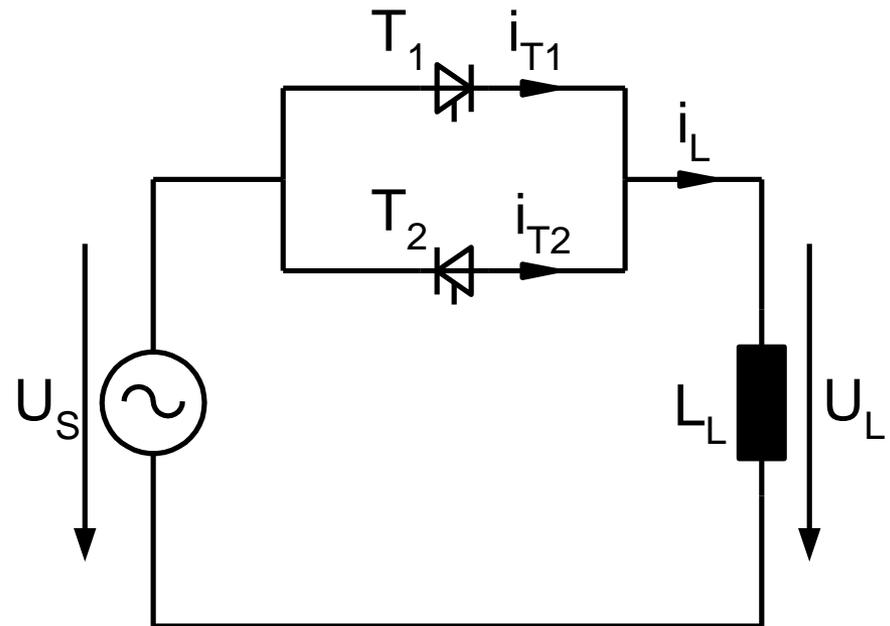
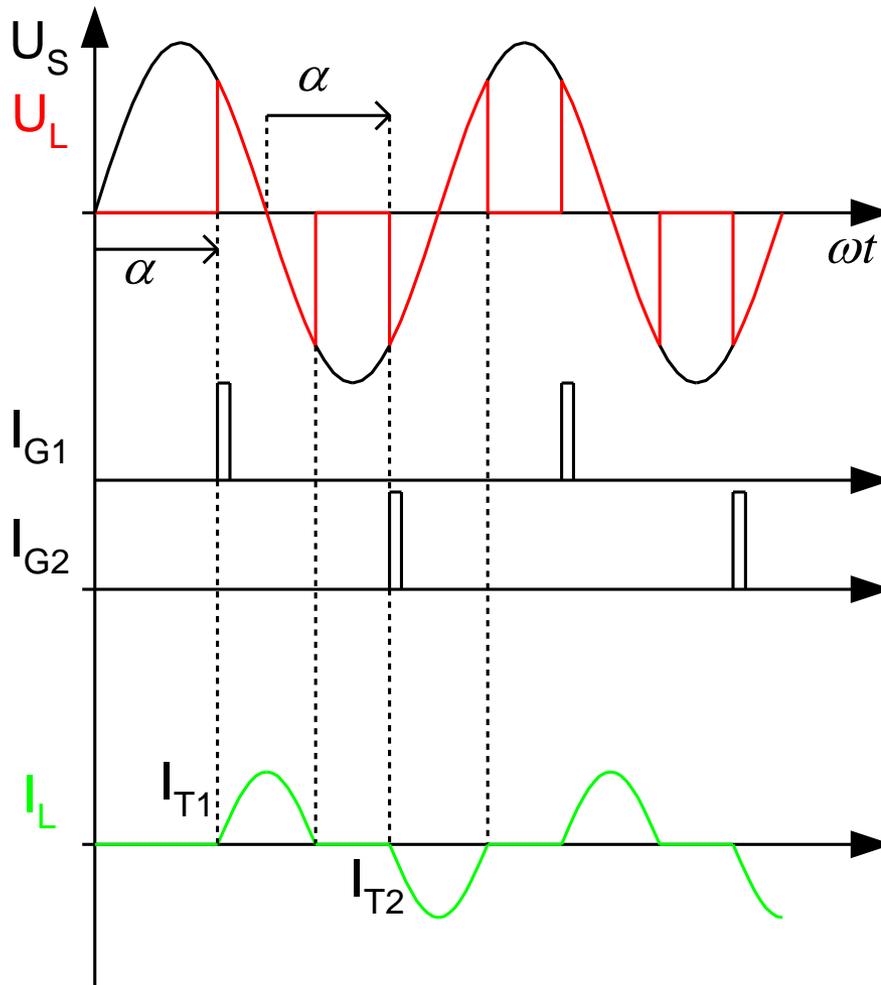
## Funktionsprinzip:

- Verzögertes Einschalten der Thyristoren  
→ Effektivwert der Ausgangsspannung beeinflussen
- Beschreibung der Verzögerung durch den Steuerwinkel  $\alpha$
- Ausgangsspannung einstellbar  $0V \dots U_S$
- der erforderliche Steuerwinkel ist abhängig von der Belastung

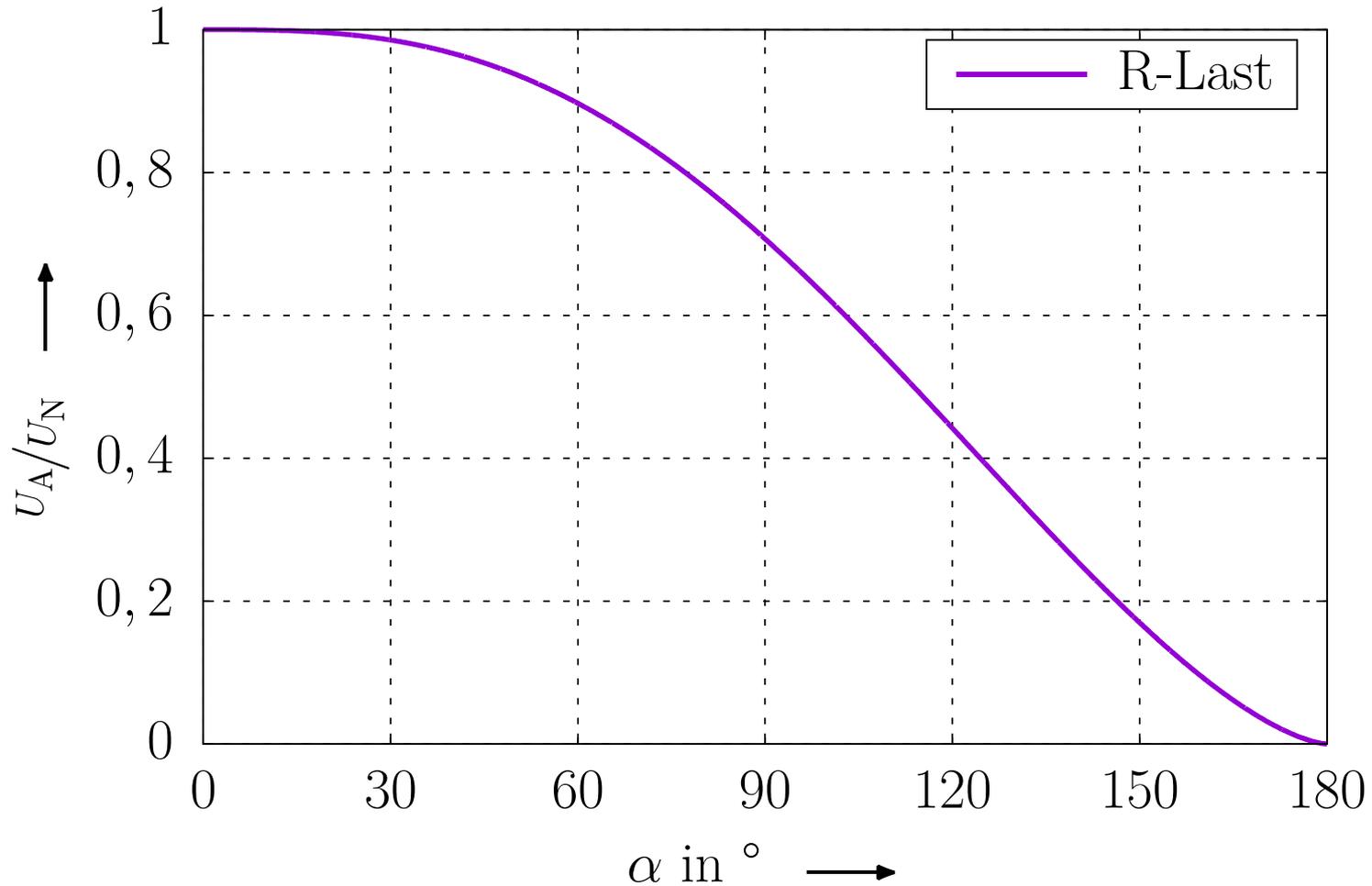
# Wechselstromsteller an ohmscher Last



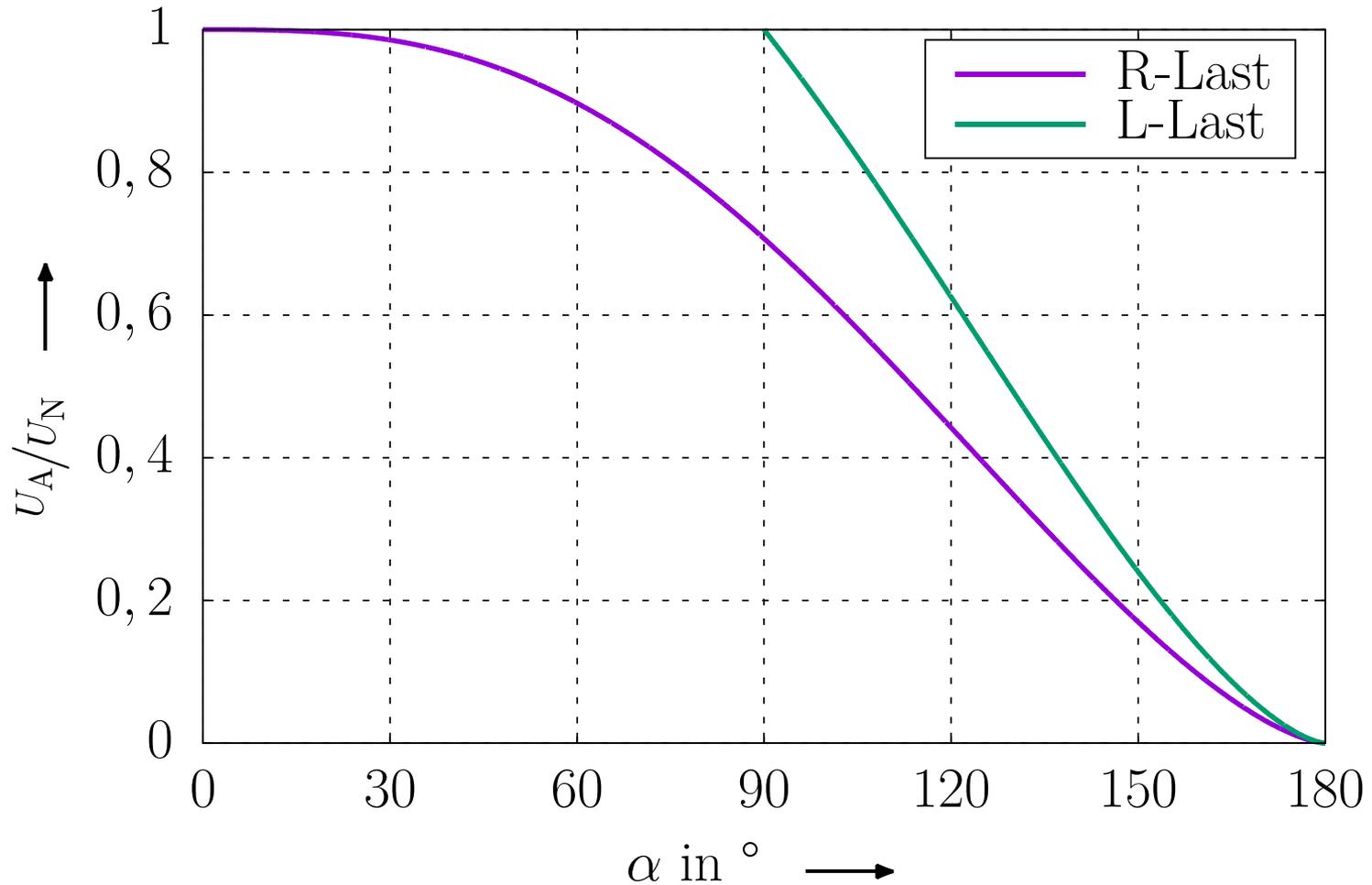
# Wechselstromsteller an induktiver Last



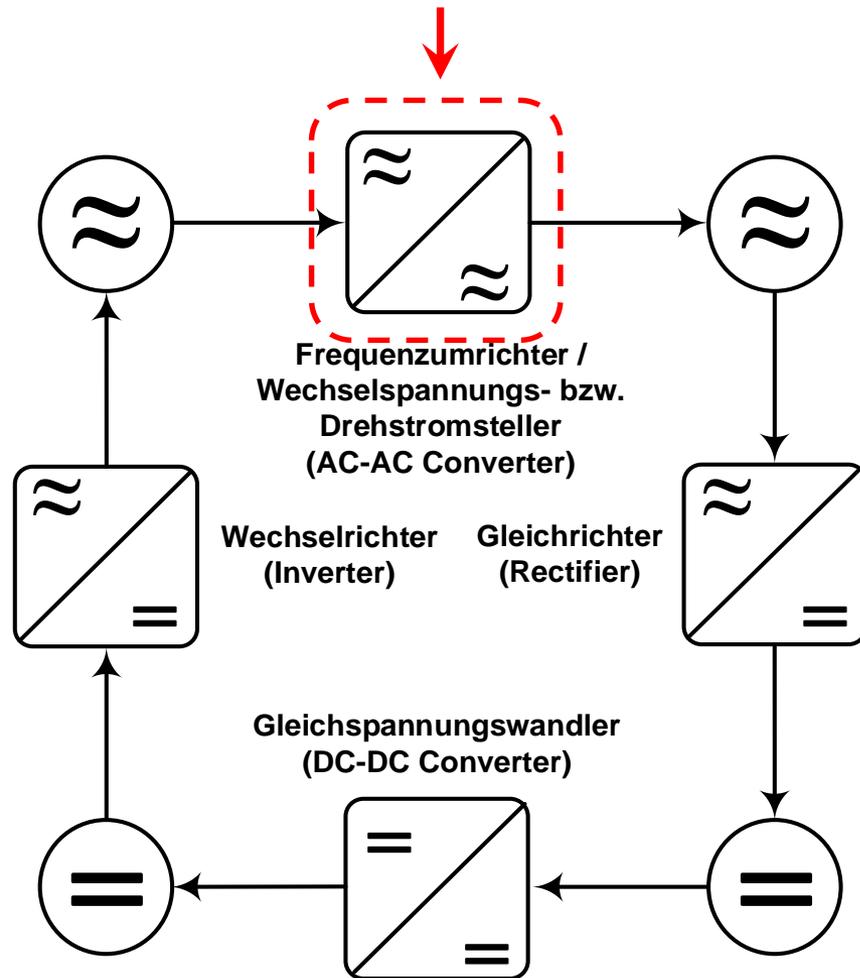
# Effektivspannung des Wechselstromstellers

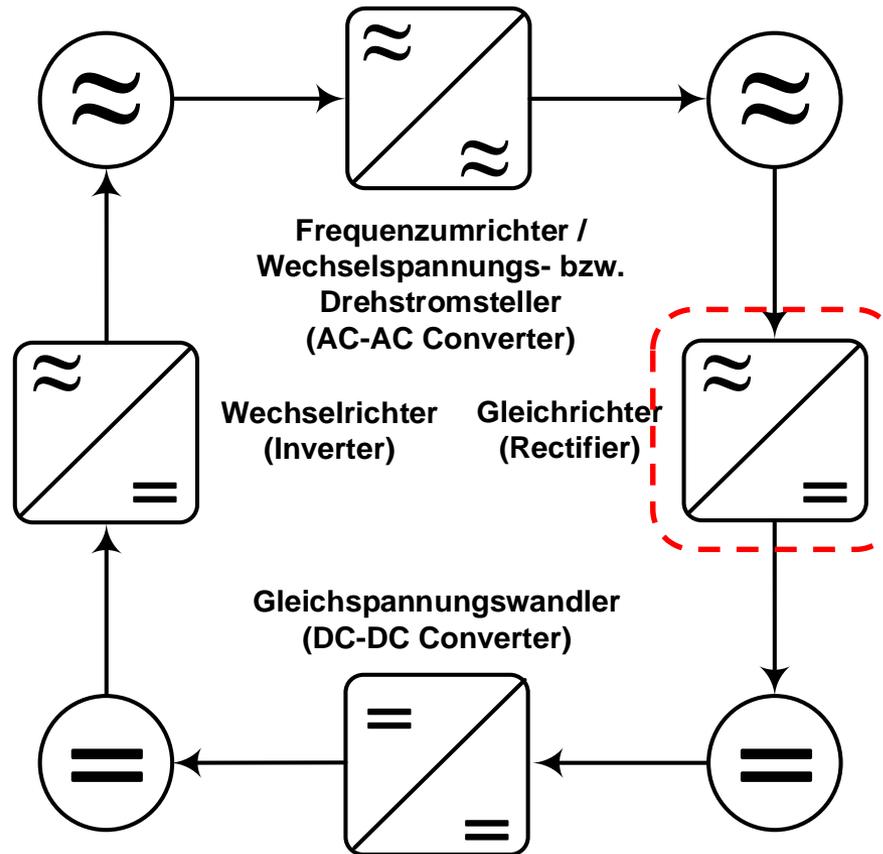


# Effektivspannung des Wechselstromstellers



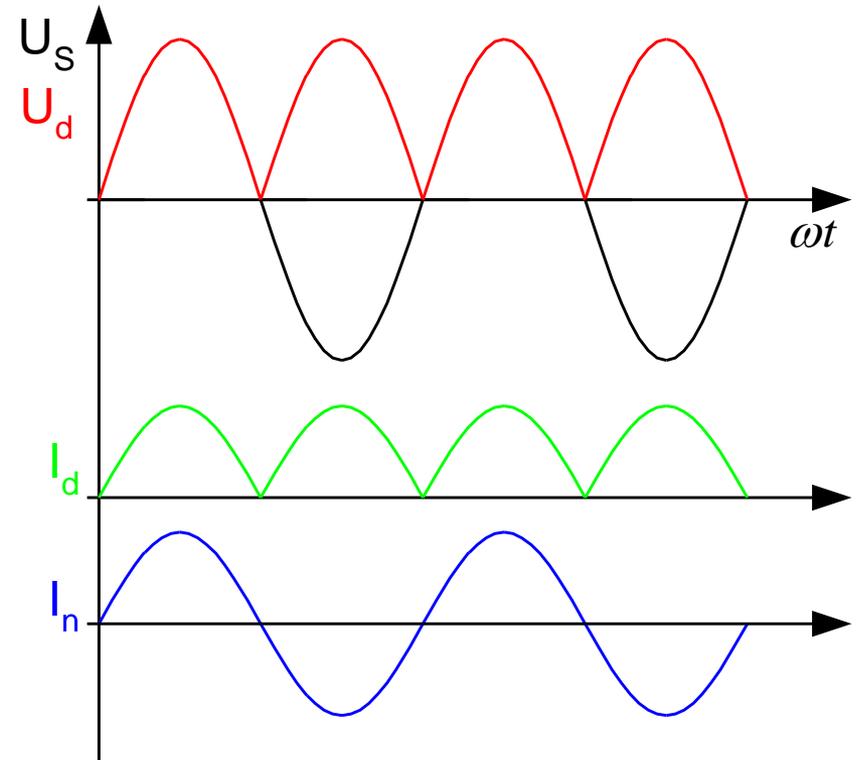
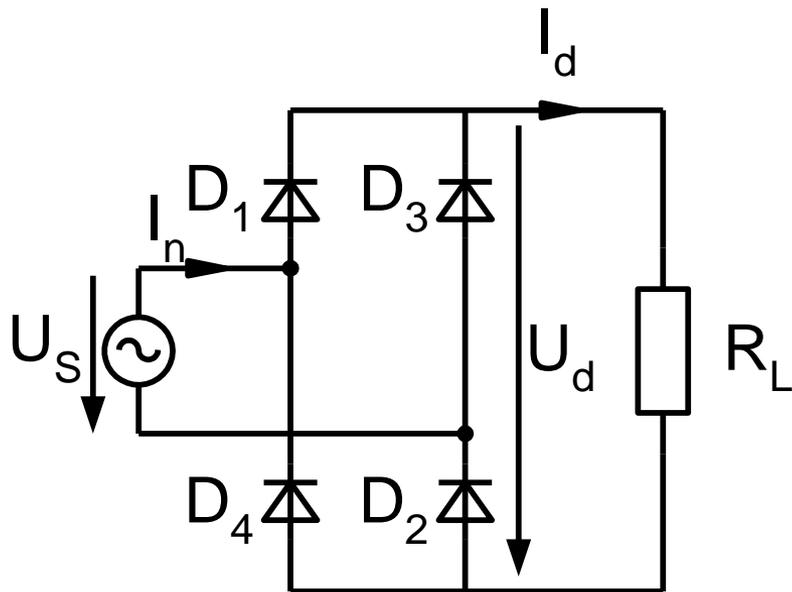
# Wechselstromsteller





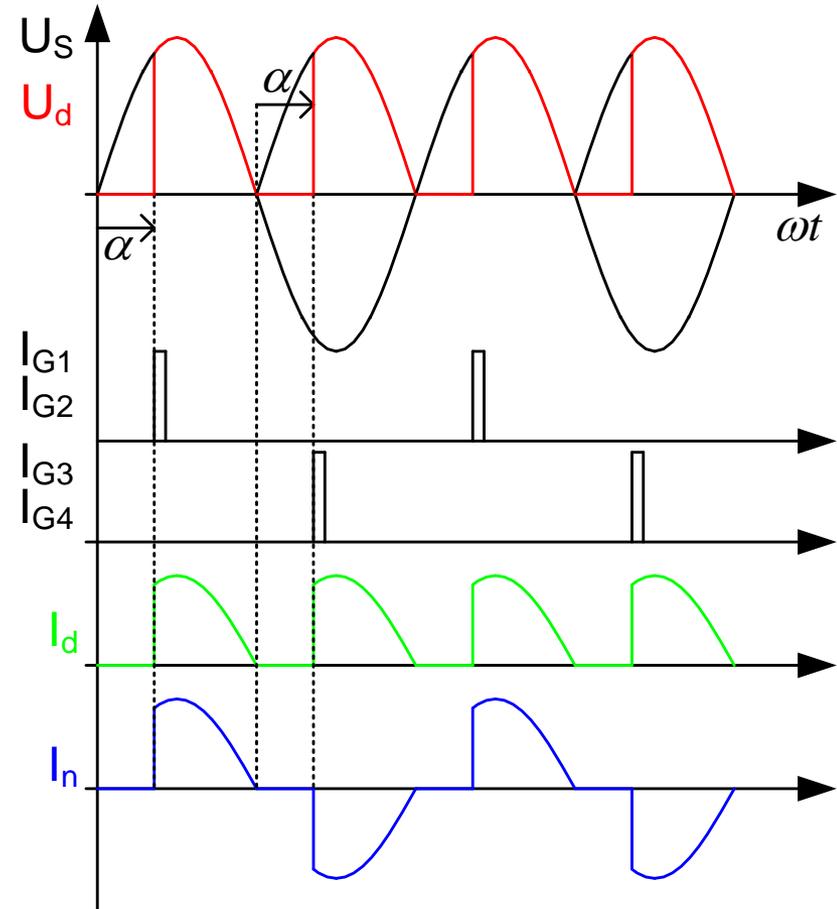
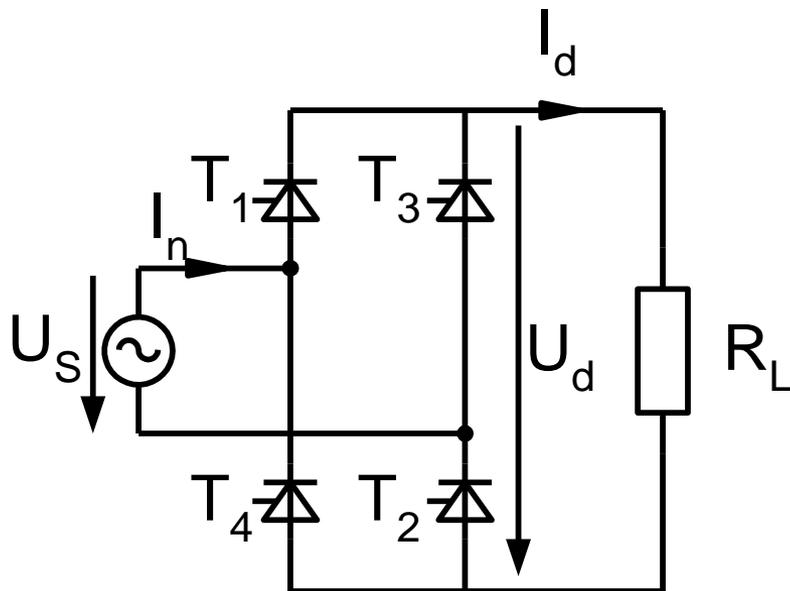
# Diodengleichrichter

- Diodengleichrichter an ohmscher Last



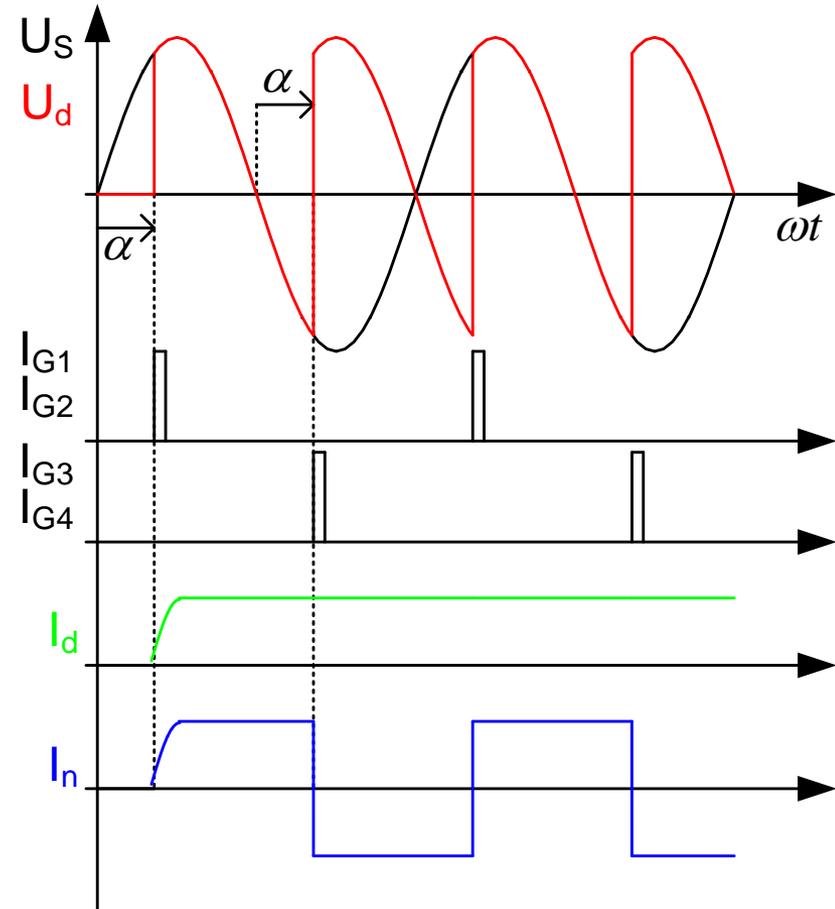
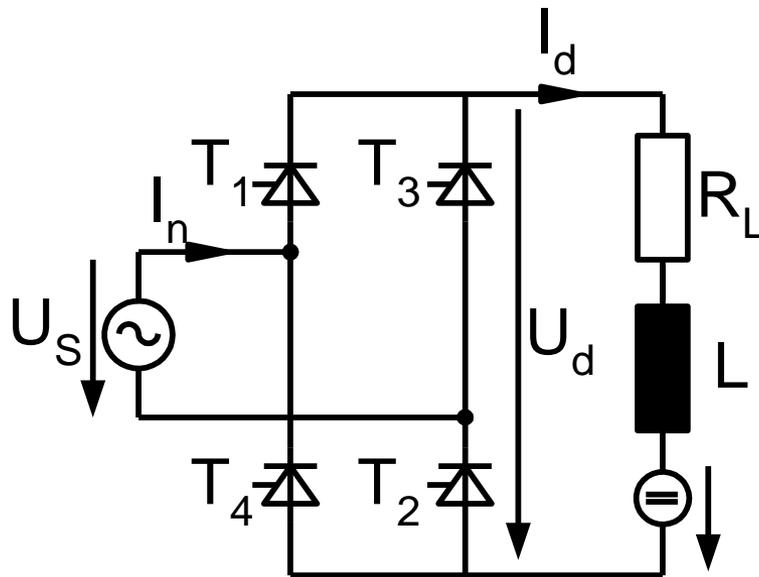
# Wechselstrombrücke

- Wechselstrombrücke an ohmscher Last



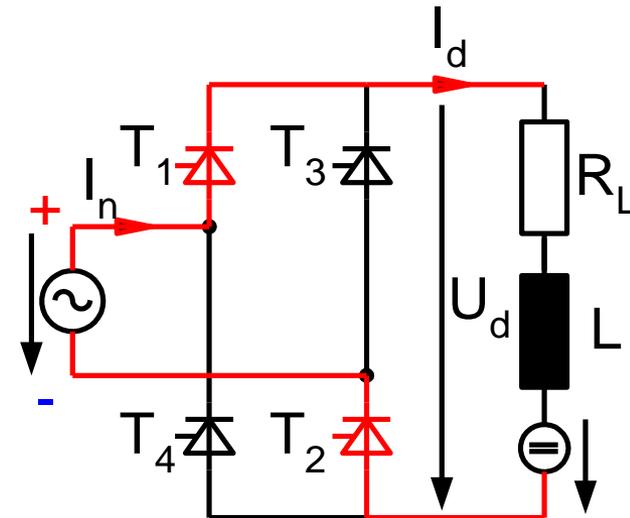
# Wechselstrombrücke

- Wechselstrombrücke an mit induktiver Glättung



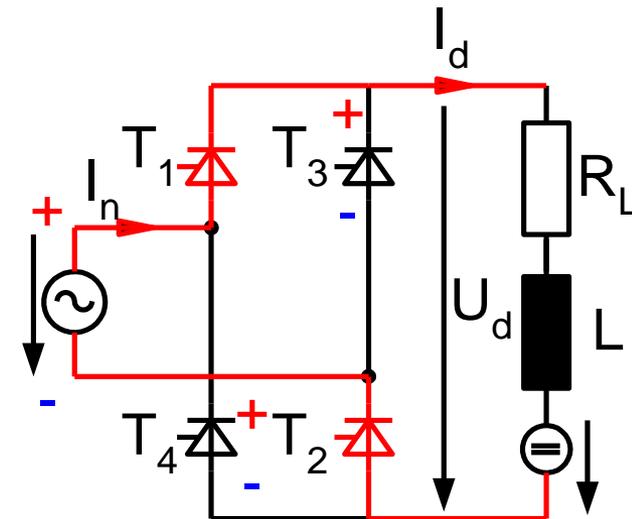
# Kommutierung

- Annahme:  $I_d$  ist ideal glatt:
  - $U_s > 0$ ,  $T_1$  und  $T_2$  leiten den Strom  $I_d$



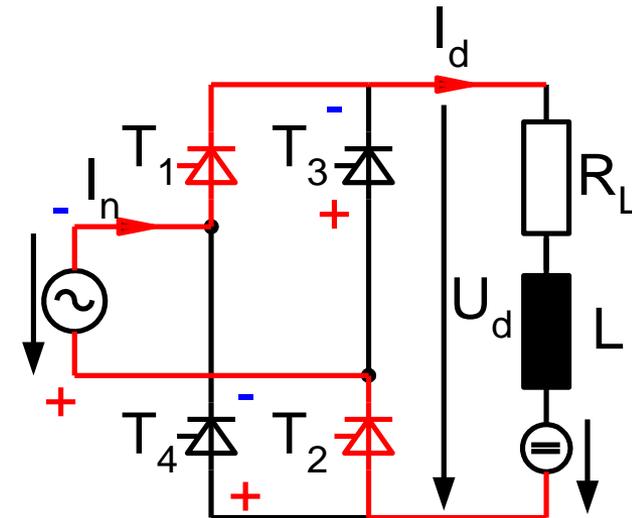
# Kommutierung

- Annahme:  $I_d$  ist ideal glatt:
  - $U_S > 0$ ,  $T_1$  und  $T_2$  leiten den Strom  $I_d$ 
    - Über  $T_3$  und  $T_4$  liegt negative Sperrspannung an



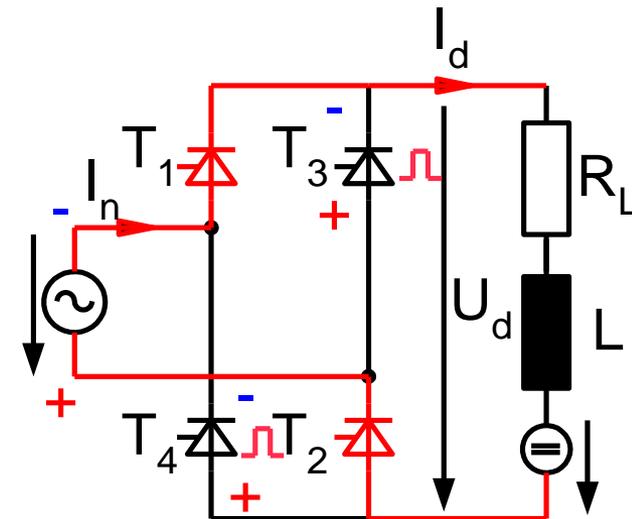
# Kommutierung

- Annahme:  $I_d$  ist ideal glatt:
  - $U_S > 0$ ,  $T_1$  und  $T_2$  leiten den Strom  $I_d$ 
    - Über  $T_3$  und  $T_4$  liegt negative Sperrspannung an
  - $U_S$  wird  $< 0$ 
    - Da  $I_d > 0$ , leiten  $T_1$  und  $T_2$  weiter
    - Über  $T_3$  und  $T_4$  liegt positive Sperrspannung an



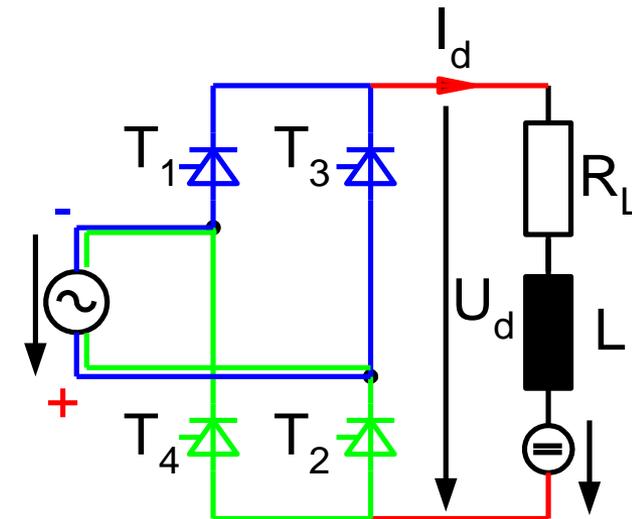
# Kommutierung

- Annahme:  $I_d$  ist ideal glatt:
  - $U_S > 0$ ,  $T_1$  und  $T_2$  leiten den Strom  $I_d$ 
    - Über  $T_3$  und  $T_4$  liegt negative Sperrspannung an
  - $U_S$  wird  $< 0$ 
    - Da  $I_d > 0$ , leiten  $T_1$  und  $T_2$  weiter
    - Über  $T_3$  und  $T_4$  liegt positive Sperrspannung an
- Zündimpulse an  $T_3$  und  $T_4$ 
  - $T_3$  und  $T_4$  beginnen zu leiten



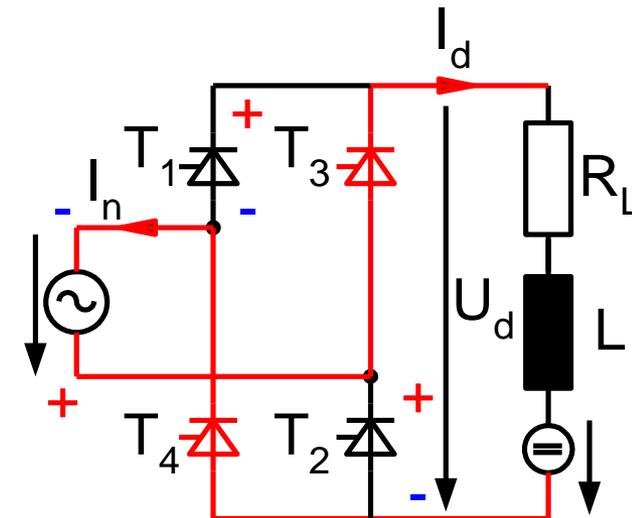
# Kommutierung

- Annahme:  $I_d$  ist ideal glatt:
  - $U_S > 0$ ,  $T_1$  und  $T_2$  leiten den Strom  $I_d$ 
    - Über  $T_3$  und  $T_4$  liegt negative Sperrspannung an
  - $U_S$  wird  $< 0$ 
    - Da  $I_d > 0$ , leiten  $T_1$  und  $T_2$  weiter
    - Über  $T_3$  und  $T_4$  liegt positive Sperrspannung an
- Zündimpulse an  $T_3$  und  $T_4$ 
  - $T_3$  und  $T_4$  beginnen zu leiten
- Kommutierung
  - Die Netzspannung  $U_S$  sorgt für einen Abbau des Stromes in  $T_1$  und  $T_2$  und gleichzeitig für den Aufbau des Stromes in  $T_3$  und  $T_4$

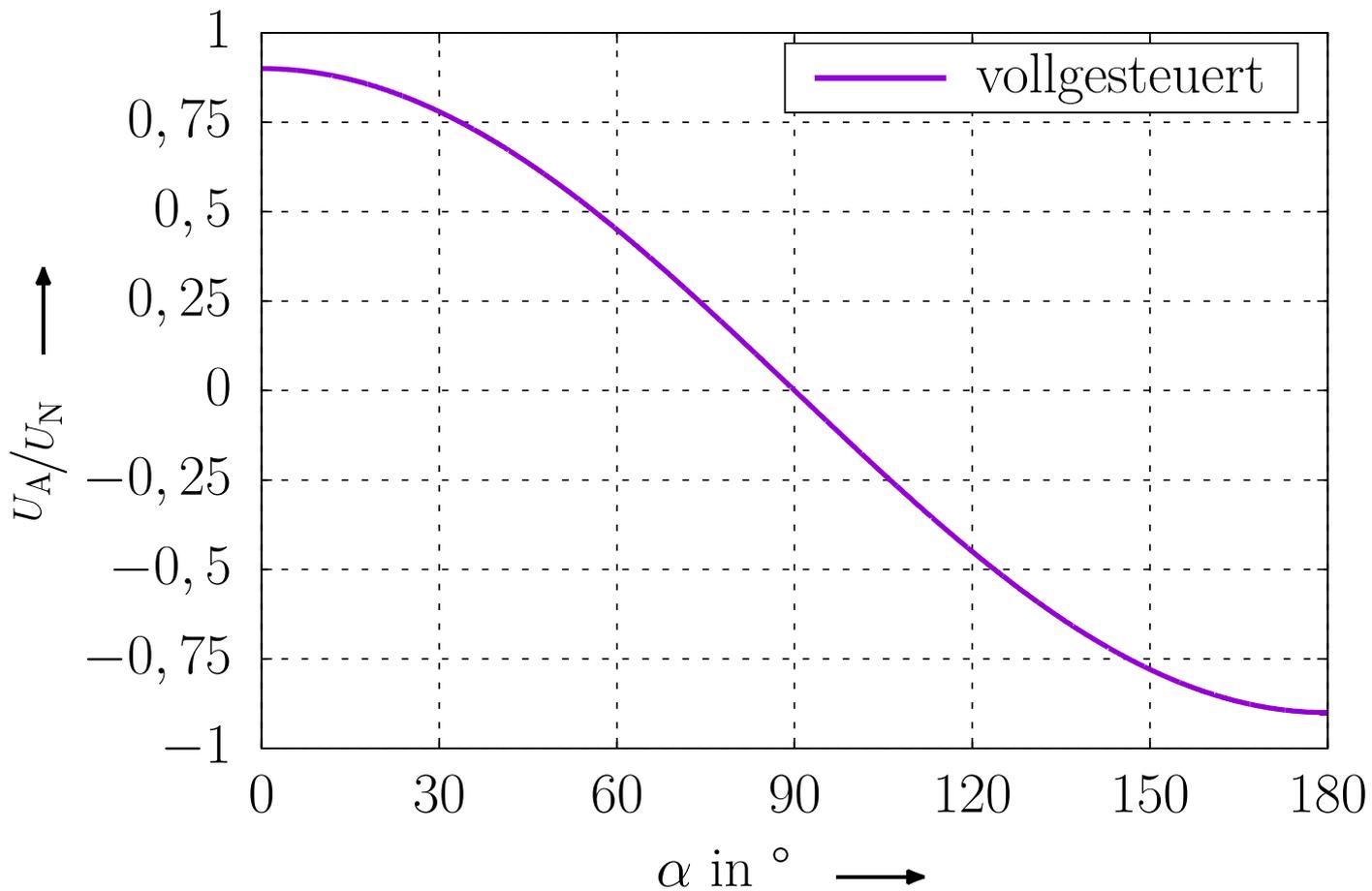


# Kommutierung

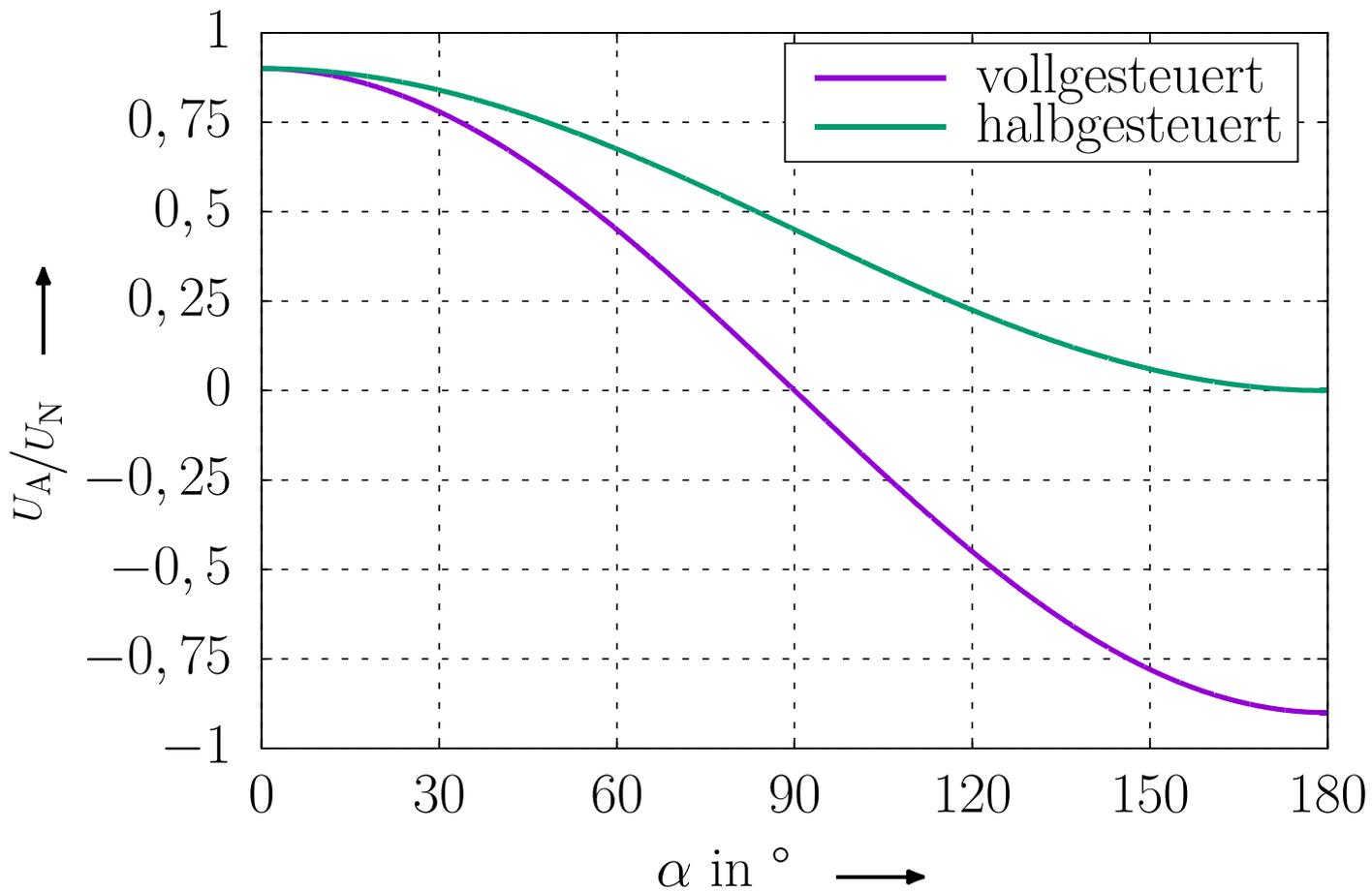
- Annahme:  $I_d$  ist ideal glatt:
  - $U_S > 0$ ,  $T_1$  und  $T_2$  leiten den Strom  $I_d$ 
    - Über  $T_3$  und  $T_4$  liegt negative Sperrspannung an
  - $U_S$  wird  $< 0$ 
    - Da  $I_d > 0$ , leiten  $T_1$  und  $T_2$  weiter
    - Über  $T_3$  und  $T_4$  liegt positive Sperrspannung an
- Zündimpulse an  $T_3$  und  $T_4$ 
  - $T_3$  und  $T_4$  beginnen zu leiten
- Kommutierung
  - Die Netzspannung  $U_S$  sorgt für einen Abbau des Stromes in  $T_1$  und  $T_2$  und gleichzeitig für den Aufbau des Stromes in  $T_3$  und  $T_4$
- Strom in  $T_1$  und  $T_2$  ist auf 0 abgesunken
  - $T_1$  und  $T_2$  sperren. Es liegt negative Sperrspannung an
  - $T_3$  und  $T_4$  führen nun den Strom  $I_d$



# Ausgangsspannungsbereich der Wechselstrombrückenschaltung



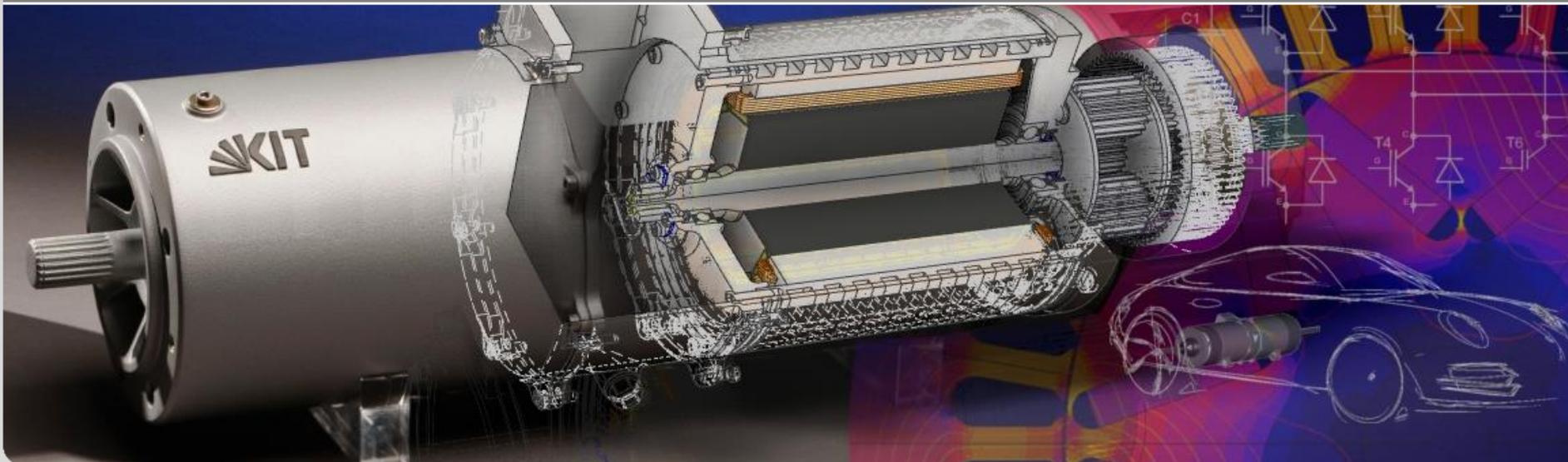
# Ausgangsspannungsbereich der Wechselstrombrückenschaltung



# Übung zur Vorlesung Elektrische Maschinen und Stromrichter netzgeführte Drehstrombrücke

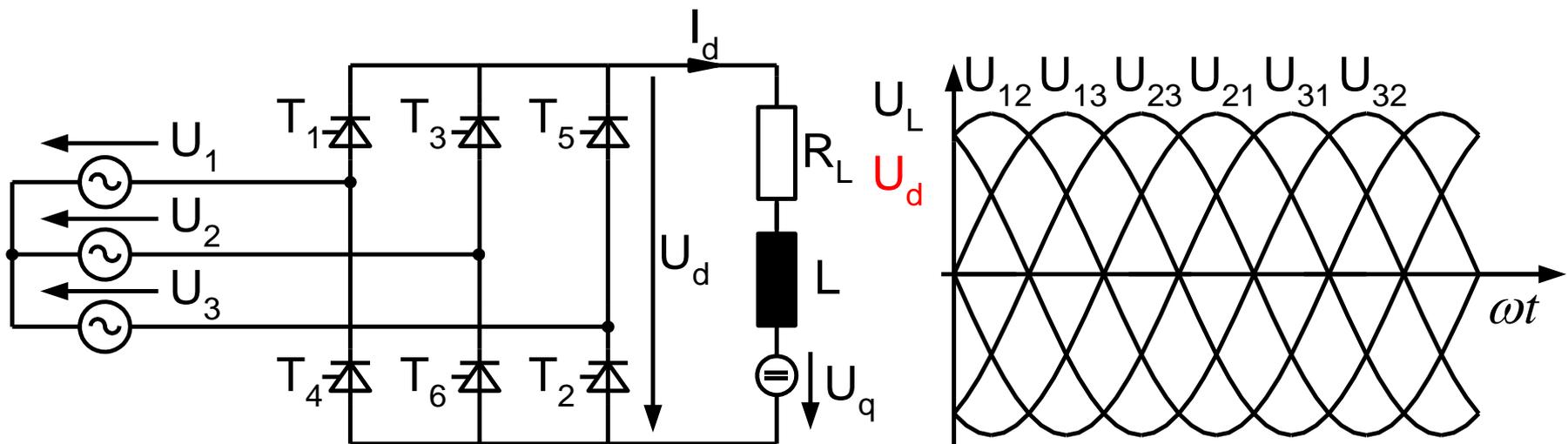
Dennis Bräcke

Elektrotechnisches Institut – Elektrische Antriebe und Leistungselektronik



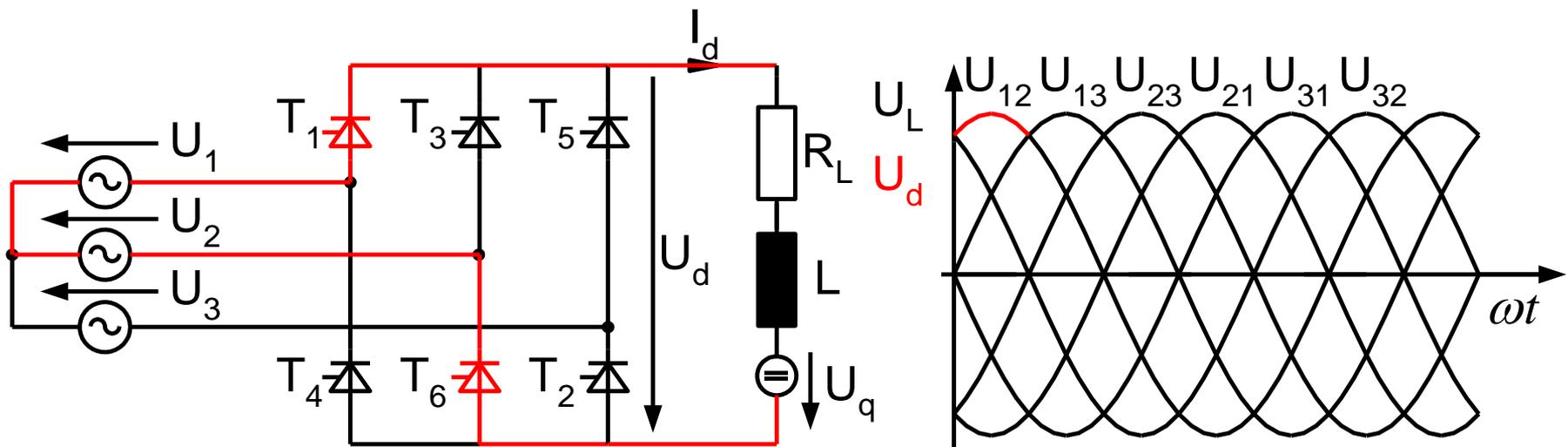
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 0^\circ$ , wie Diodenbrücke



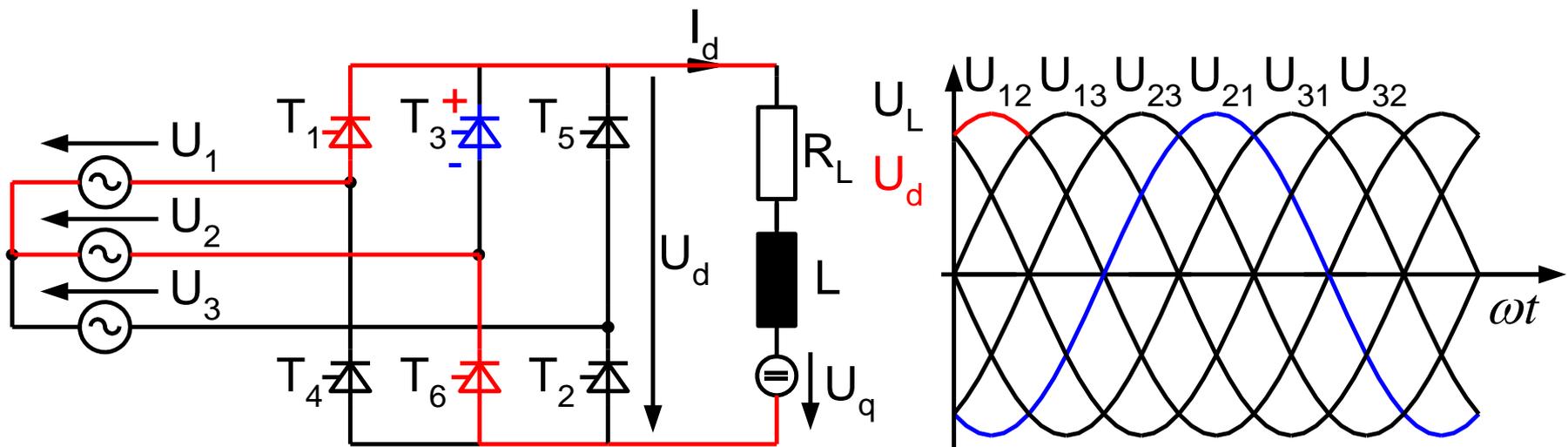
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 0^\circ$ , wie Diodenbrücke



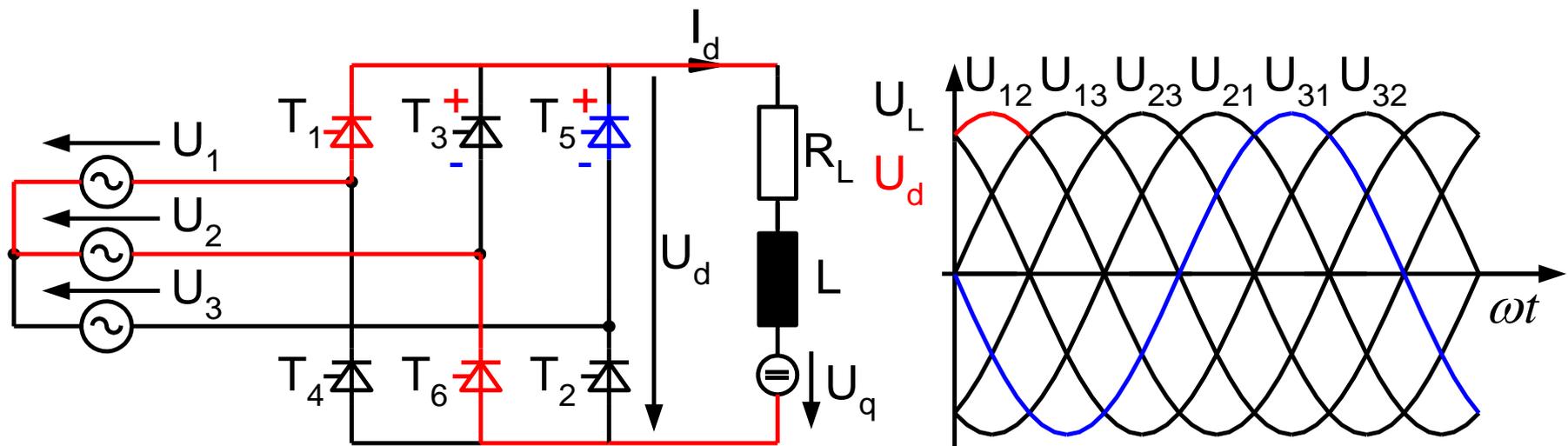
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 0^\circ$ , wie Diodenbrücke



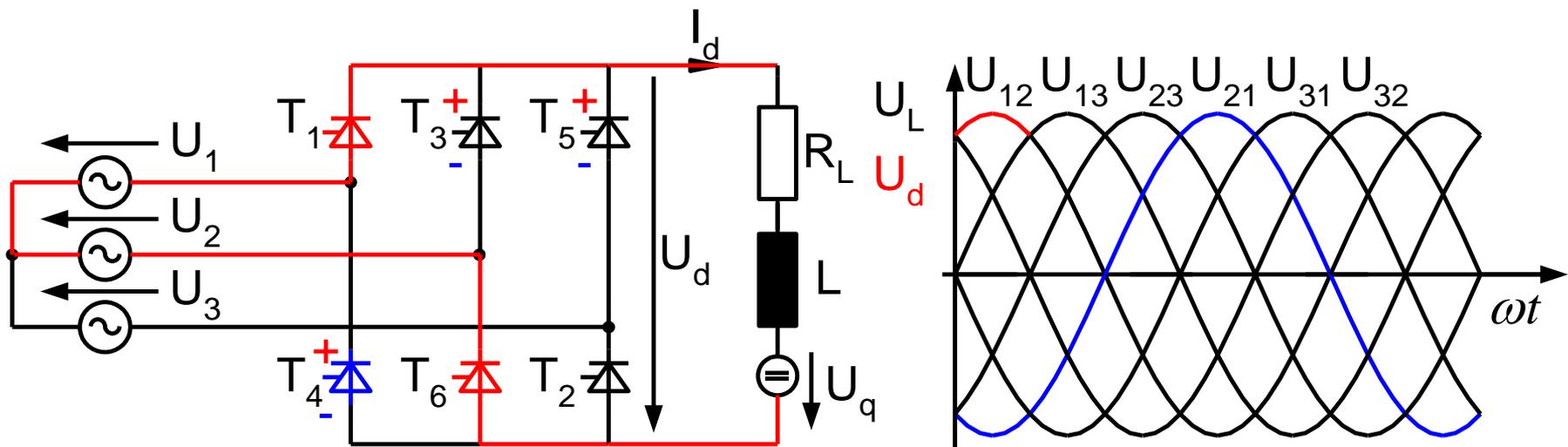
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 0^\circ$ , wie Diodenbrücke



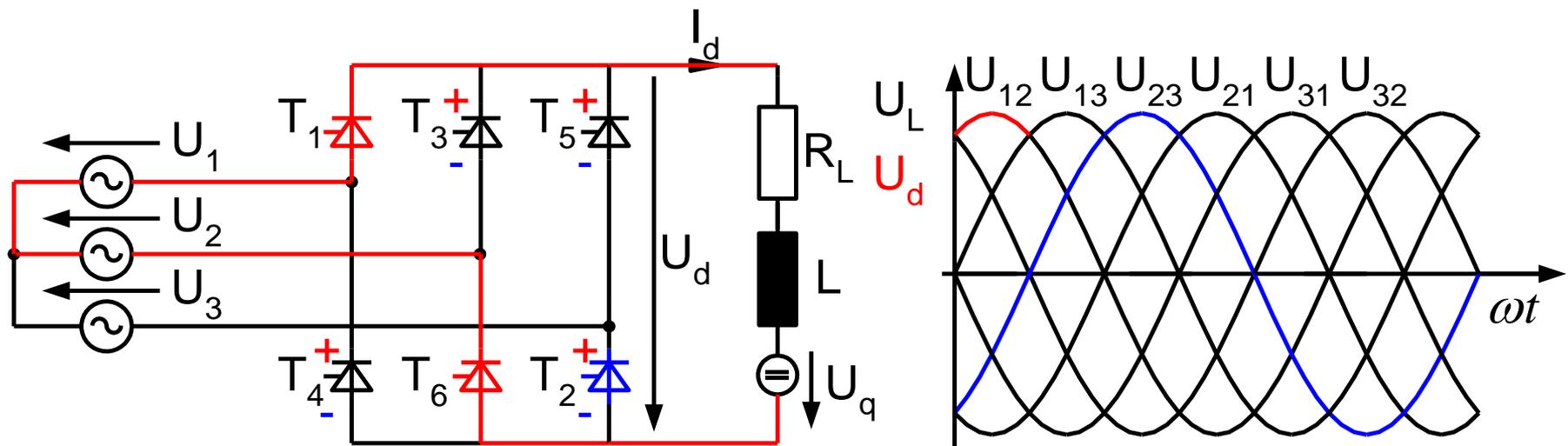
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 0^\circ$ , wie Diodenbrücke



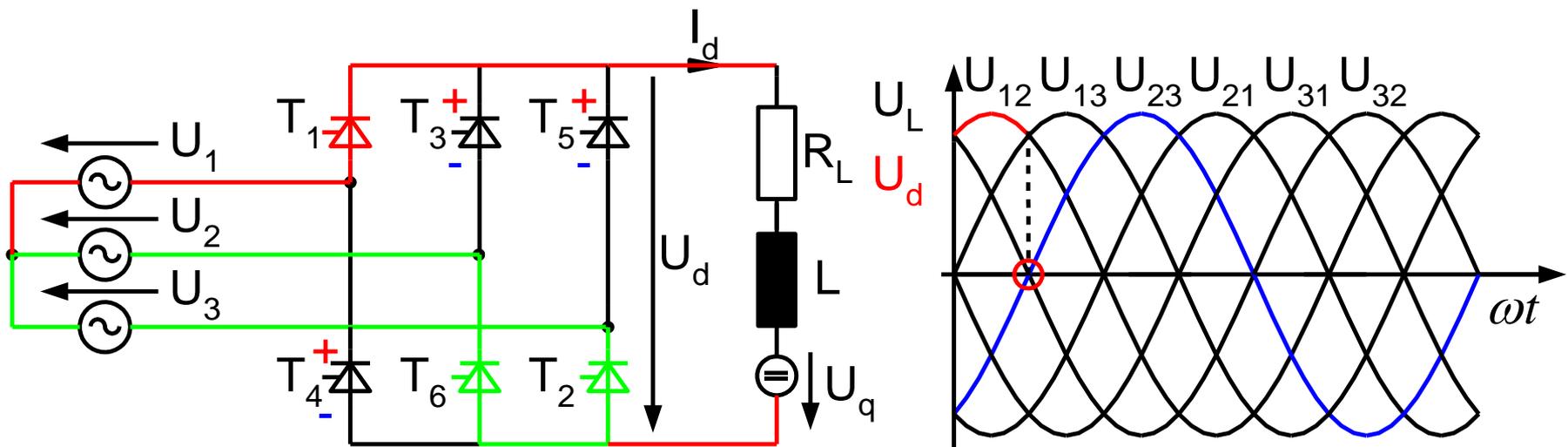
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 0^\circ$ , wie Diodenbrücke



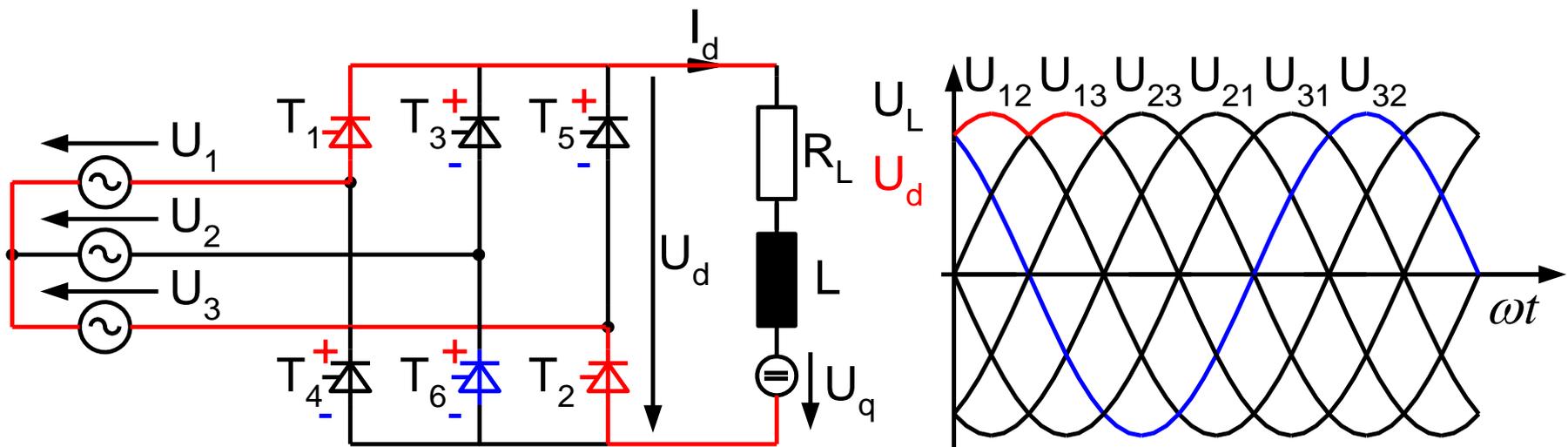
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 0^\circ$ , wie Diodenbrücke



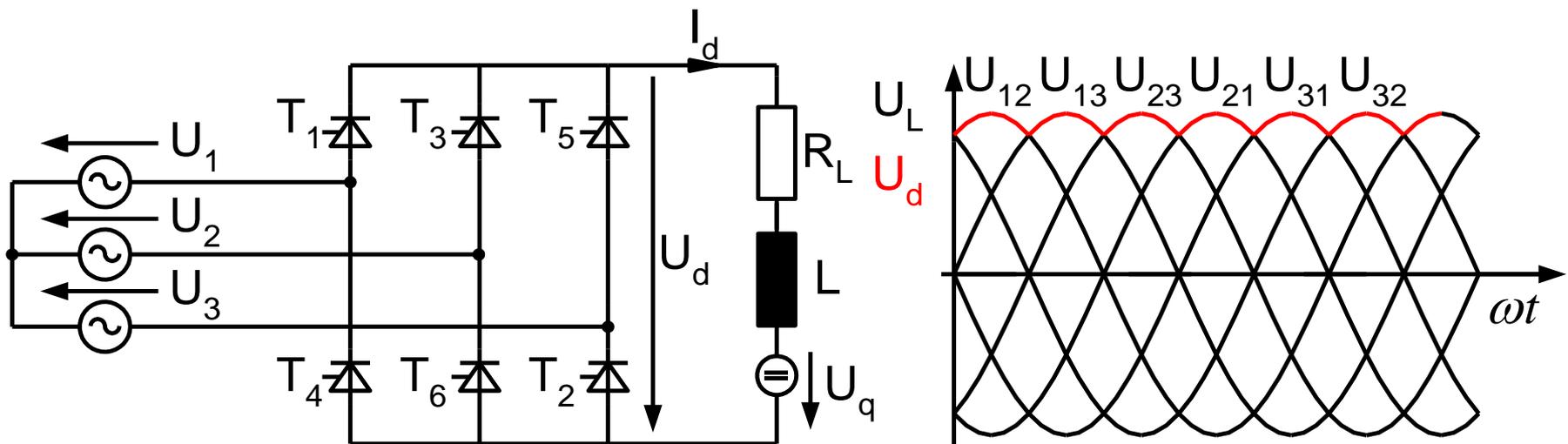
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 0^\circ$ , wie Diodenbrücke



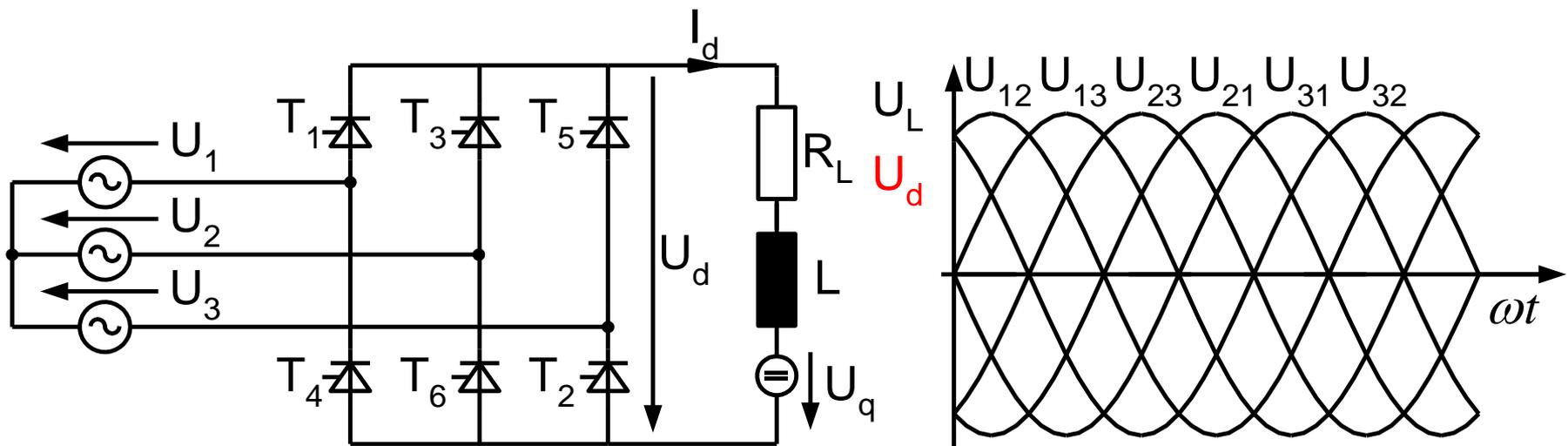
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 0^\circ$ , wie Diodenbrücke



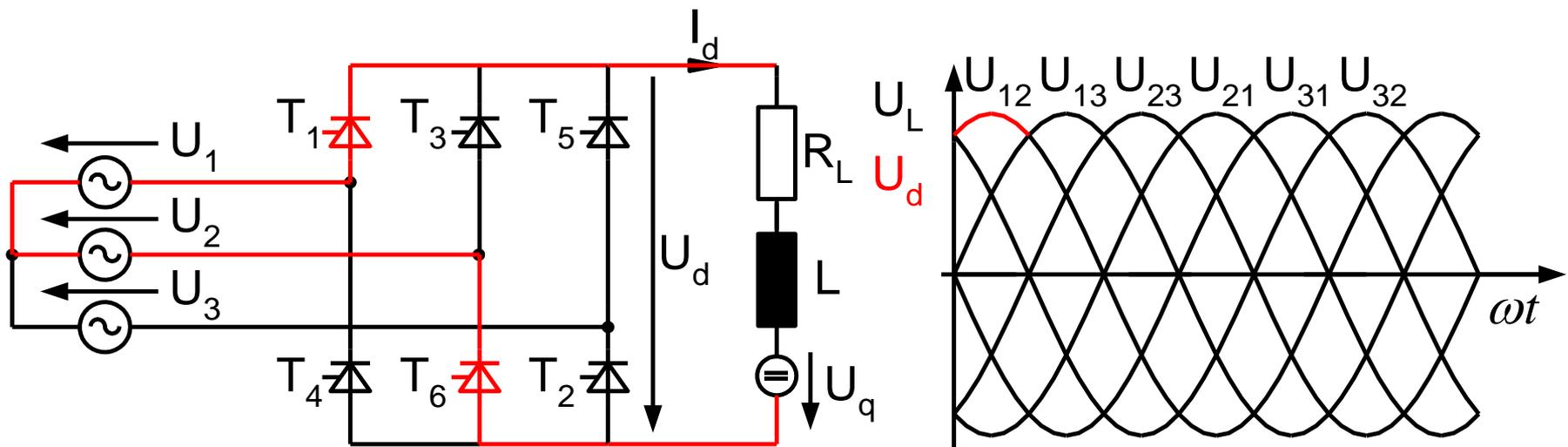
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 30^\circ$



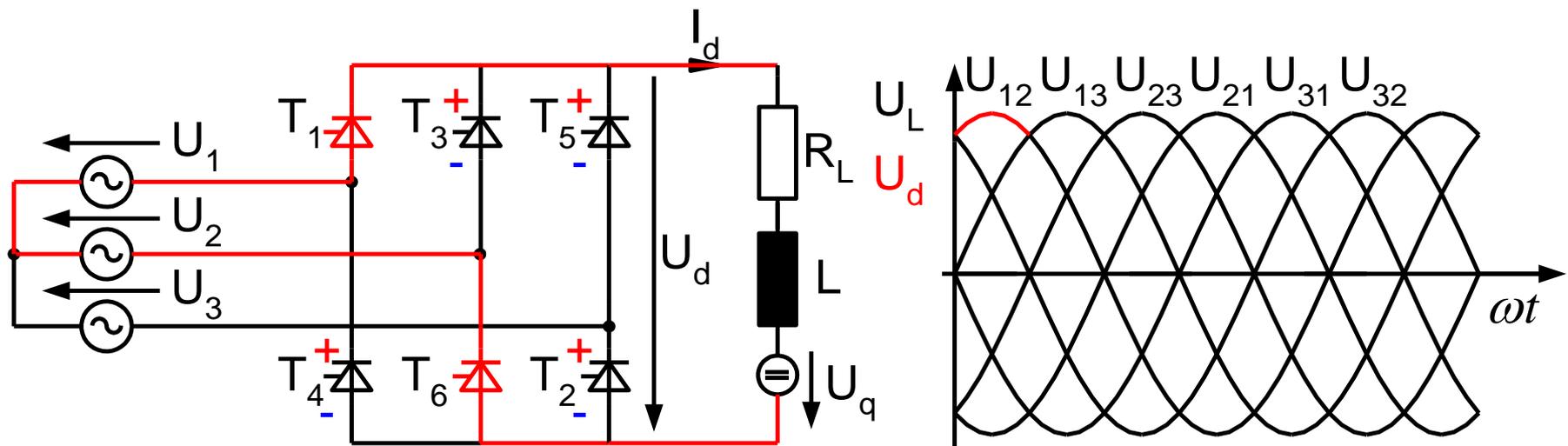
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 30^\circ$



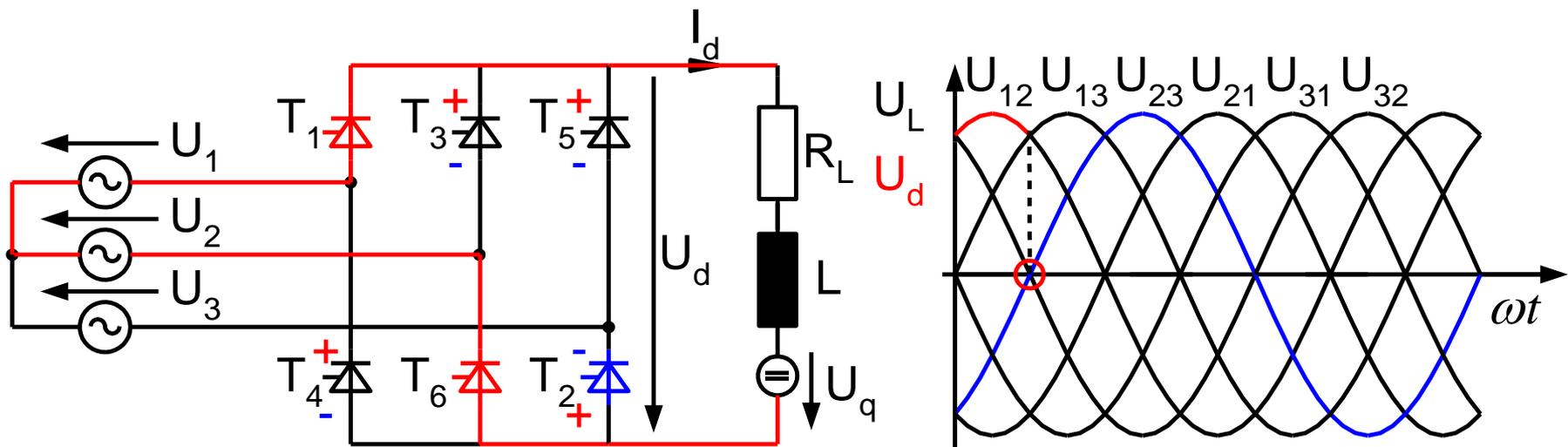
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 30^\circ$



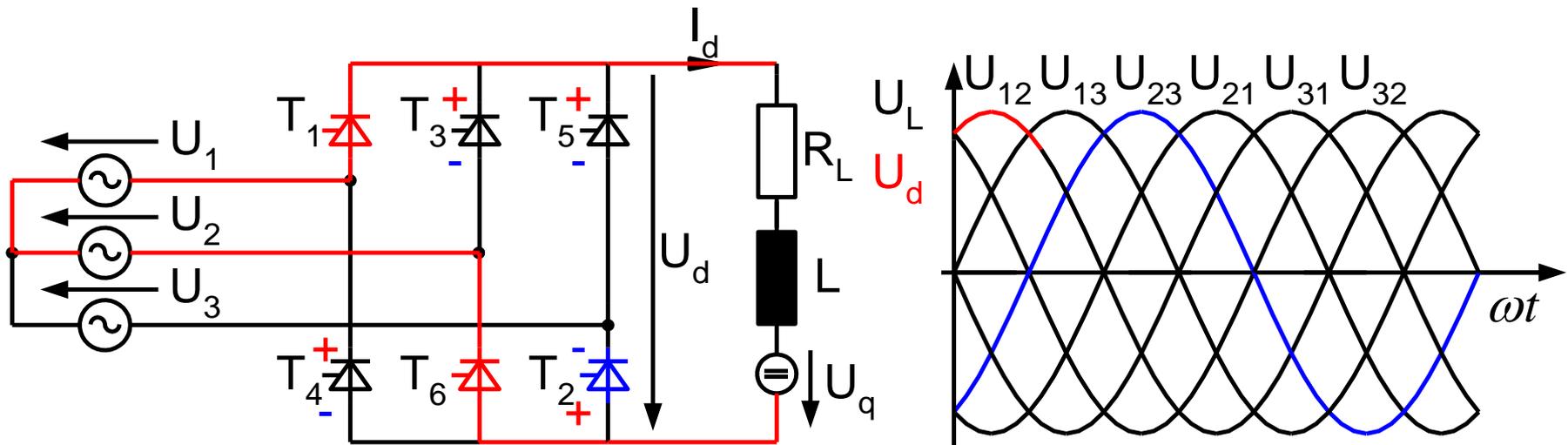
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 30^\circ$



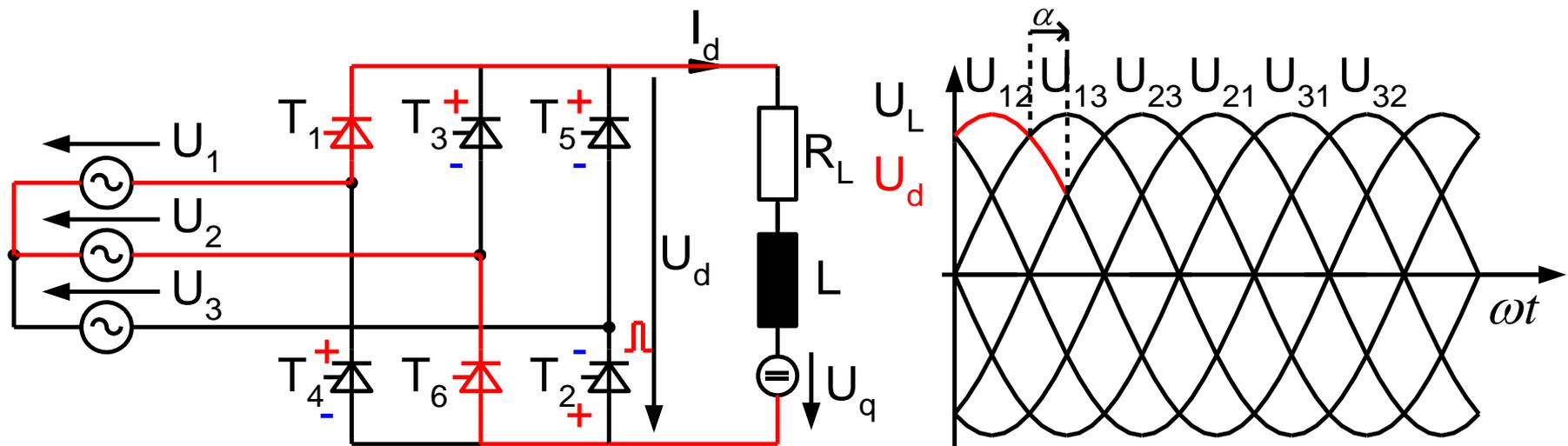
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 30^\circ$



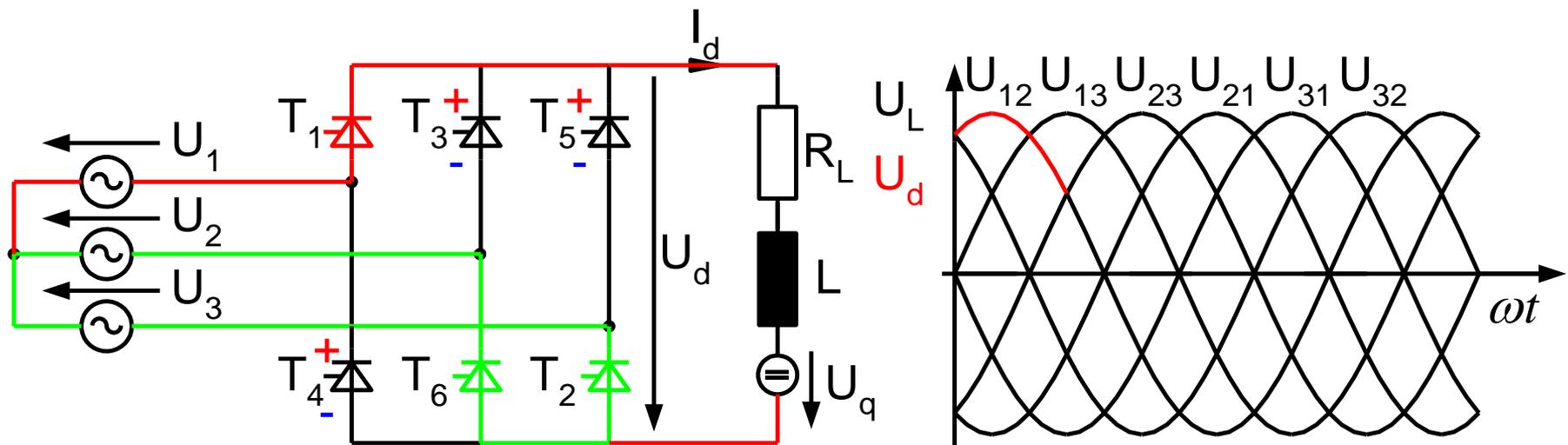
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 30^\circ$



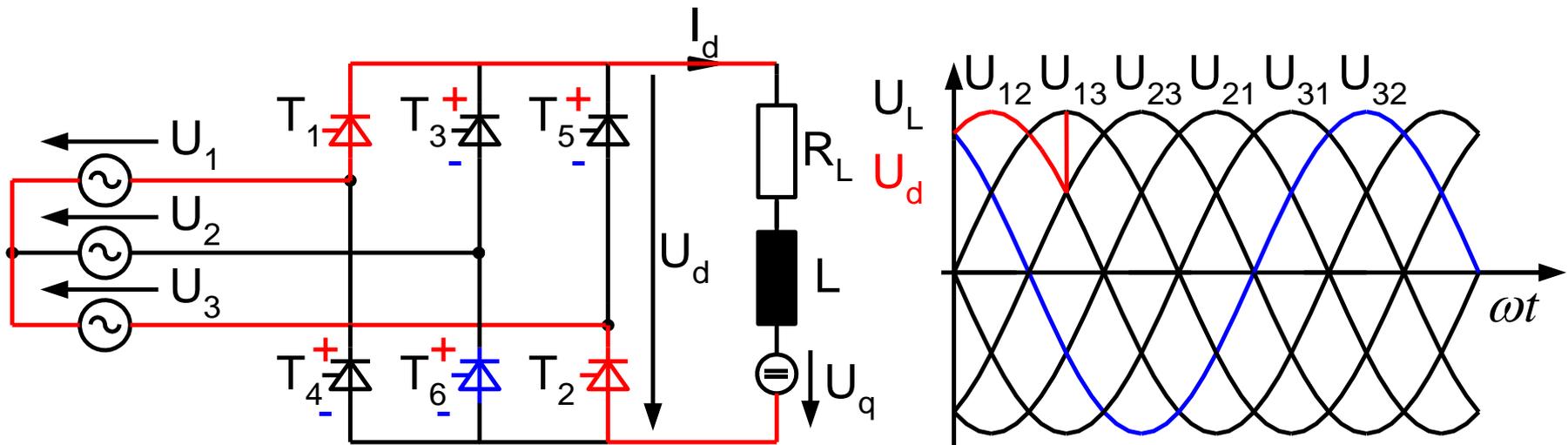
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 30^\circ$



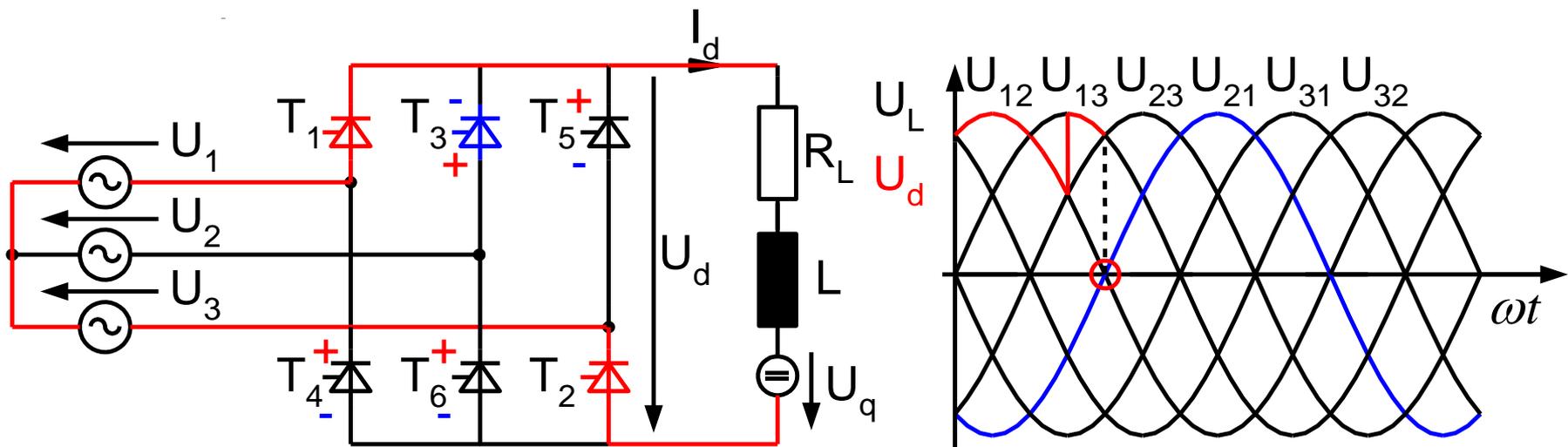
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 30^\circ$



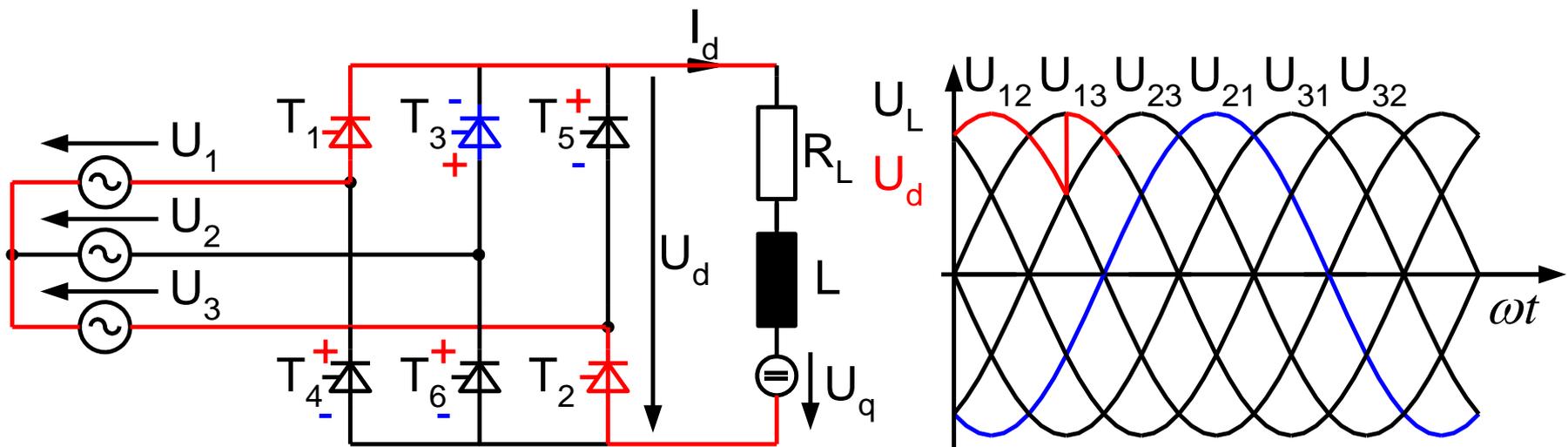
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 30^\circ$



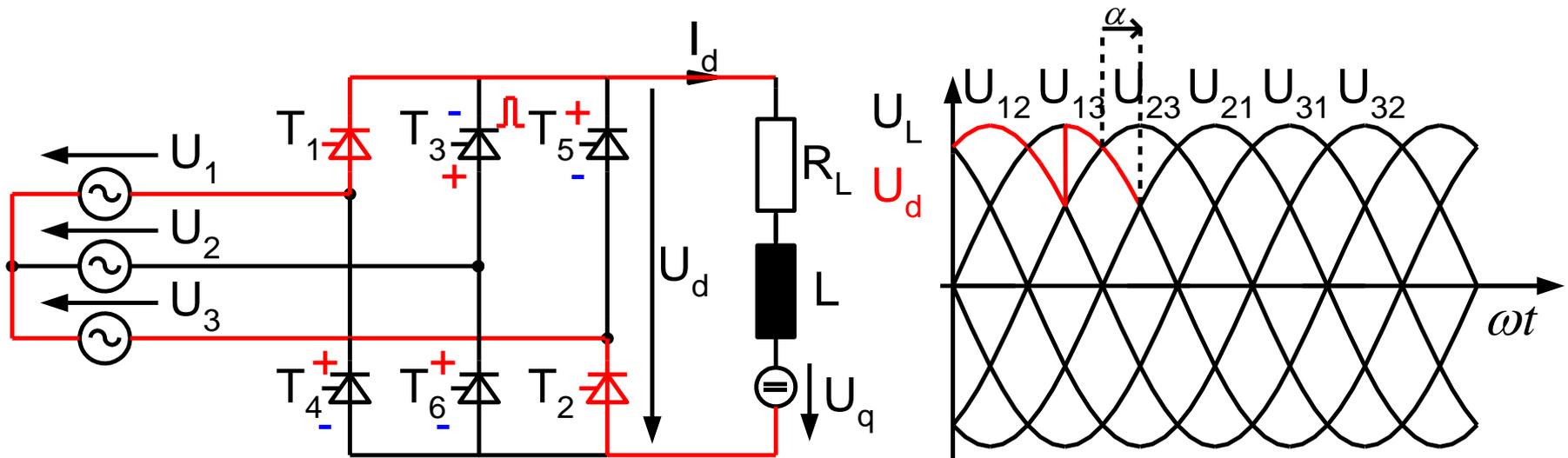
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 30^\circ$



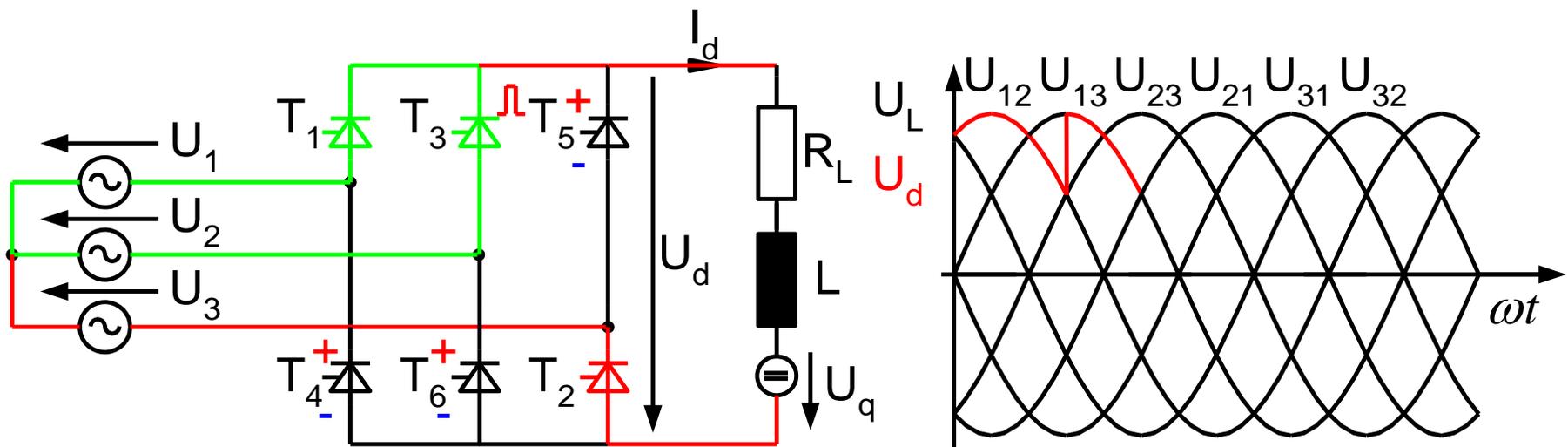
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 30^\circ$



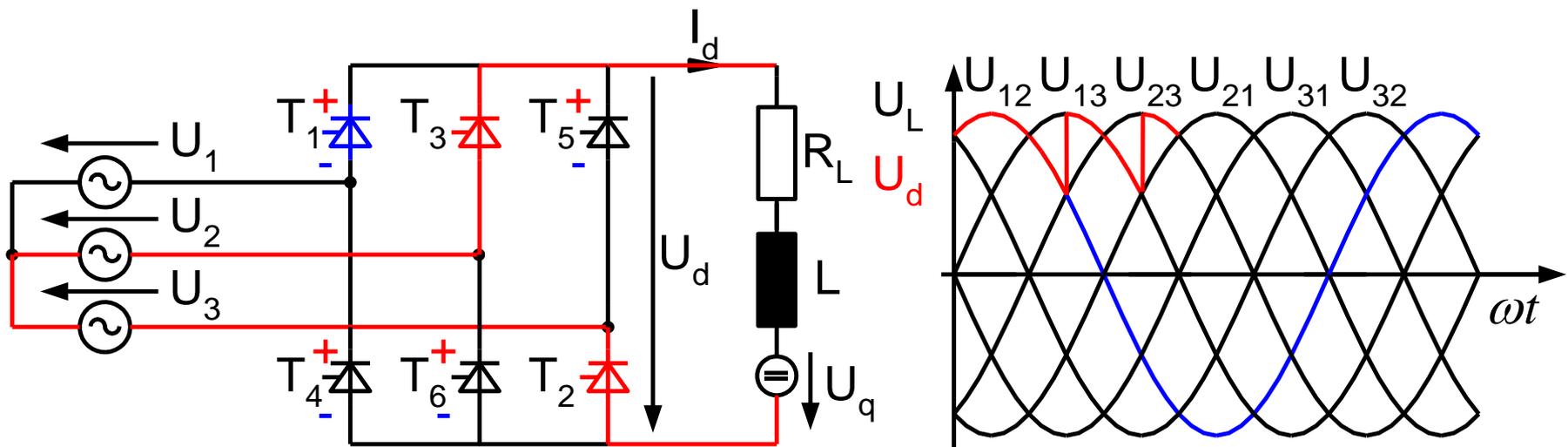
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 30^\circ$



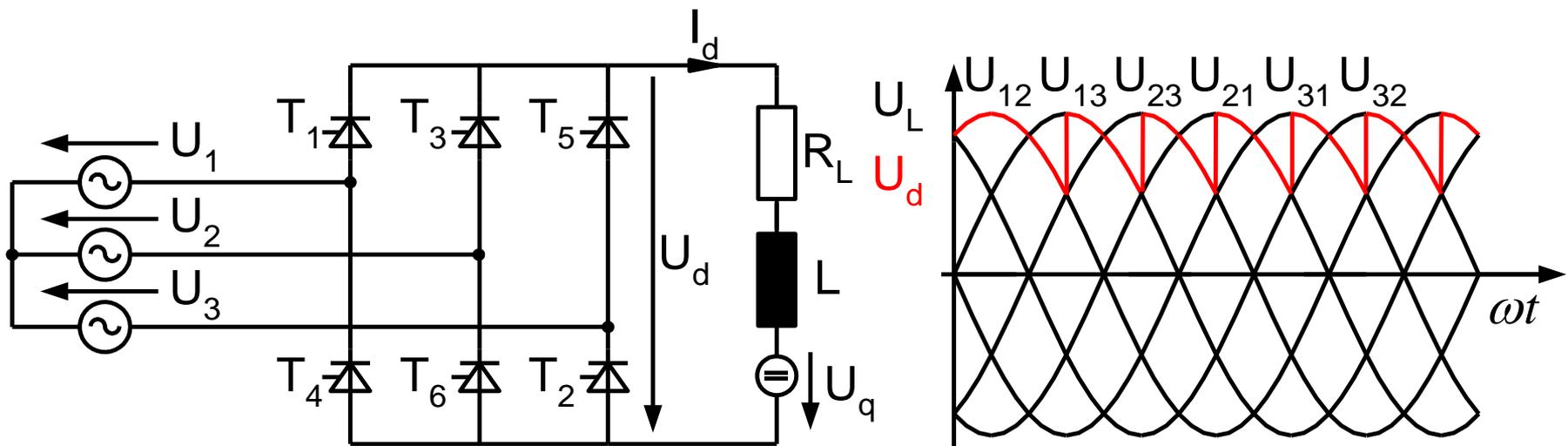
# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 30^\circ$



# Netzgeführte Drehstrombrücke

- Annahme: Strom  $I_d$  ist ideal glatt, Netz sei starr
- Steuerwinkel  $\alpha = 30^\circ$



# Netzgeführte Drehstrombrücke

Mittelwert der Ausgangsspannung  
ohne Kommutierungsinduktivität

$$U_{di\alpha} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi/3} \underbrace{[u_1(\omega t) - u_3(\omega t)]}_{u_{13}(\omega t) = \sqrt{2} U_L \cos(\omega t - \pi/6)} d\omega t$$

$$= \frac{3}{\pi} \sqrt{2} U_L \cdot \cos(\alpha)$$

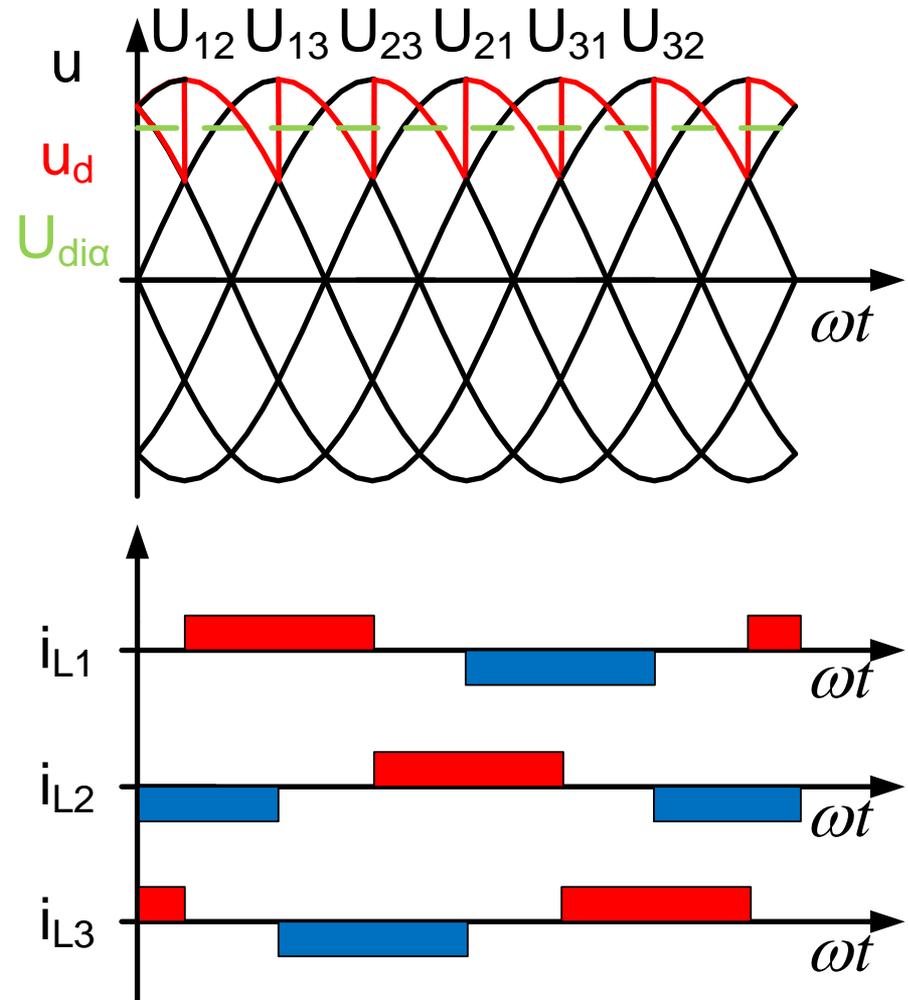
$U_{di}$

$$I_{Netz} = \sqrt{2/3} I_d$$

Effektivwert des  
Netzstroms

$$I_{Netz,1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$$

Effektivwert der  
Grundschiwingung  
des Netzstroms

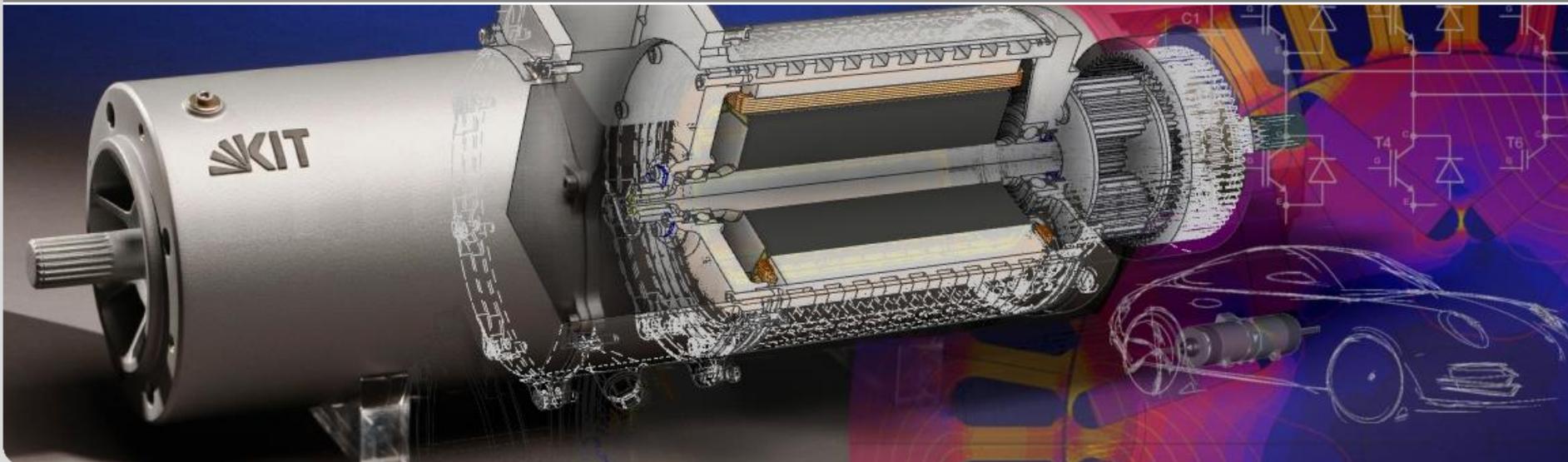


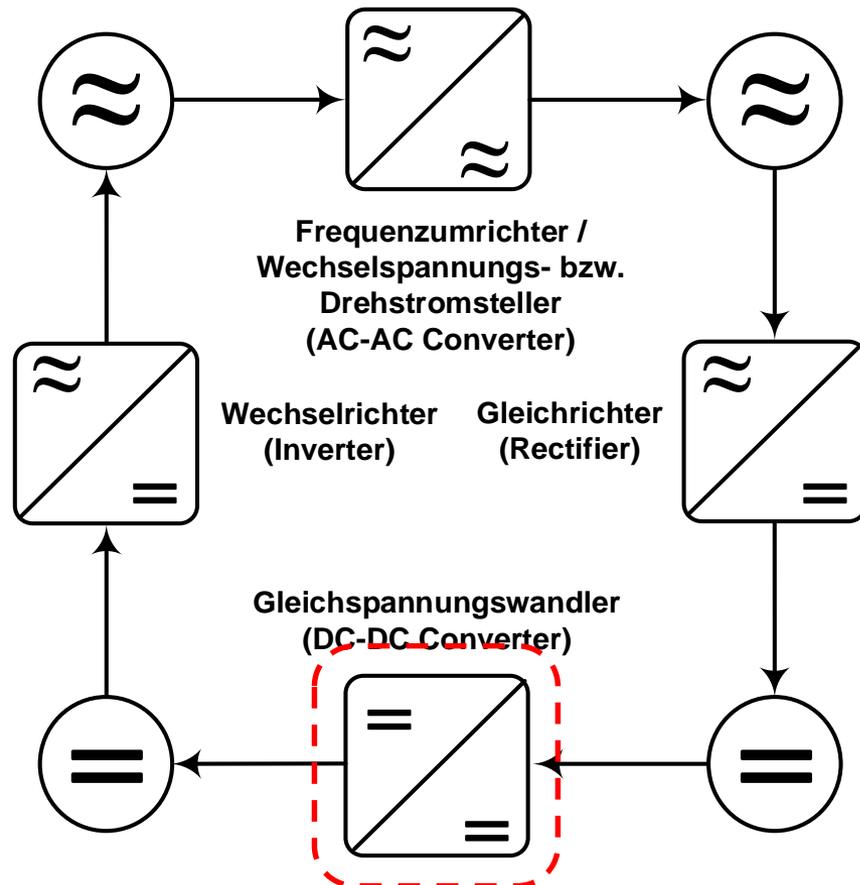
# Übung zur Vorlesung Elektrische Maschinen und Stromrichter

## 11. Übung – Gleichstromsteller

Daniel Bernet

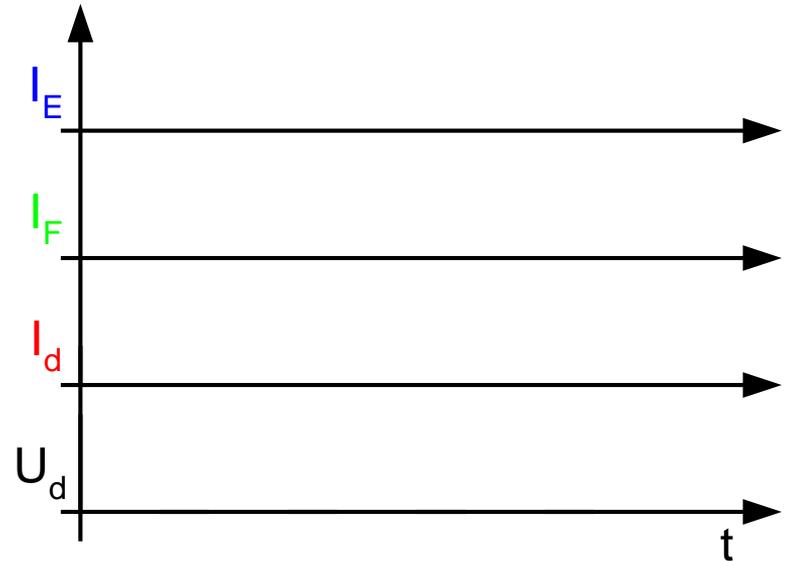
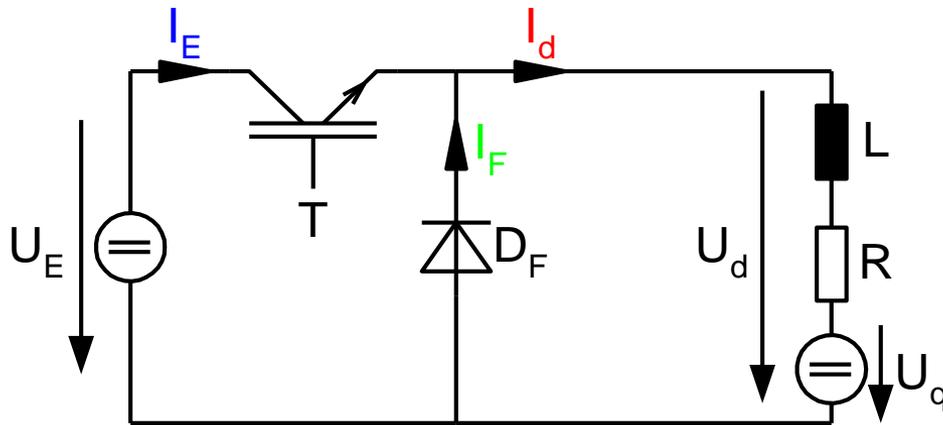
Elektrotechnisches Institut – Elektrische Antriebe und Leistungselektronik





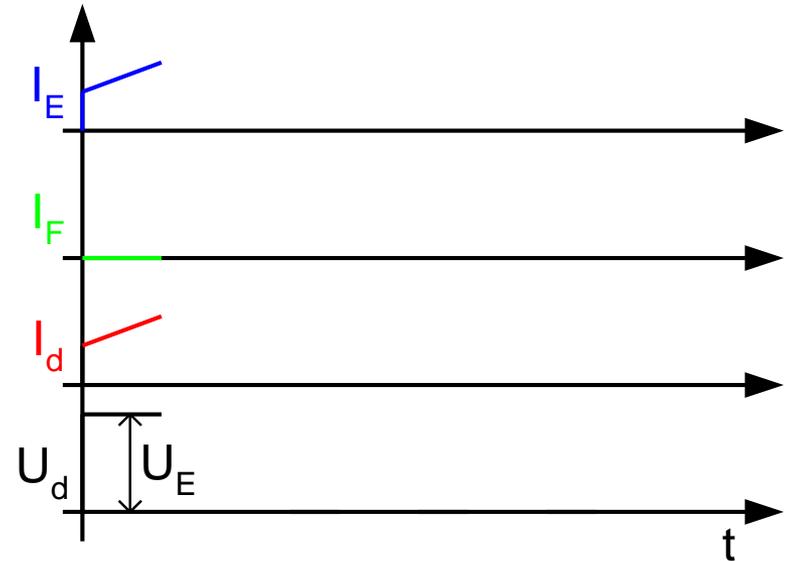
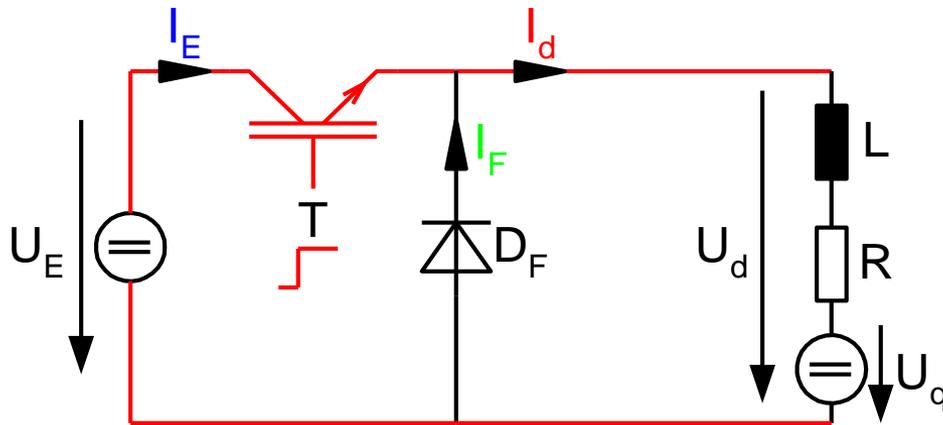
# Tiefsetzsteller

- Annahmen:
- L groß  $\Rightarrow I_d$  immer  $> 0A$
- Diode ideal  $\Rightarrow U_F = 0V$
  
- Stromkurven hier als Geradenstücke angenähert



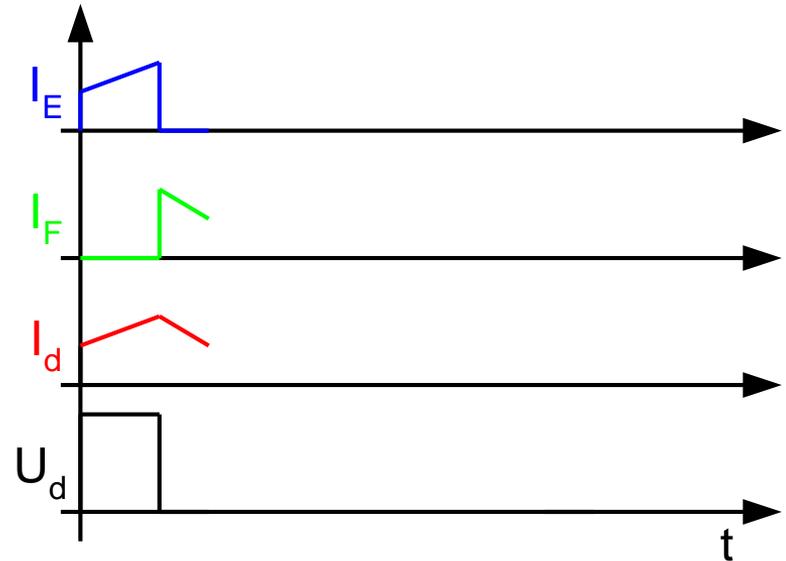
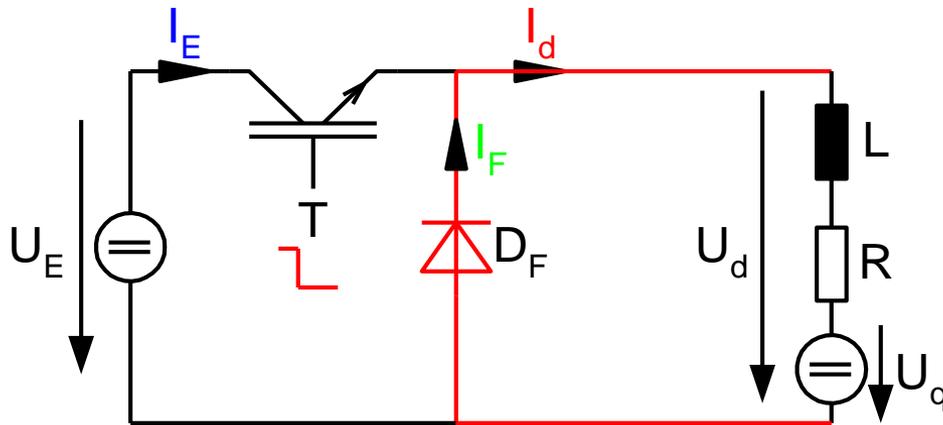
# Tiefsetzsteller

- Annahmen:
- L groß  $\Rightarrow I_d$  immer  $> 0A$
- Diode ideal  $\Rightarrow U_F = 0V$
  
- Stromkurven hier als Geradenstücke angenähert



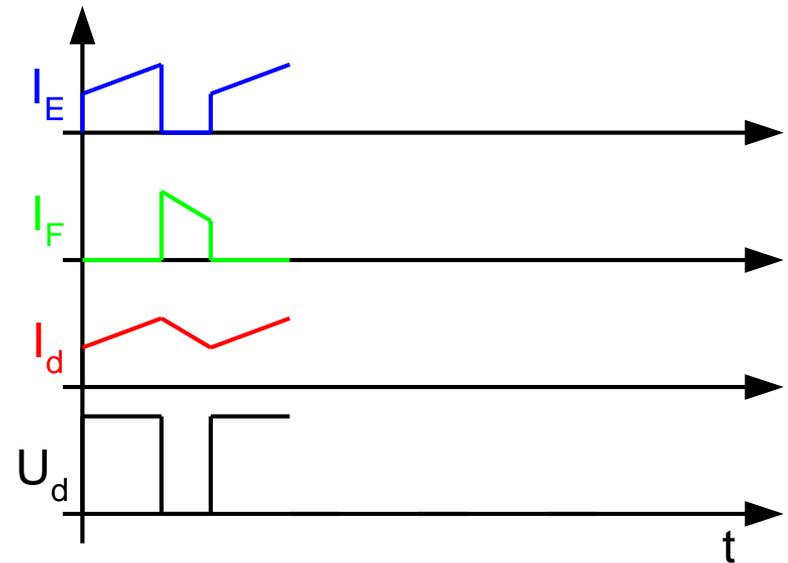
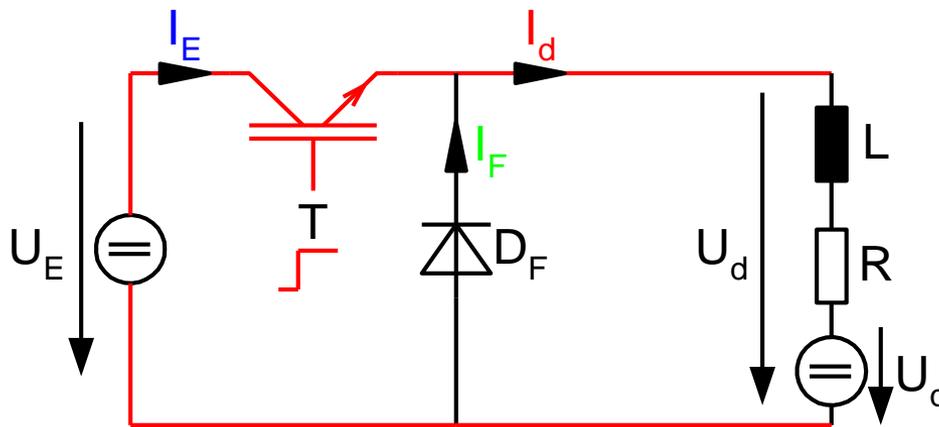
# Tiefsetzsteller

- Annahmen:
- $L$  groß  $\Rightarrow I_d$  immer  $> 0A$
- Diode ideal  $\Rightarrow U_F = 0V$
  
- Stromkurven hier als Geradenstücke angenähert



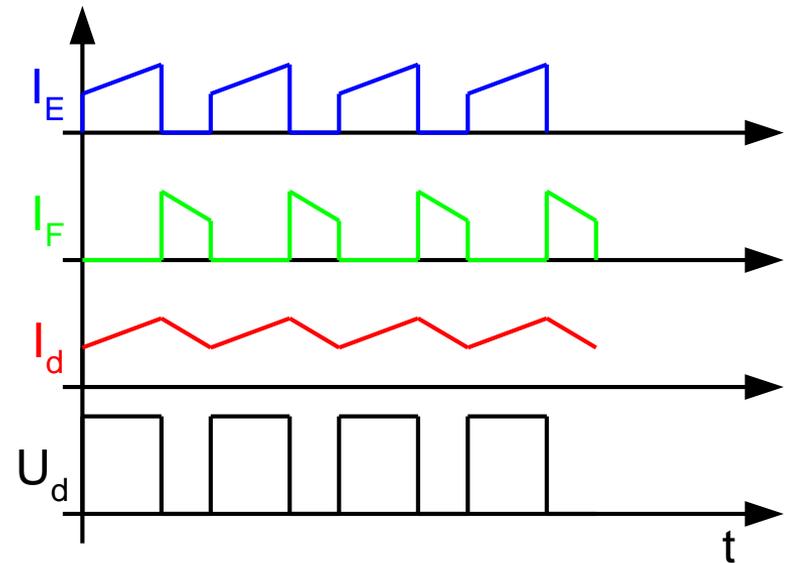
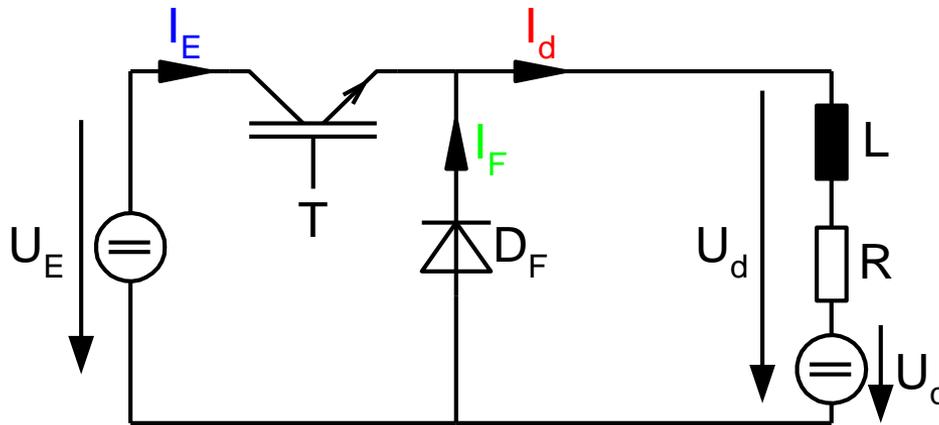
# Tiefsetzsteller

- Annahmen:
- $L$  groß  $\Rightarrow I_d$  immer  $> 0A$
- Diode ideal  $\Rightarrow U_F = 0V$
  
- Stromkurven hier als Geradenstücke angenähert



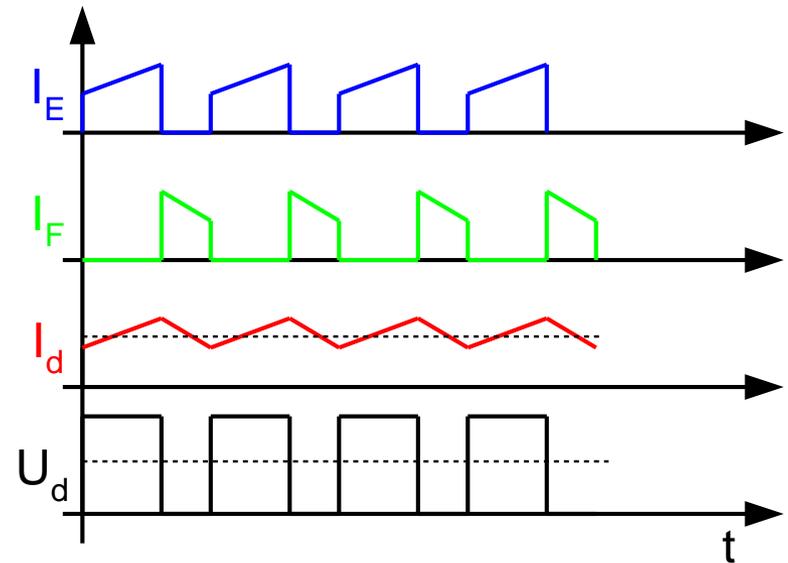
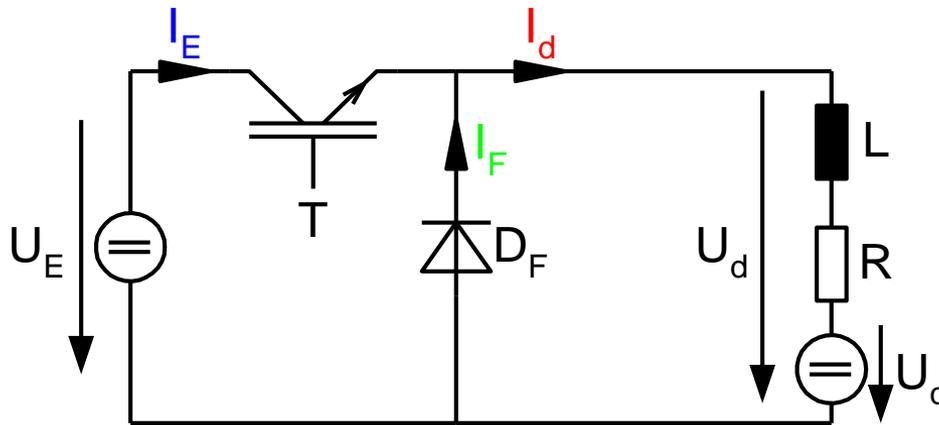
# Tiefsetzsteller

- Annahmen:
- $L$  groß  $\Rightarrow I_d$  immer  $> 0A$
- Diode ideal  $\Rightarrow U_F = 0V$
  
- Stromkurven hier als Geradenstücke angenähert



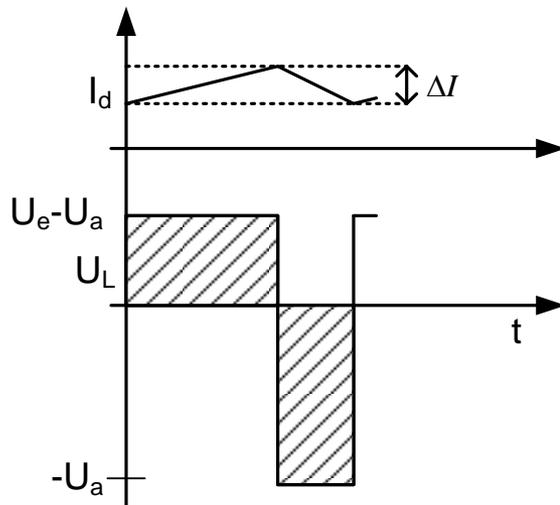
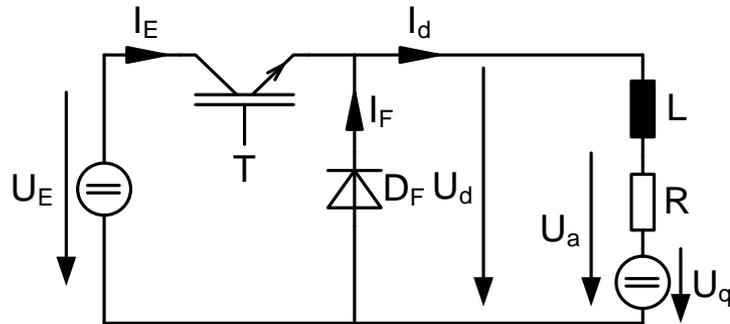
# Tiefsetzsteller

- Annahmen:
  - L groß  $\Rightarrow I_d$  immer  $> 0A$
  - Diode ideal  $\Rightarrow U_F = 0V$
- Mittlere Ausgangsspannung:
 
$$U_d = a \cdot U_E$$
 mit: 
$$a = \frac{T_{ein}}{T}$$
- Stromkurven hier als Geradenstücke angenähert



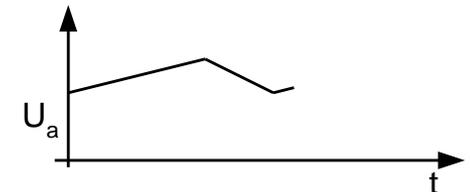
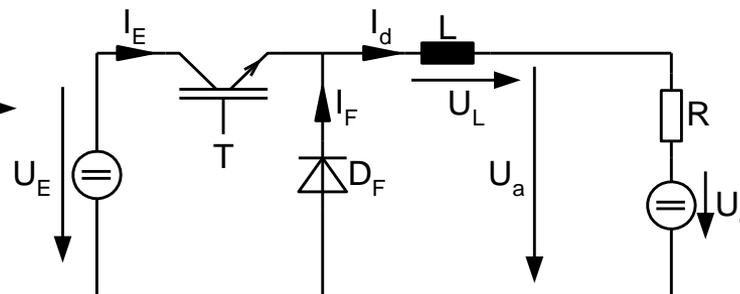
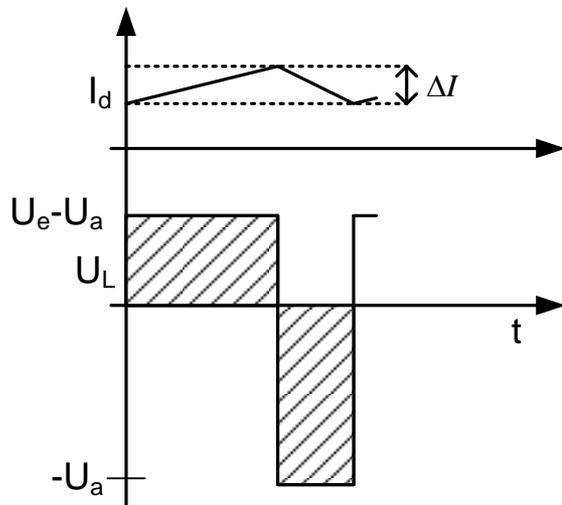
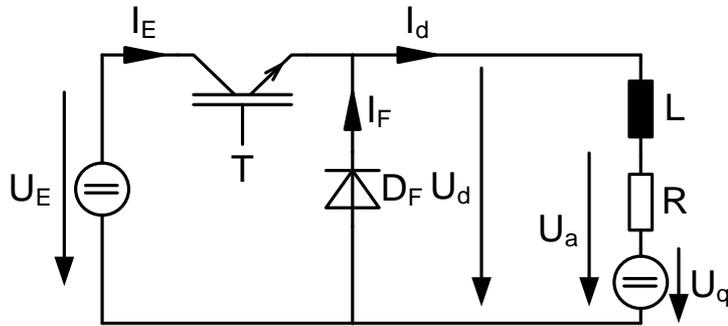
# Tiefsetzsteller

- L wirkt als Filter für die blockförmige Ausgangsspannung (Mittelwert von  $U_L = 0V$ )



# Tiefsetzsteller

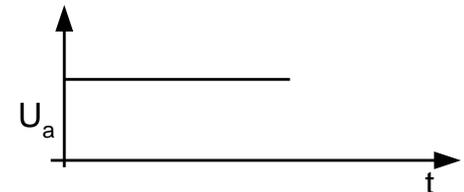
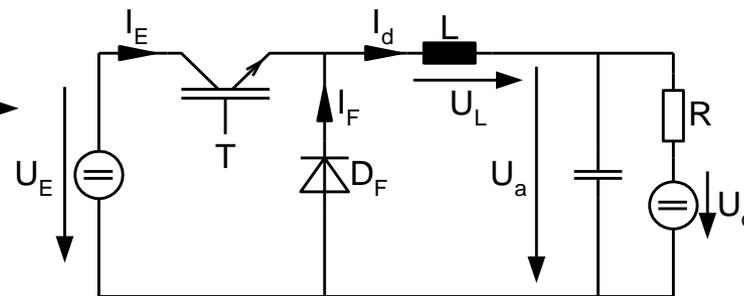
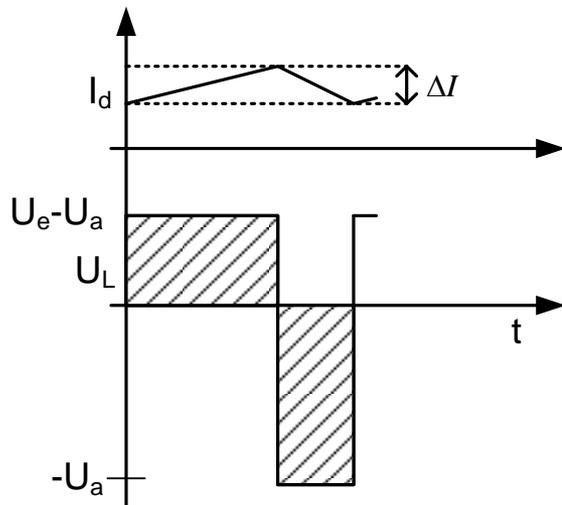
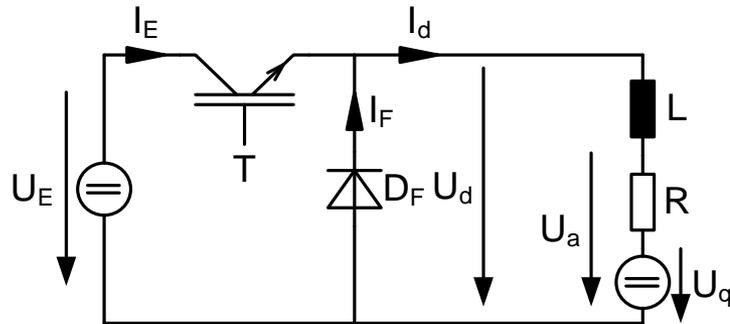
- L wirkt als Filter für die blockförmige Ausgangsspannung (Mittelwert von  $U_L = 0V$ )



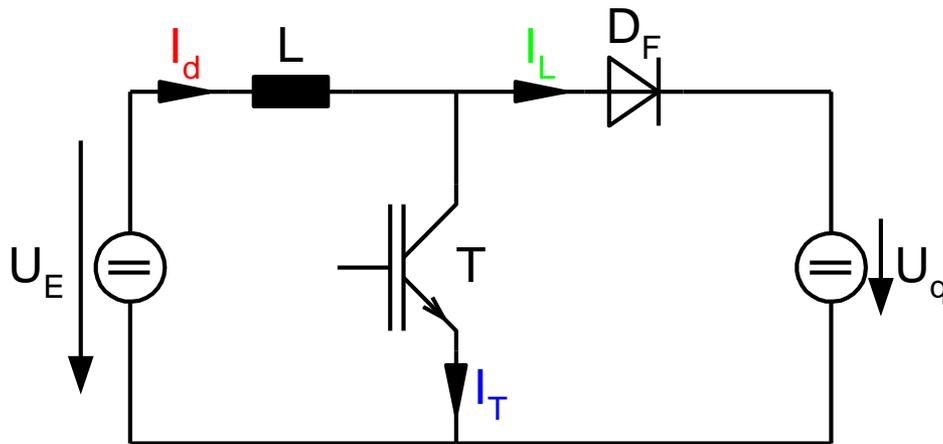
# Tiefsetzsteller

- L wirkt als Filter für die blockförmige Ausgangsspannung (Mittelwert von  $U_L = 0V$ )

Weitere Glättung der Ausgangsspannung durch Einbau eines Kondensators



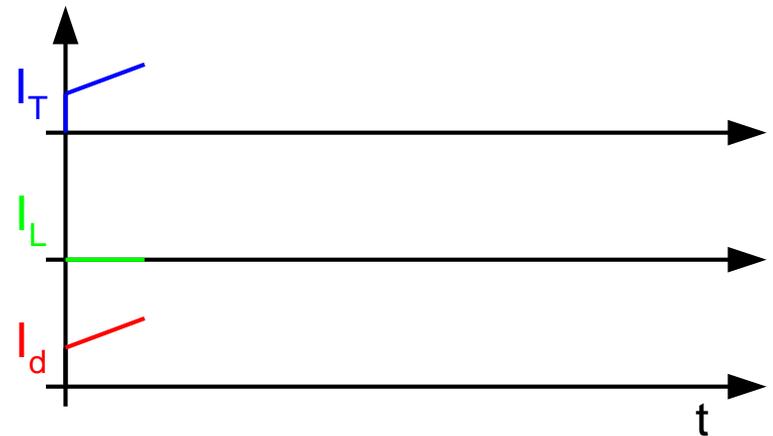
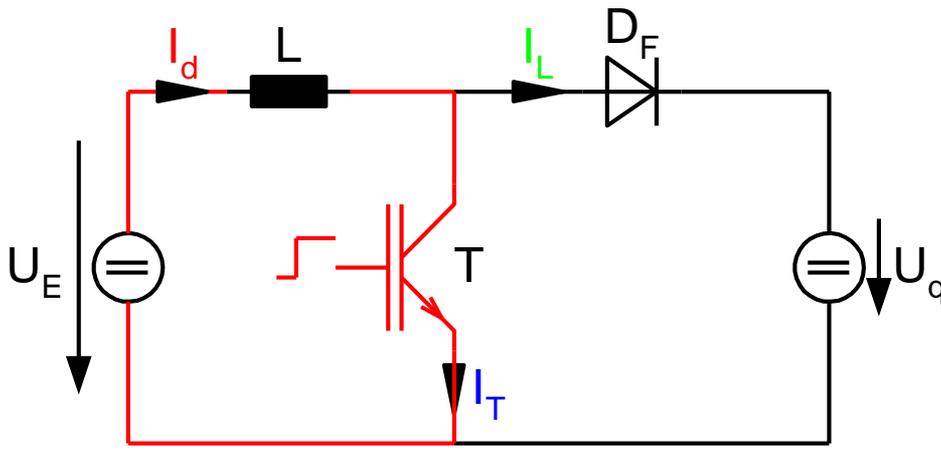
# Hochsetzsteller $U_E < U_q$



# Hochsetzsteller $U_E < U_q$

- Während der Einschaltzeit des Transistors wird der Strom in der Drossel aufgebaut:

$$\Delta I_d = U_E \cdot \frac{T_{ein}}{L}$$



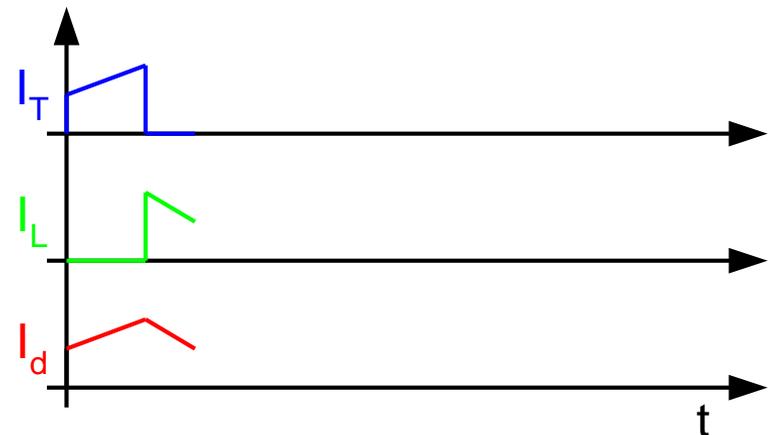
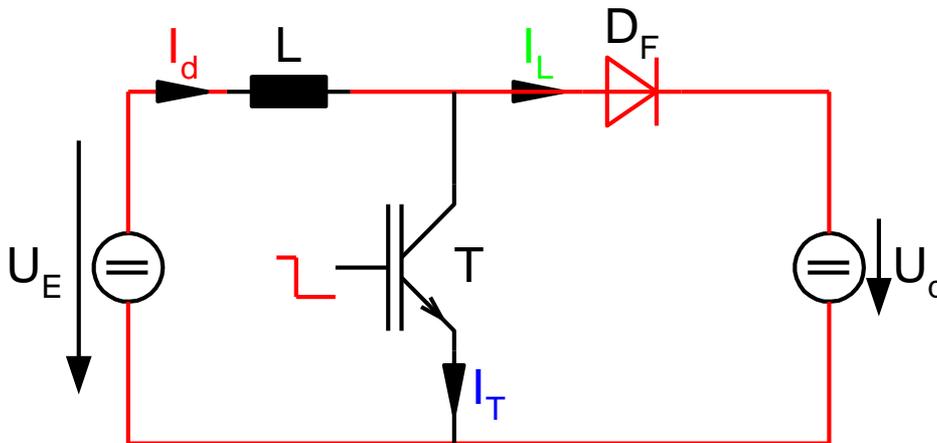
# Hochsetzsteller $U_E < U_q$

- Während der Einschaltzeit des Transistors wird der Strom in der Drossel aufgebaut:

$$\Delta I_d = U_E \cdot \frac{T_{ein}}{L}$$

- Nach dem Abschalten treibt die Drossel den Strom weiter über die Diode zur Senke. Der Strom baut sich ab:

$$-\Delta I_d = (U_E - U_q) \cdot \frac{T - T_{ein}}{L}$$



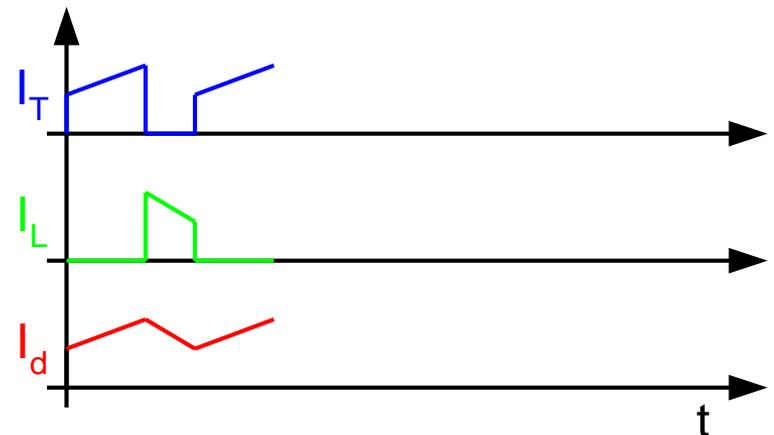
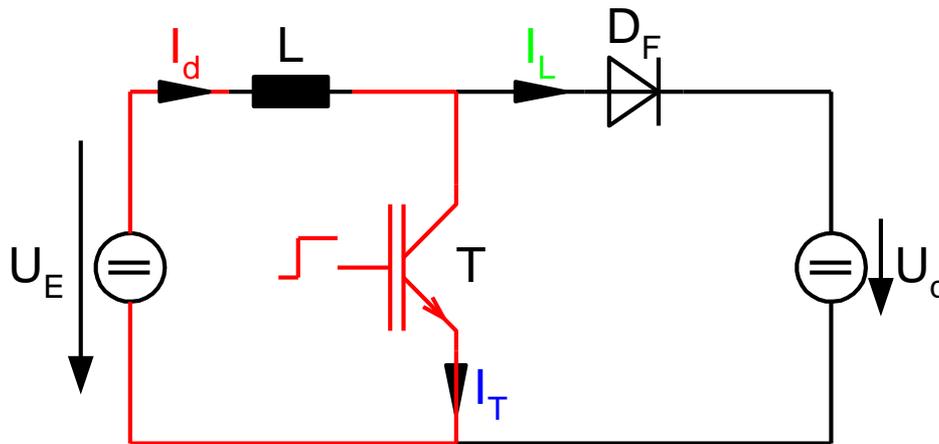
# Hochsetzsteller $U_E < U_q$

- Während der Einschaltzeit des Transistors wird der Strom in der Drossel aufgebaut:

$$\Delta I_d = U_E \cdot \frac{T_{ein}}{L}$$

- Nach dem Abschalten treibt die Drossel den Strom weiter über die Diode zur Senke. Der Strom baut sich ab:

$$-\Delta I_d = (U_E - U_q) \cdot \frac{T - T_{ein}}{L}$$



# Hochsetzsteller $U_E < U_q$

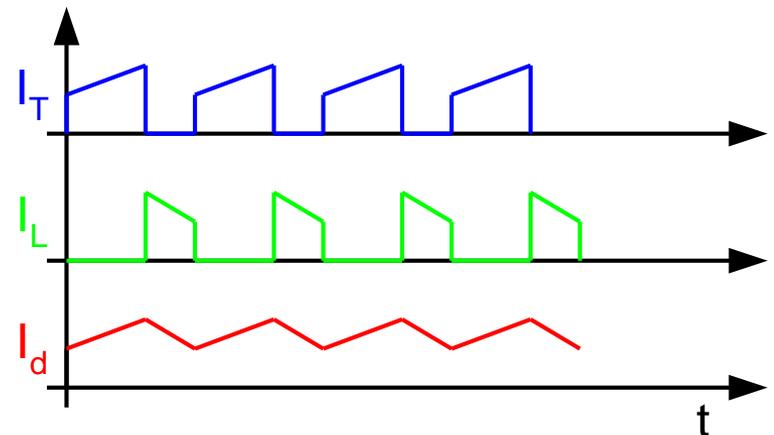
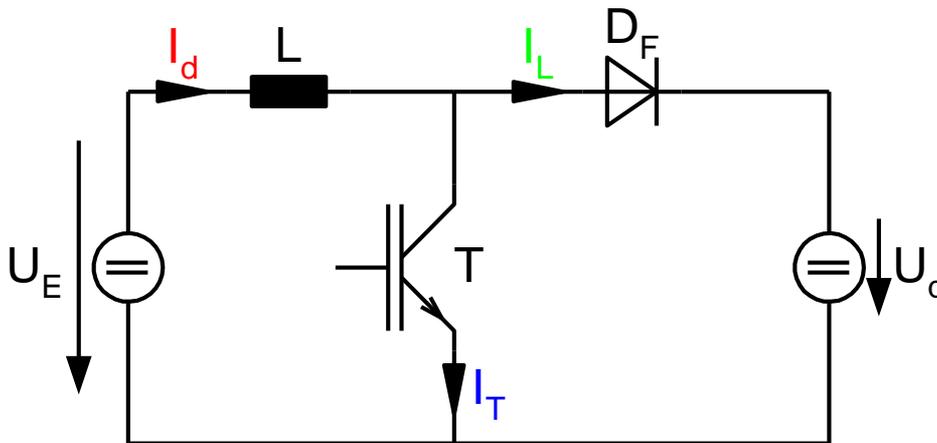
- Während der Einschaltzeit des Transistors wird der Strom in der Drossel aufgebaut:

$$\Delta I_d = U_E \cdot \frac{T_{ein}}{L}$$

- Nach dem Abschalten treibt die Drossel den Strom weiter über die Diode zur Senke. Der Strom baut sich ab:

$$-\Delta I_d = (U_E - U_q) \cdot \frac{T - T_{ein}}{L}$$

$$\Rightarrow U_q = U_E \frac{1}{1-a}$$

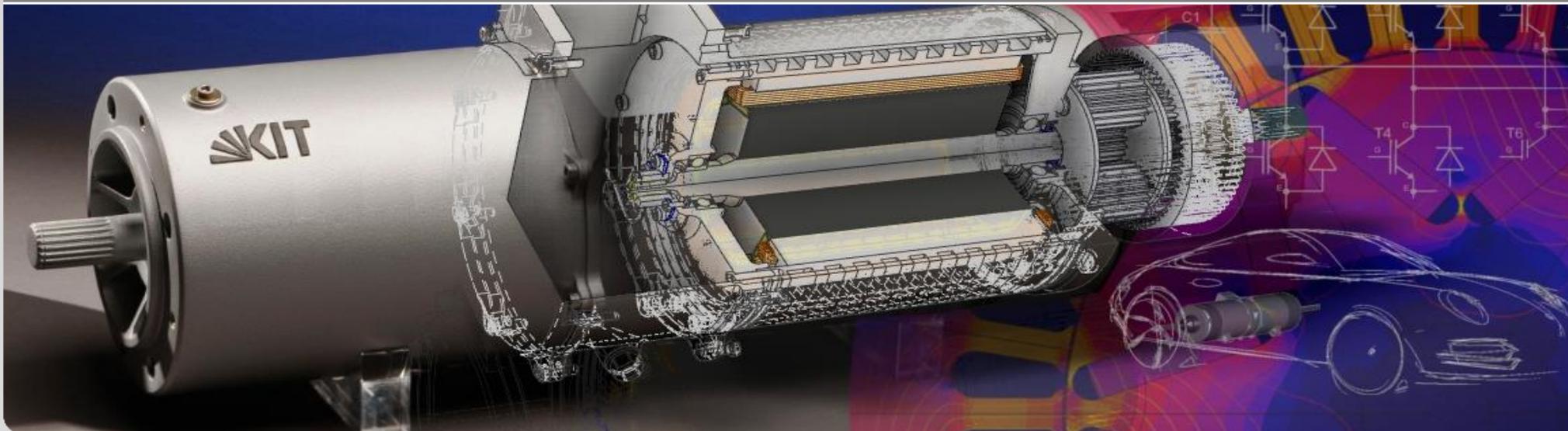


# Übung zur Vorlesung Elektrische Maschinen und Stromrichter

## 14. Übung – selbstgeführte Drehstrombrücke

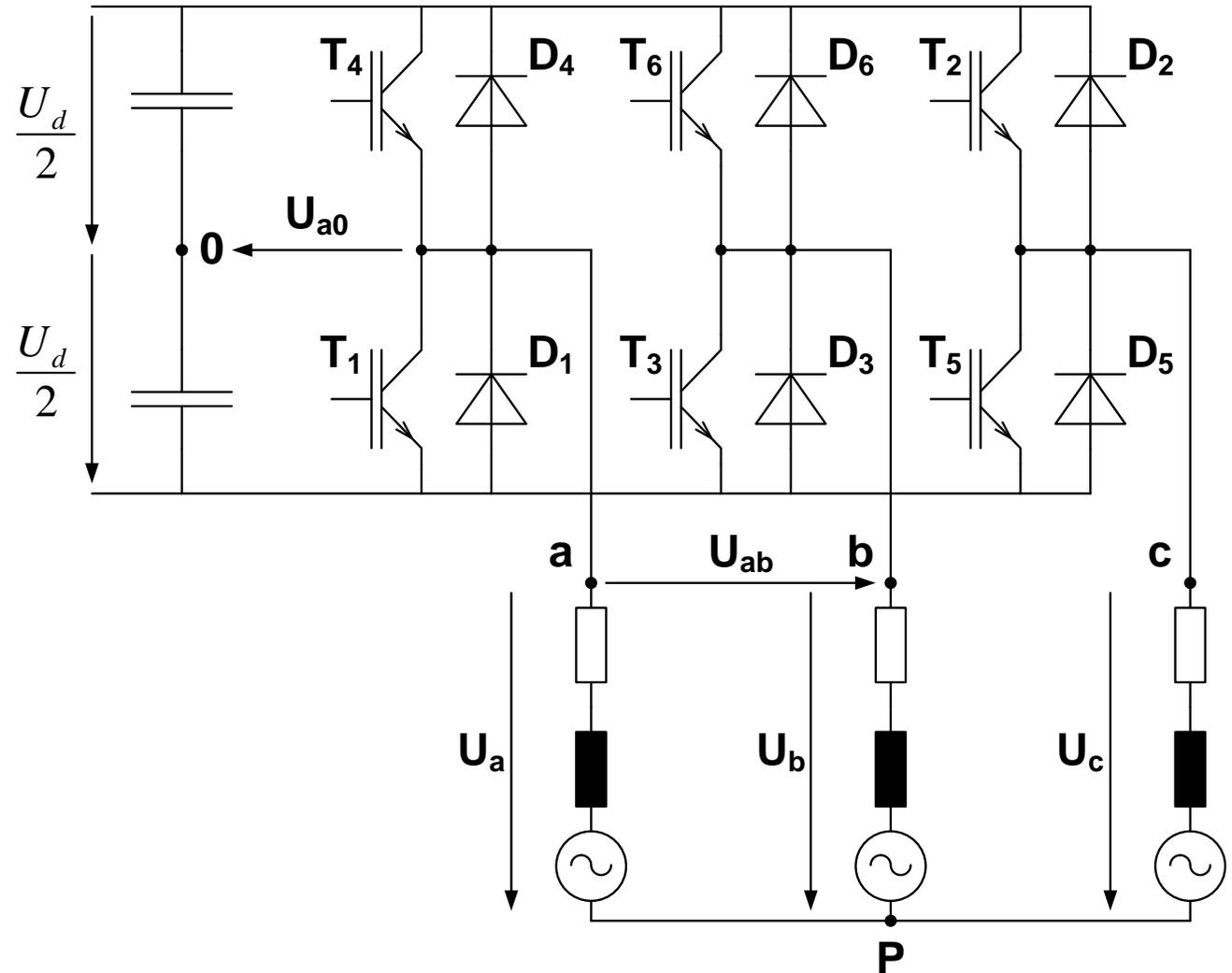
Daniel Bernet

Elektrotechnisches Institut – Elektrische Antriebe und Leistungselektronik



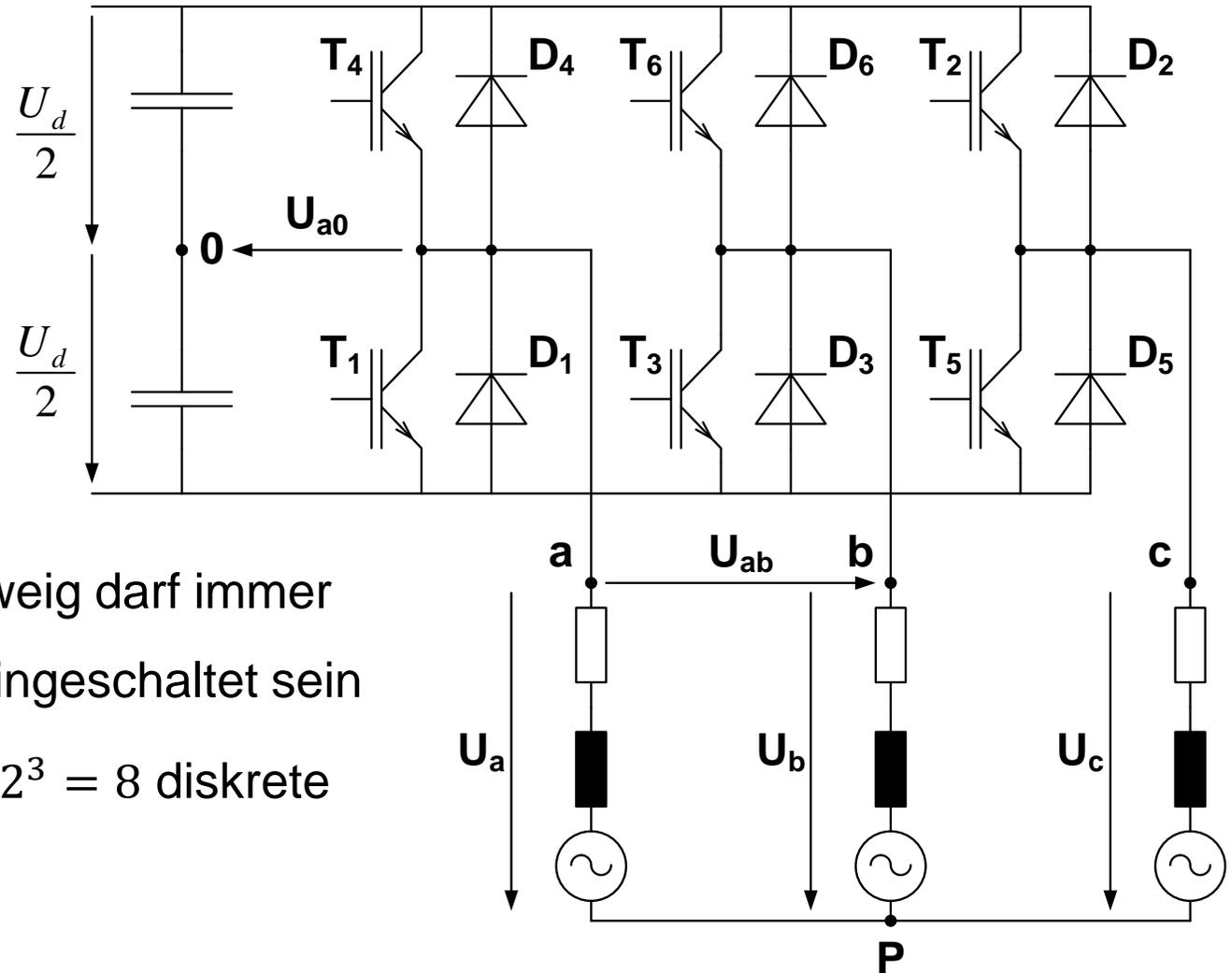
# Selbstgeführte Drehstrombrücke

## Schaltbild



# Selbstgeführte Drehstrombrücke

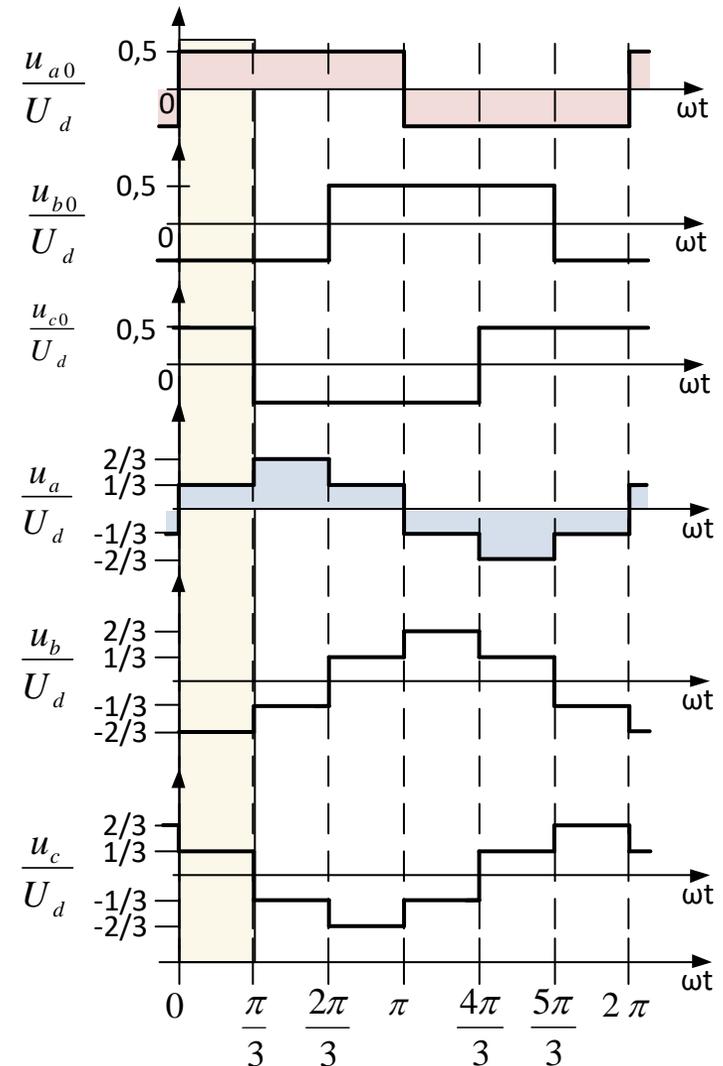
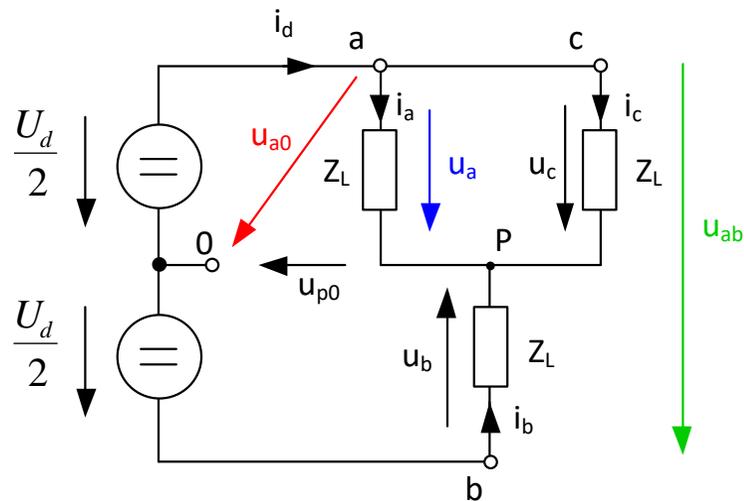
## Schaltbild



- In jedem Brückenzweig darf immer nur ein Transistor eingeschaltet sein
- Dann ergeben sich  $2^3 = 8$  diskrete Schaltzustände

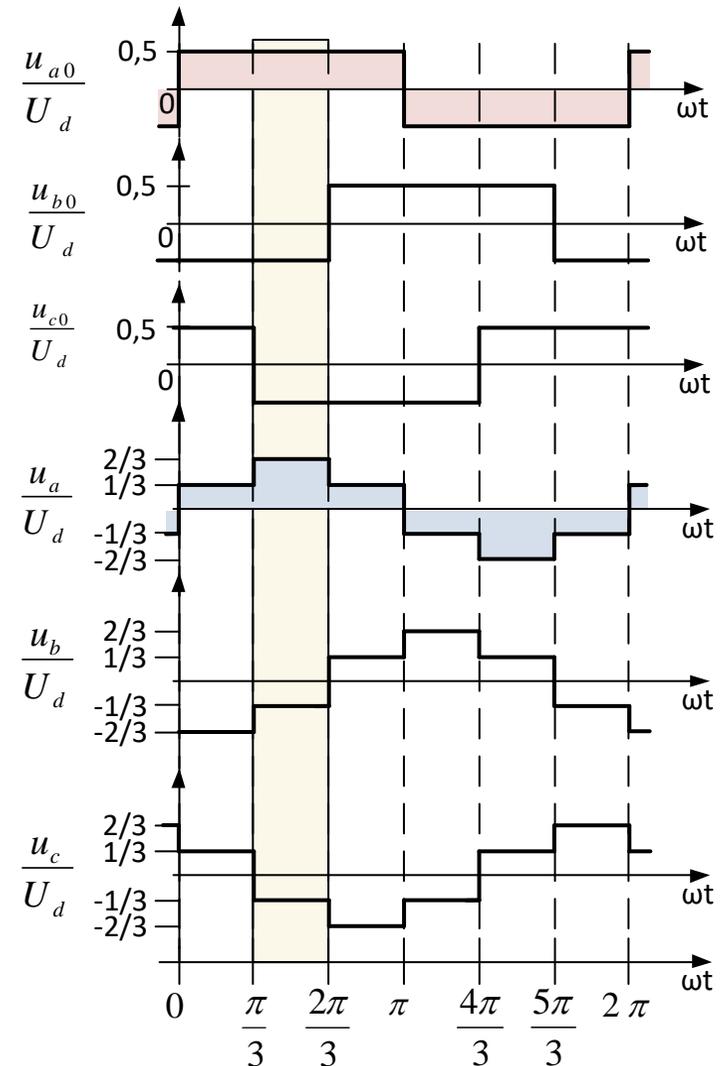
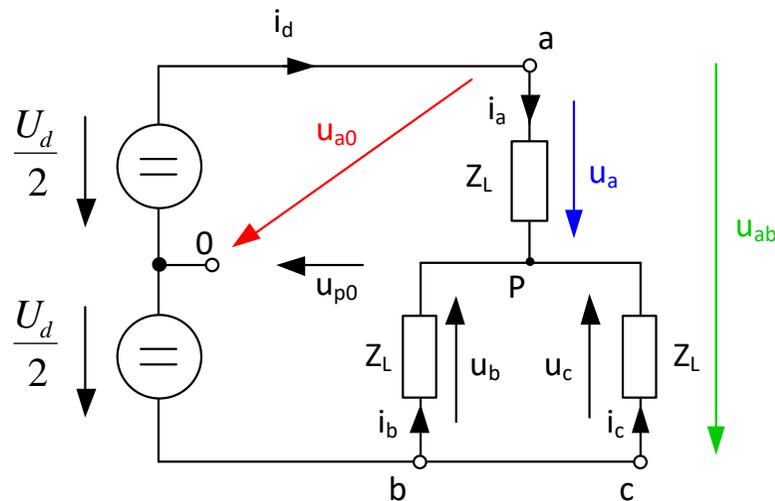
# Blocktaktung (1)

- Blockförmige Spannungen am Ausgang
- Die Amplitude der Ausgangsspannungen ist nicht einstellbar



# Blocktaktung (2)

- Blockförmige Spannungen am Ausgang
- Die Amplitude der Ausgangsspannungen ist nicht einstellbar

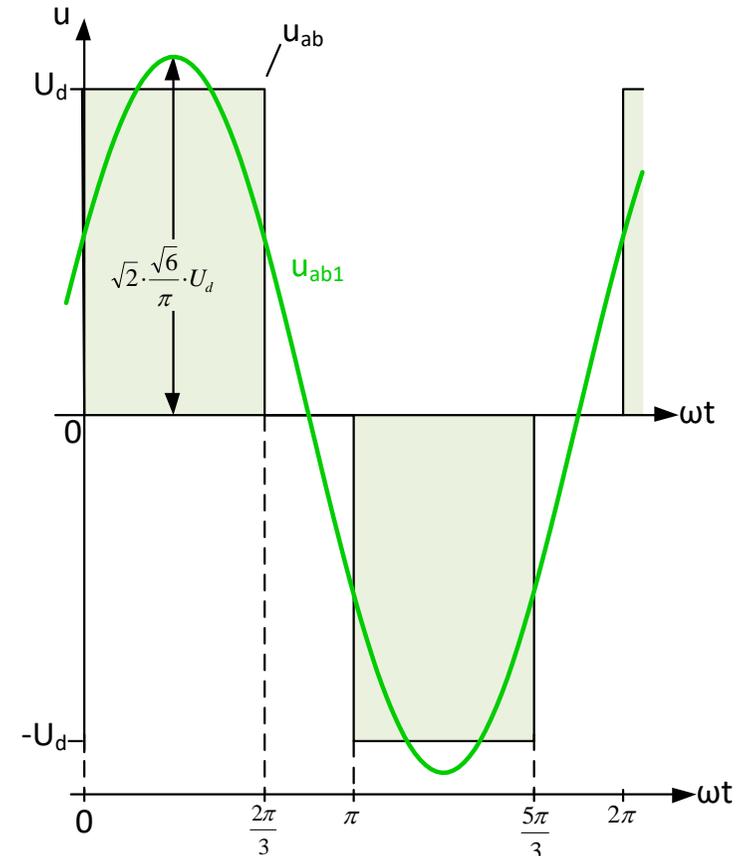


# Blocktaktung: Grundschiwingung

- Zur Drehmomenterzeugung in einer Drehfeldmaschine tragen nur die Grundschiwingungen von Strom und Spannung bei
- Grundschiwingung der Außenleiterspannung bei Blocktaktung:

- $\hat{U} = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_d$

- $U_{eff} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_d$



# Raumzeigerdarstellung (1)

- Rechnerische Transformation von drei (Strang-)größen in eine komplexe Größe

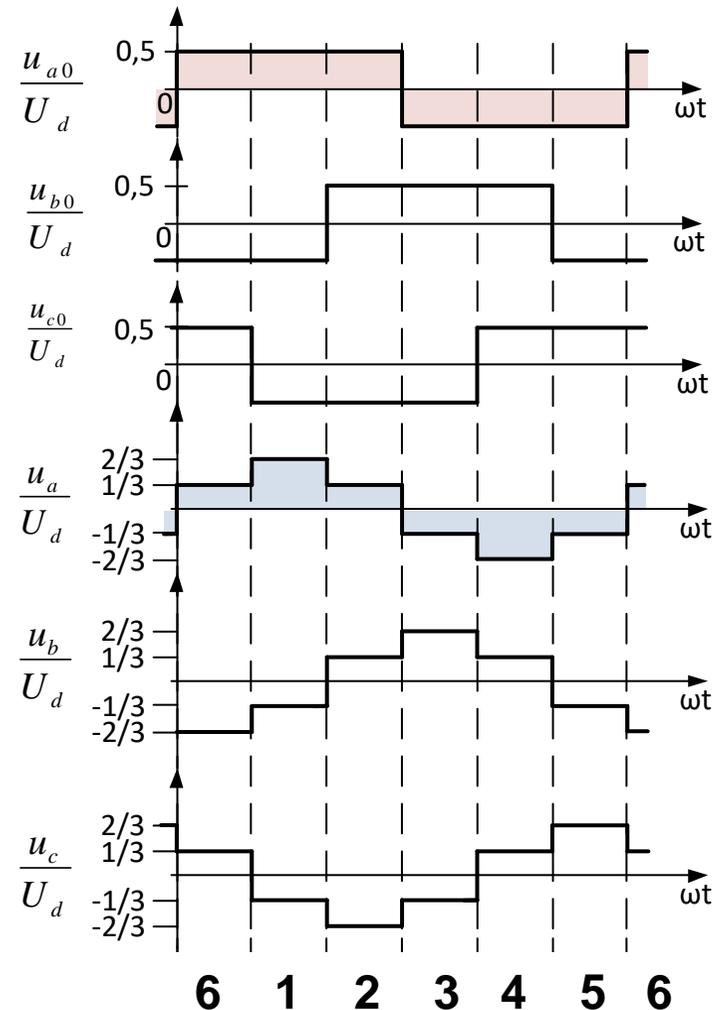
- $\underline{u} = \frac{2}{3} \cdot (u_1 + \underline{a} \cdot u_2 + \underline{a}^2 \cdot u_3)$

- mit:  $\underline{a} = e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$

- Beispielberechnungen:

- Z1:  $\underline{u}_1 = \frac{2}{3} U_d \left( \frac{2}{3} - \frac{1}{3} \underline{a} - \frac{1}{3} \underline{a}^2 \right) = \frac{2}{3} U_d$

- Z3:  $\underline{u}_3 = \frac{2}{3} U_d \left( -\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \underline{a} - \frac{1}{3} \underline{a}^2 \right) = \frac{2}{3} U_d e^{j \frac{2\pi}{3}}$

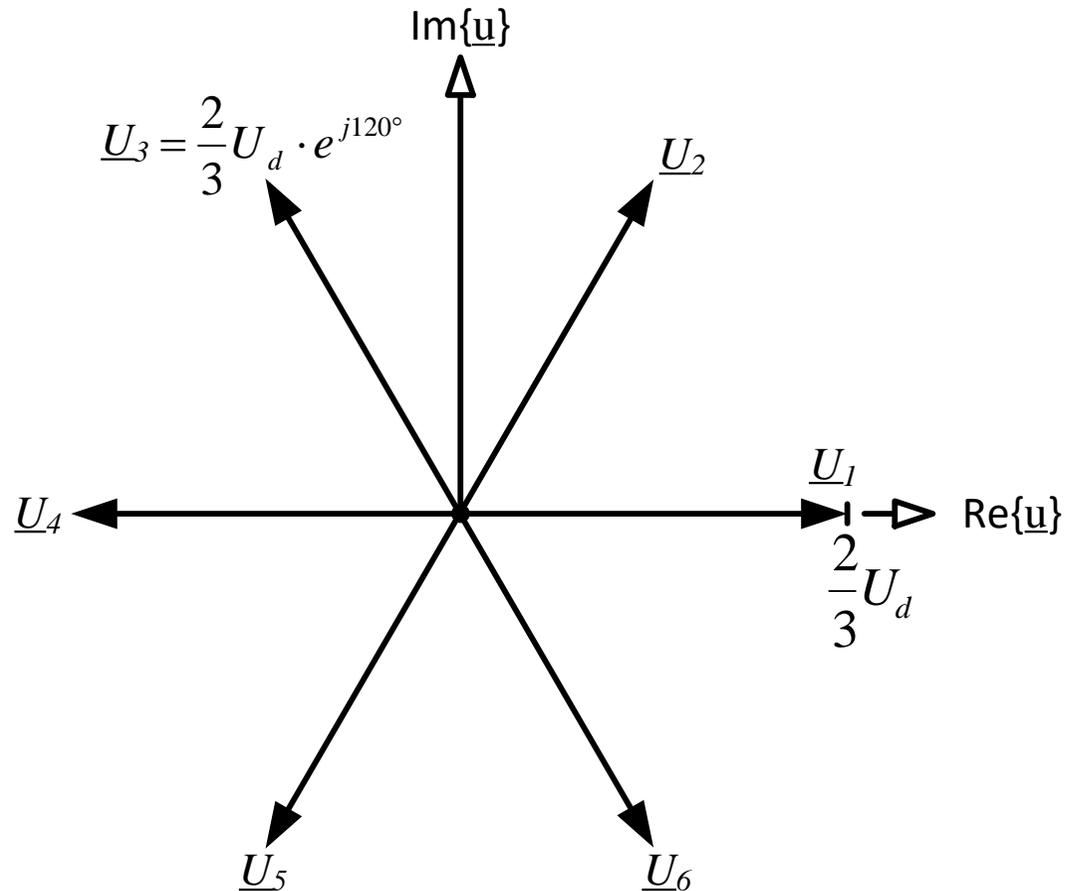


# Raumzeigerdarstellung (2)

Zustand Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{a0}/(U_d/2)$	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1
$U_{b0}/(U_d/2)$	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1
$U_{c0}/(U_d/2)$	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1
$U_x/(2/3 U_d)$	$e^{j0^\circ}$	$e^{j60^\circ}$	$e^{j120^\circ}$	$e^{j180^\circ}$	$e^{j240^\circ}$	$e^{j300^\circ}$	0	0

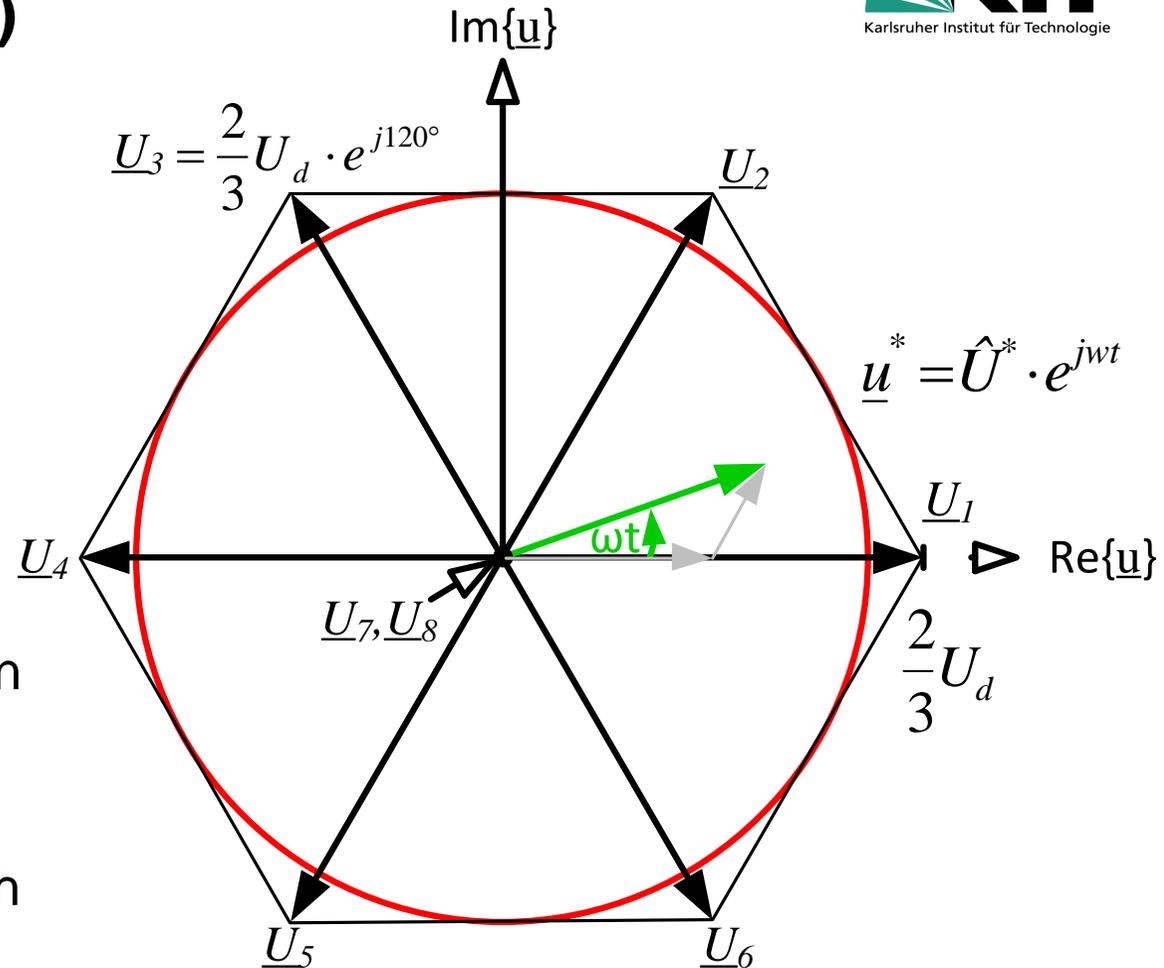
# Raumzeigerdarstellung der Schaltzustände bei Blocktaktung

- Es ergeben sich sechs Raumzeiger für die sechs diskreten Schaltzustände:



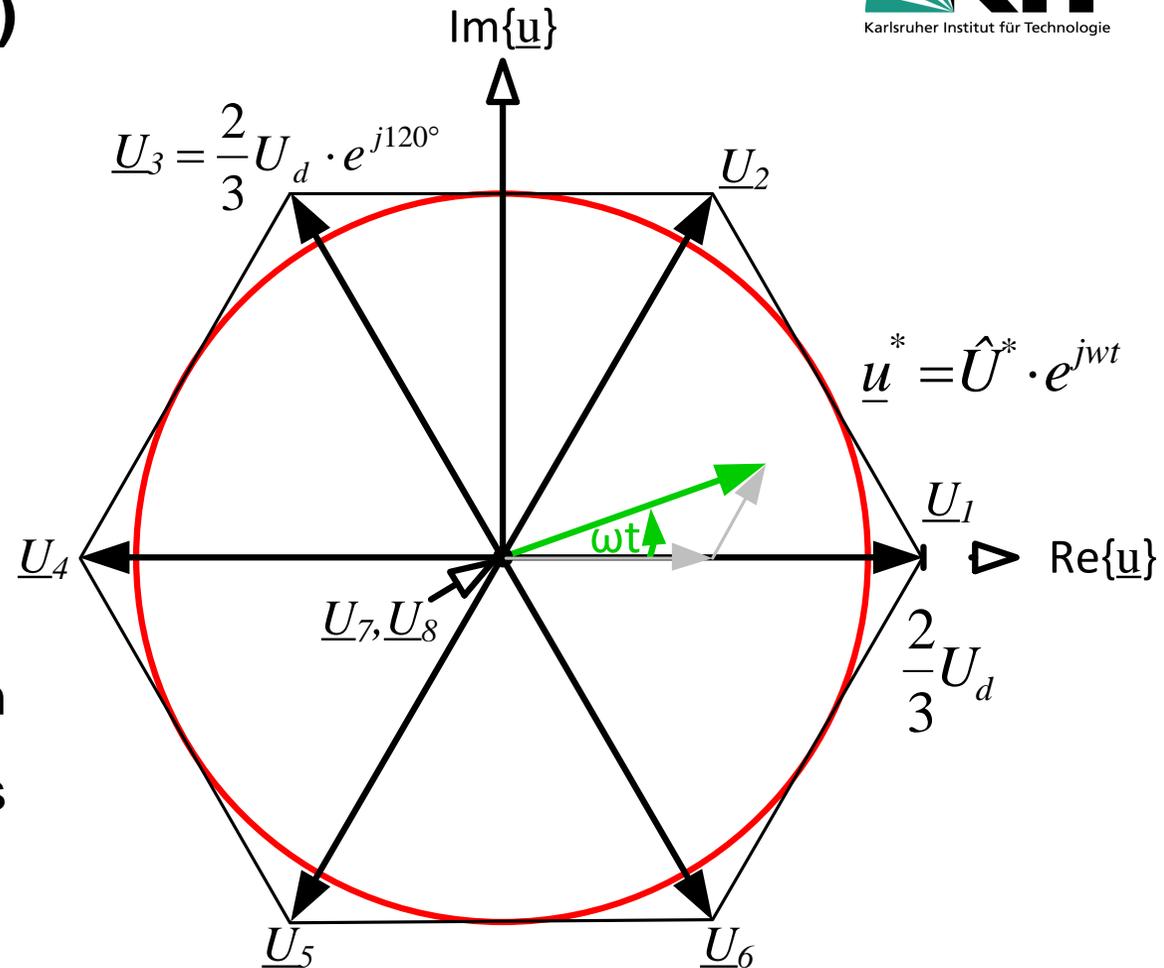
# Raumzeigermodulation (1)

- Einstellen eines beliebigen Winkels des gewünschten Raumzeigers durch Mittelwertbildung (schnelles Umschalten) zwischen zwei benachbarten Schaltzuständen
- Verkürzen der Amplitude durch zusätzliche Verwendung der Freilaufzustände



## Raumzeigermodulation (2)

- Es können alle Raumzeiger innerhalb des aufgespannten Sechsecks erreicht werden
- Für sinusförmige Ausgangsspannungen können alle Raumzeiger innerhalb des Innkreises erreicht werden.
- Durch den Vorfaktor  $\frac{2}{3}$  in der Raumzeigerdefinition wird erreicht, dass die Länge des Raumzeigers der Amplitude der einzelnen Strangspannungen entspricht



# Grundschiwingung bei Raumzeigermodulation

- Der Radius des Innkreises beträgt  $\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_d$
- Die Amplitude der Strangspannungen beträgt damit ebenfalls  $\hat{U}_S = \frac{U_d}{\sqrt{3}}$
- Effektivwert der Außenleiterspannungen:

$$U_L = \frac{U_d}{\sqrt{2}}$$

- Zum Vergleich: Effektivwert bei Blocktaktung:  $U_L = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_d$

