

# 1. EMS-Übung

14.04.2015

Dipl.-Ing. Mario Gommeringer

Elektrotechnisches Institut (ETI)

## Einführung

# Formales

- Mario Gommeringer
  - Raum 118, ETI, Geb. 11.10
  - E-Mail: [mario.gommeringer@kit.edu](mailto:mario.gommeringer@kit.edu)
  - keine ausgewiesene Sprechstunde
- Übungsblätter sind als PDF auf den Internetseiten des ETI abrufbar.
  - [http://www.eti.kit.edu/studium\\_uebung\\_ems.php](http://www.eti.kit.edu/studium_uebung_ems.php)
  - Bitte zukünftig selbst ausdrucken
- Die in der Übung gezeigten Folien werden ebenfalls nach der jeweiligen Übung zum Download bereitgestellt

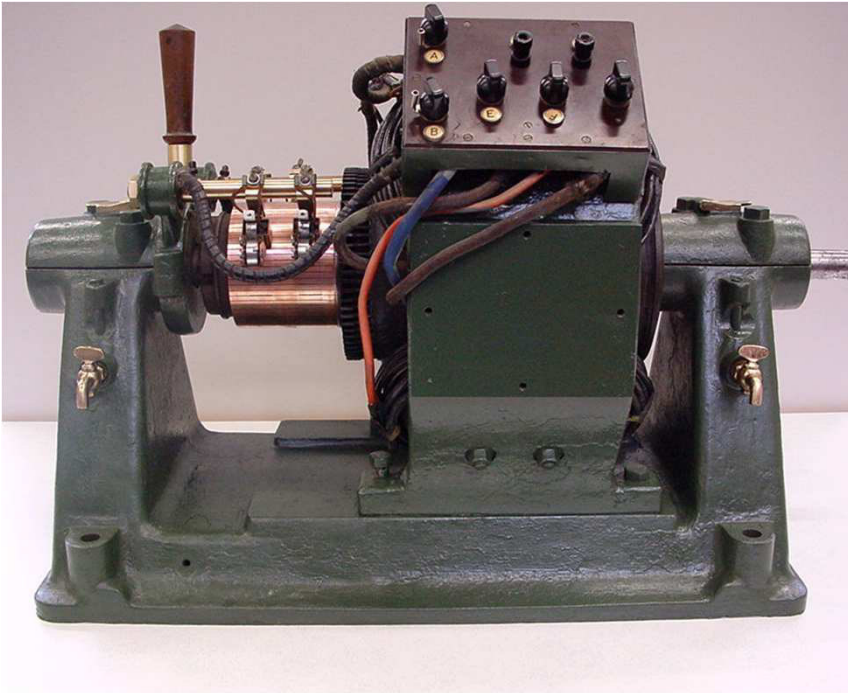
# Aufgaben & Lösungen

- Durchgehende Nummerierung der Aufgaben
- Bearbeitung der Aufgaben teilweise wochenübergreifend
- Kurzlösungen werden blockweise zum Download auf der Internetseite bereitgestellt
  - [http://www.eti.kit.edu/studium\\_uebung\\_ems.php](http://www.eti.kit.edu/studium_uebung_ems.php)
- Passwort für Folien und Lösungen:
  - Benutzername: „ems“
  - Passwort: „Polradwinkel“

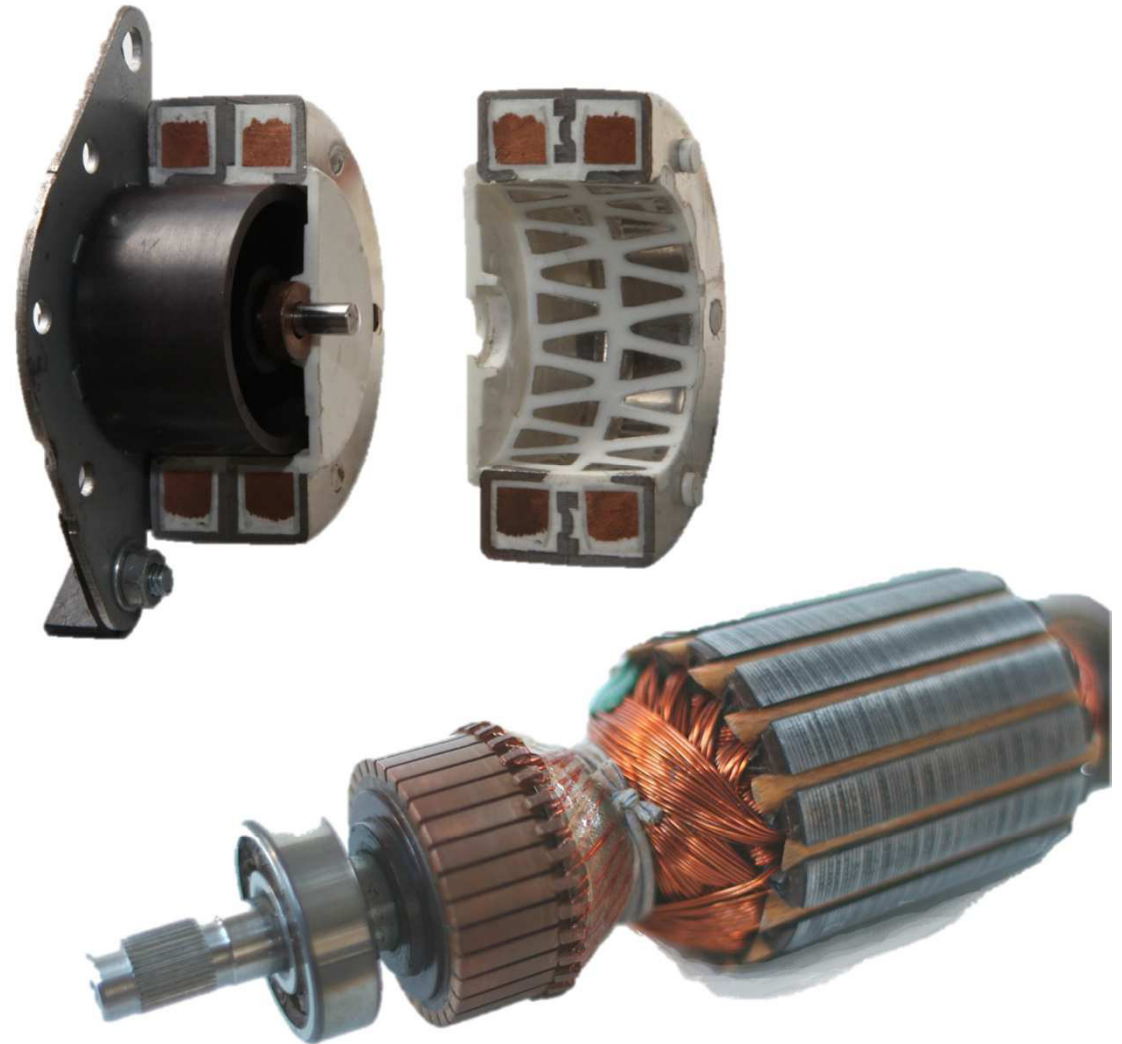
# Klausur

- Termin: 09.10.2015      08:00 Uhr      Dauer 2 Stunden
- Erlaubte Hilfsmittel:
  - Formelsammlung
  - Taschenrechner (nicht programmierbar)
- Schreib-/Zeichenzeug und Papier sind selbst mitzubringen
- Vorbereitung:
  - Besuch der Vorlesung und Übung
  - Rechnen der Übungsaufgaben
  - Rechnen der Klausuraufgaben

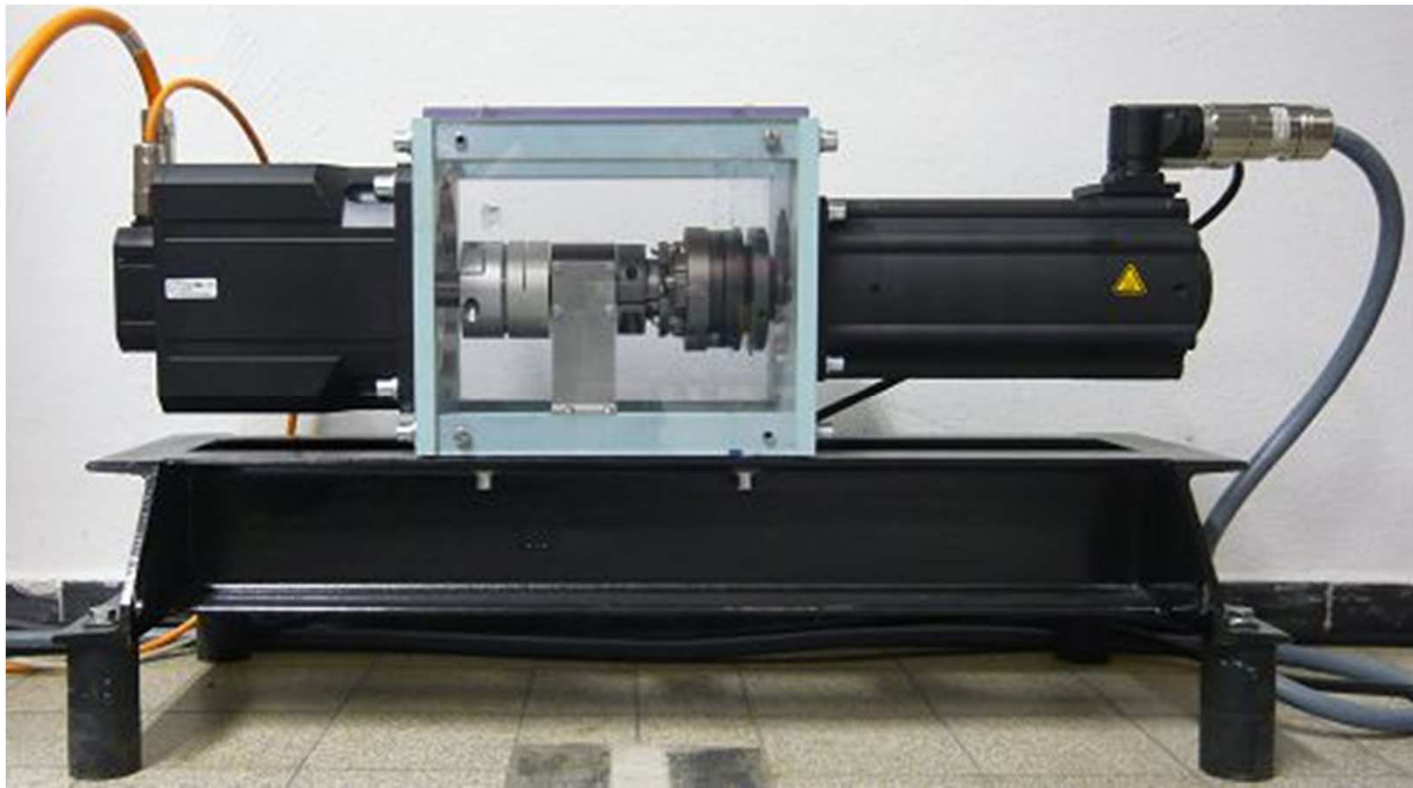
# Elektrische Maschinen



**Antriebstechnik gestern...**



**...und heute**



**Motorprüfstand für permanenterregte Synchronmaschinen**

# Leistungshalbleiter



**IGCT**

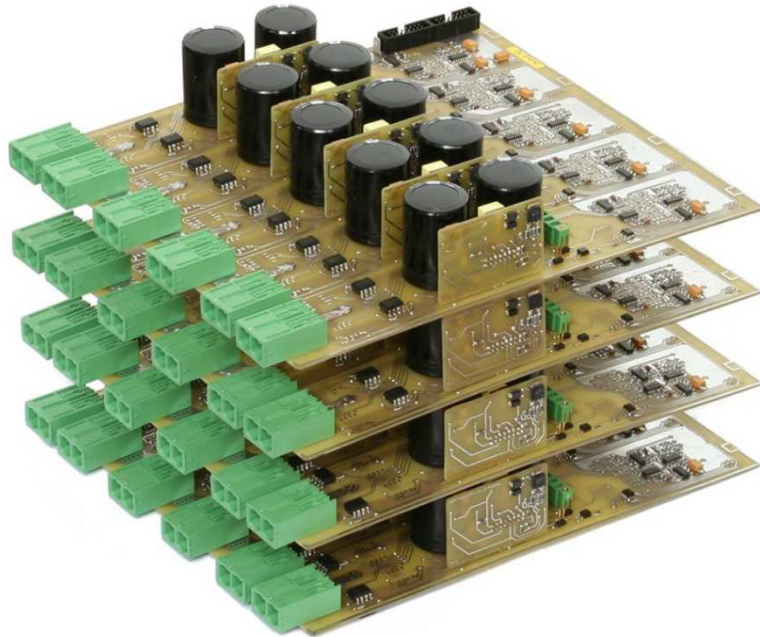


**Thyristor**

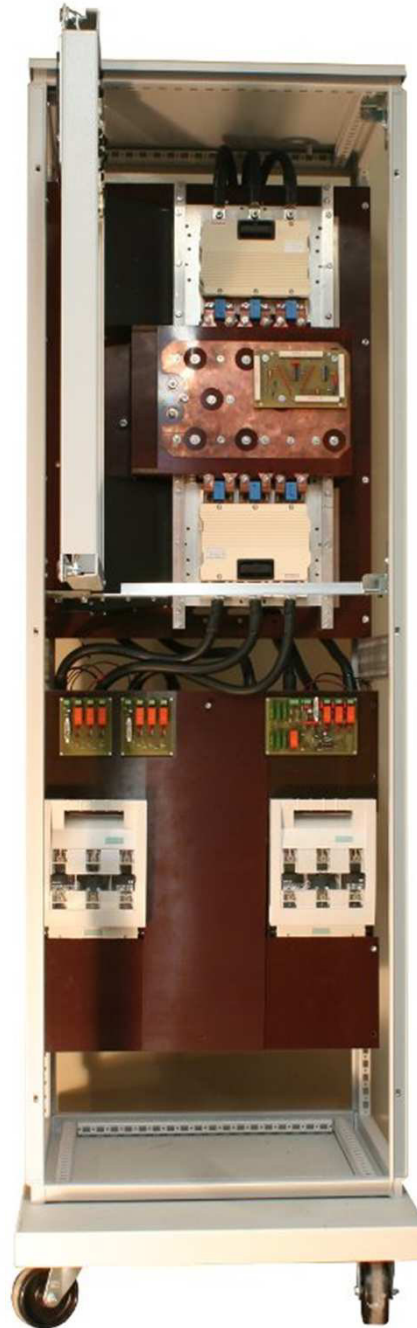


**IGBT**

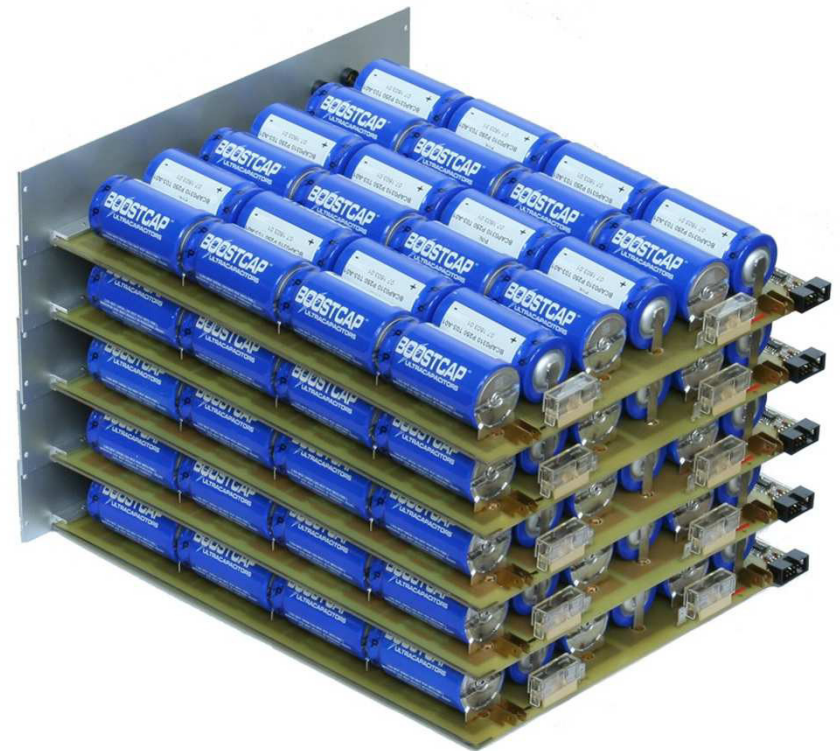
# Stromrichter



**Multilevel-Umrichter**

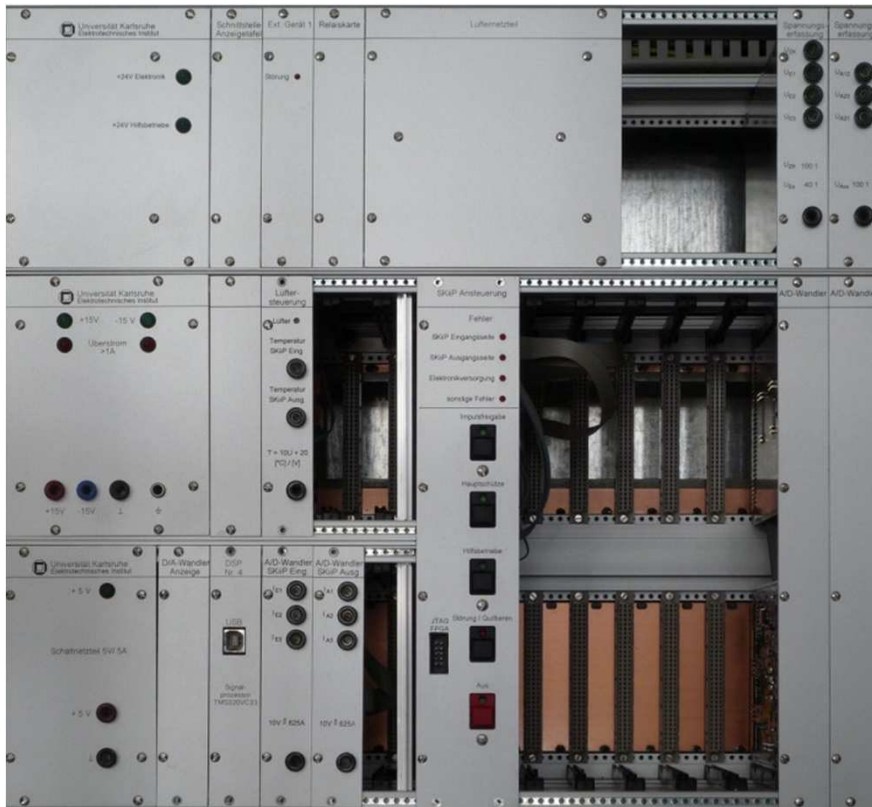


**3AC-DC-3AC  
Umrichter  
mit IGBTs  
(ca. 130kW)**



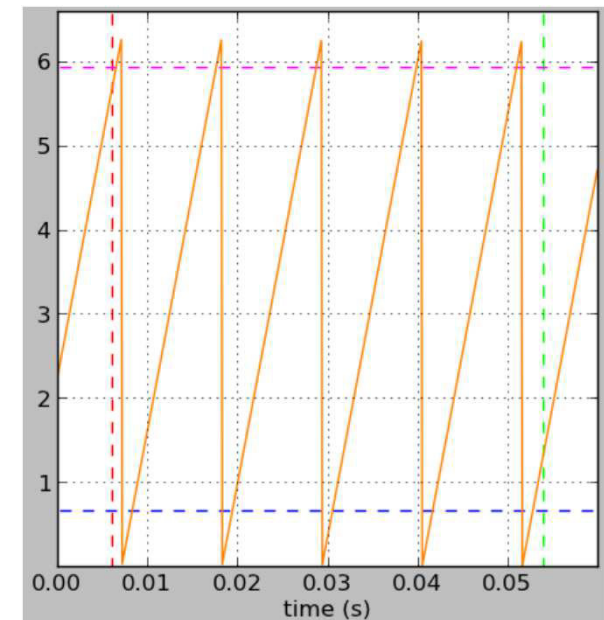
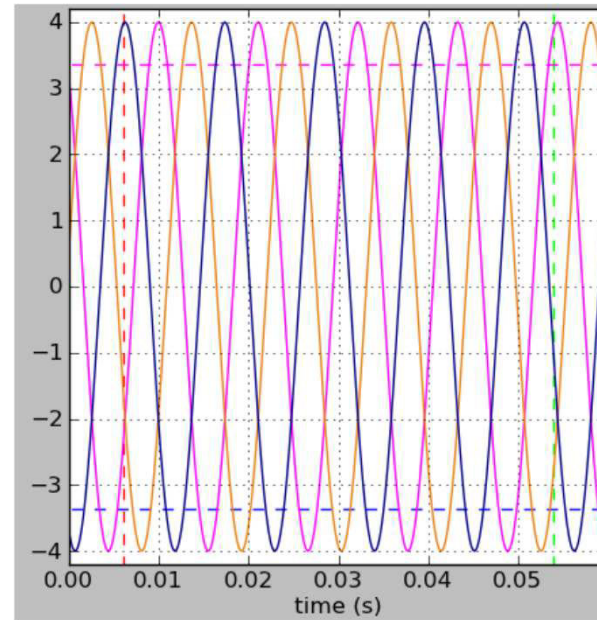
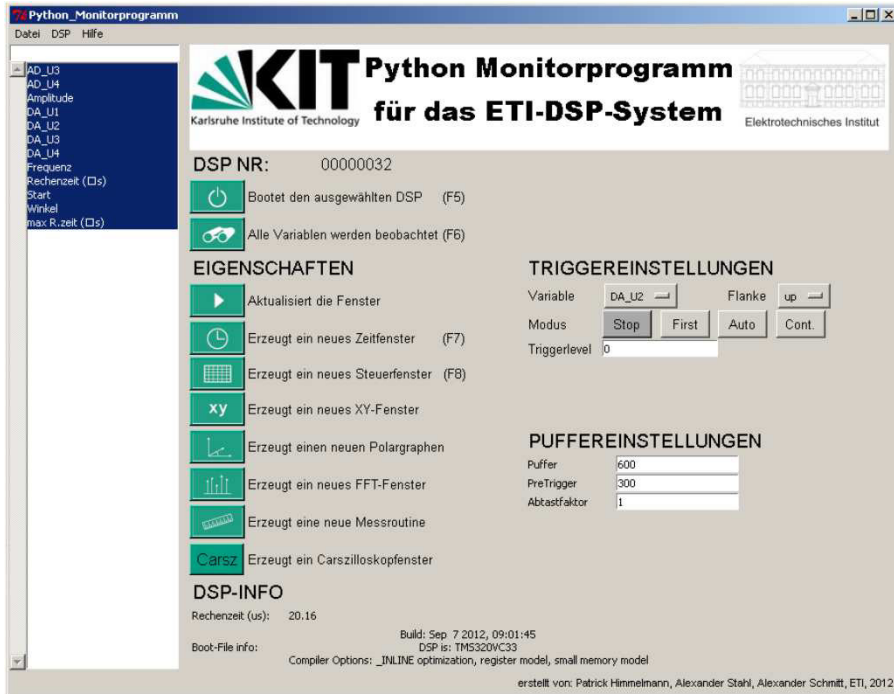
**Energiespeicher mit Doppel-  
schichtkondensatoren**

# Steuerungstechnik



**digitaler Signalprozessor**

# Steuerungstechnik



## Bedienprogramm zur Stromrichtersteuerung

# Formelsymbole

- Zeitveränderliche Größen werden üblicherweise mit Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

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

- Effektivwerte werden mit Großbuchstaben bezeichnet

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

- Komplexe Größen erhalten einen Unterstrich

- z.B. 
$$\underline{I} = I \cdot (\cos(\varphi_I) + j \cdot \sin(\varphi_I))$$

# Formelsymbole

## ■ Index für eindeutige Zuordnung:

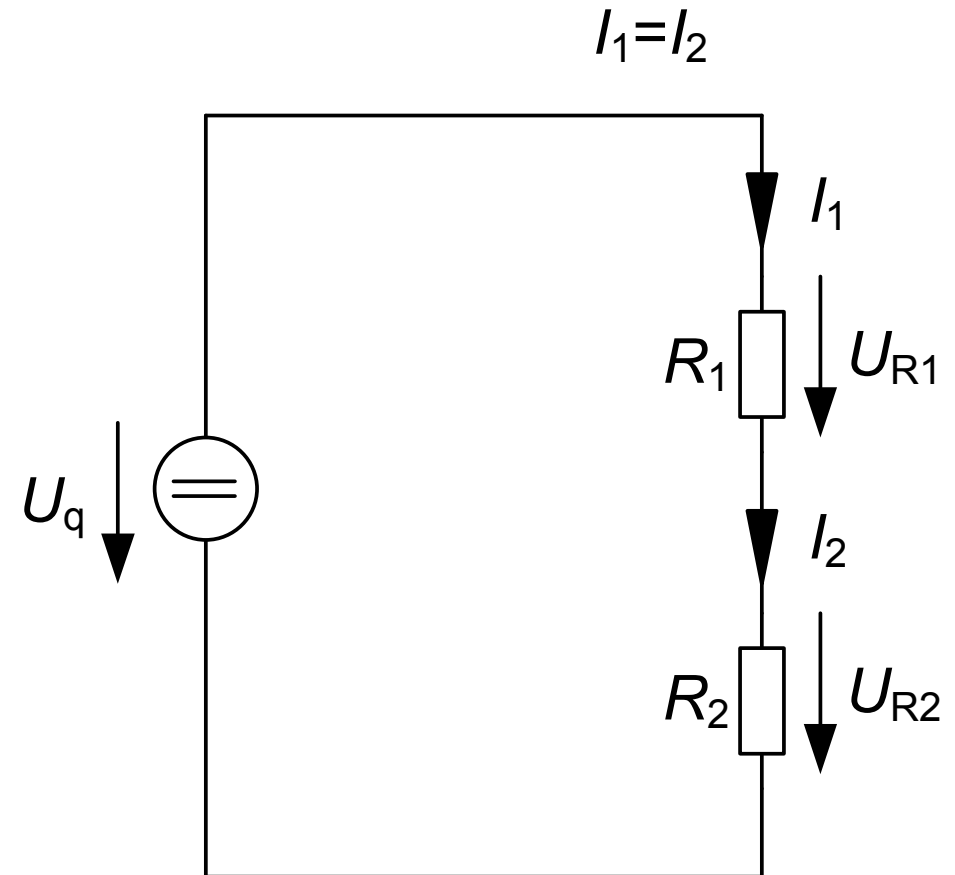
### ■ allgemein:

$$U = R \cdot I$$

### ■ speziell:

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

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



# Formelrechnen mit Zahlenwerten

- Rechnungen immer vollständig mit Einheiten durchführen

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

↑                      ↑      ↑  
physik.           Wert      Einheit  
Größe

- 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.  $I_1 = I_{1N}$

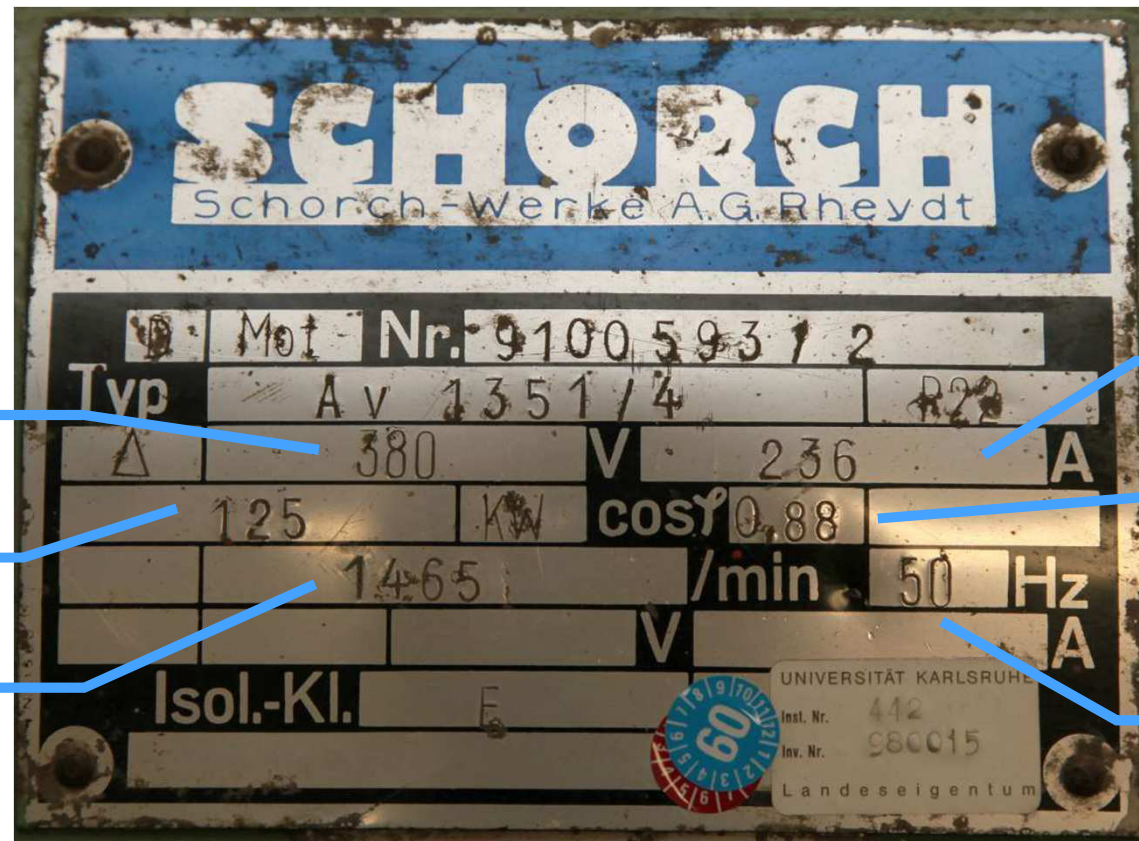
# Nenngrößen

## ■ Typenschild eines Asynchronmotors

Nennspannung

Nennleistung

Nennfrequenz



Nennstrom

Nennleistungs-  
faktor

Nennfrequenz

# Einheiten

- Beim Rechnen auf passende Einheiten achten:

$$n = 3000\text{min}^{-1} = 3000\text{min}^{-1} \cdot \frac{\text{min}}{60\text{s}} = 50\text{s}^{-1} = 50\text{Hz}$$

- Vorsicht: Umrechnen von mechanischer Winkelgeschwindigkeit und Drehzahl:

$$P = M \cdot \Omega \quad \text{mit} \quad \Omega = 2\pi n$$

# Rotatorische Bewegung

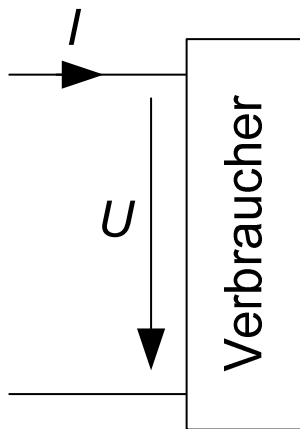
- Für rotatorische Bewegungen gelten im Prinzip die gleichen Zusammenhänge wie für die translatorische Bewegung.
- Größen wie z.B. Kraft oder Masse haben eine entsprechende Größe in den rotatorischen Bewegungsgleichungen wie z.B.: Drehmoment und Trägheitsmoment

# Bewegungsgleichungen

| Translation         |                                     |                               | Rotation                       |                                          |                                 |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|
| Name, Symbol        | Gleichung                           | Einheit                       | Name, Symbol                   | Gleichung                                | Einheit                         |
| Weg $s$             |                                     | m                             | Winkel $\varphi$               |                                          | rad                             |
| Geschwindigkeit $v$ | $v = \frac{ds}{dt}$                 | $\frac{\text{m}}{\text{s}}$   | Winkelgeschw. $\dot{\varphi}$  | $\Omega = \frac{d\varphi}{dt}$           | $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$   |
| Beschleunigung $a$  | $a = \frac{dv}{dt}$                 | $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ | Winkelbeschl. $\ddot{\varphi}$ | $\alpha = \frac{d\Omega}{dt}$            | $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ |
| Masse $m$           |                                     | kg                            | Massenträgheitsmoment $J$      | $J = \int r^2 dm$                        | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$    |
| 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                               |

# Zählpfeilsysteme

## Verbraucherzählpfeilsystem:

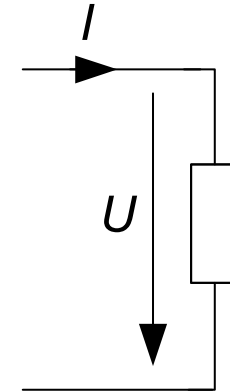


$$P > 0W$$

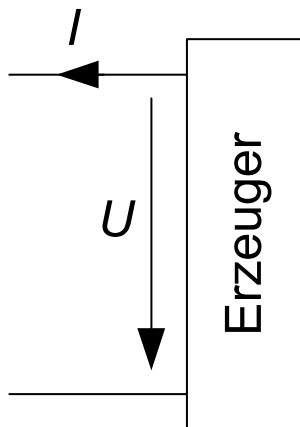
der Verbraucher nimmt Leistung auf

$$P < 0W$$

der Verbraucher gibt Leistung ab



## Erzeugerzählpfeilsystem:

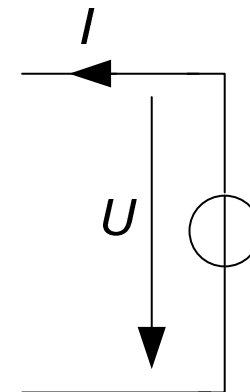


$$P > 0W$$

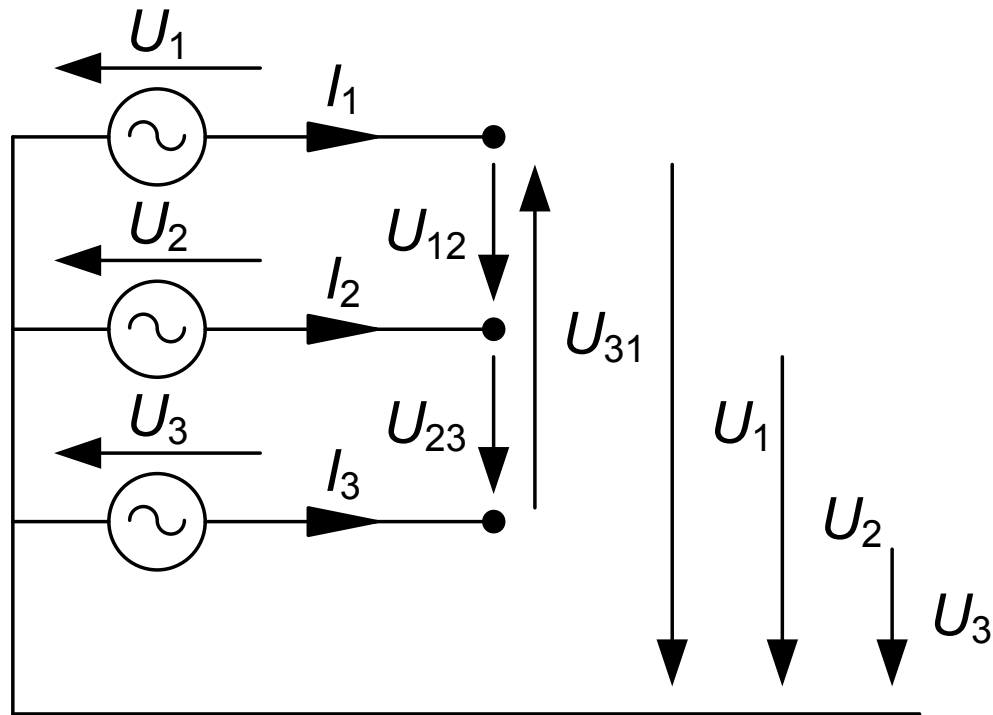
der Erzeuger gibt Leistung ab

$$P < 0W$$

der Erzeuger nimmt Leistung auf

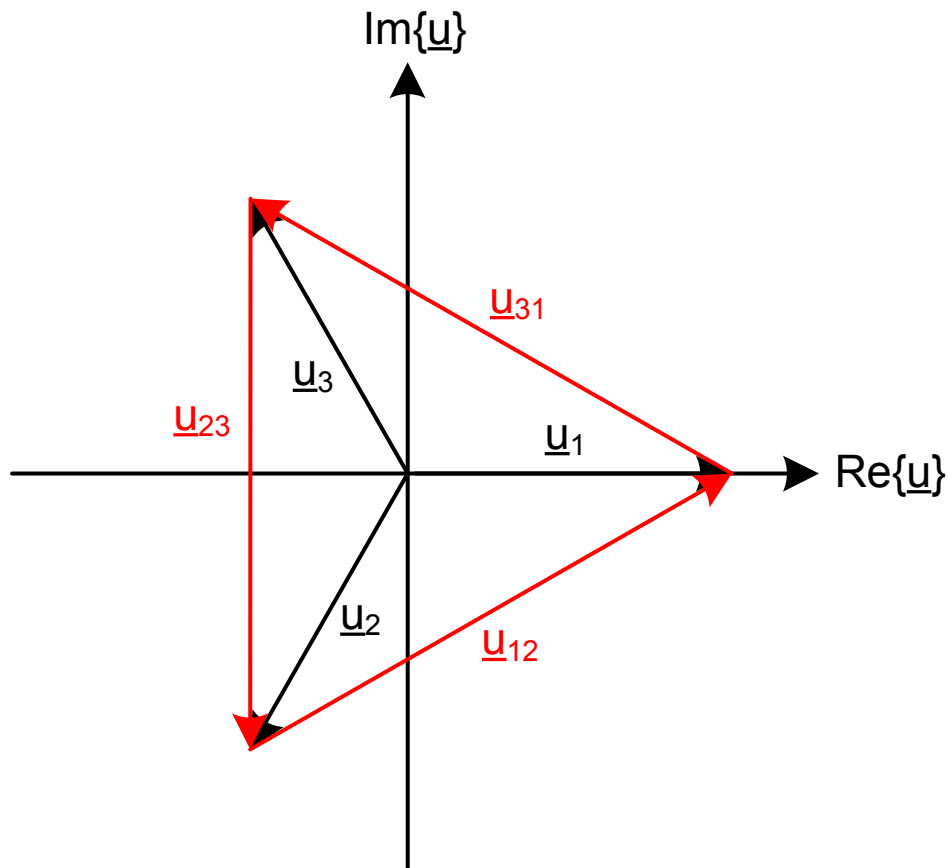


# Drehstrom-/Drehspannungssystem



- 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
- $u_1 + u_2 + u_3 = 0V$
- $u_{12} + u_{23} + u_{31} = 0V$
- Der Strom in einer Phase wird als Strangstrom  $I_S$  bezeichnet.
- $I_S = I_1 = I_2 = I_3$

# Strang- und Leiterspannungen



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

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

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

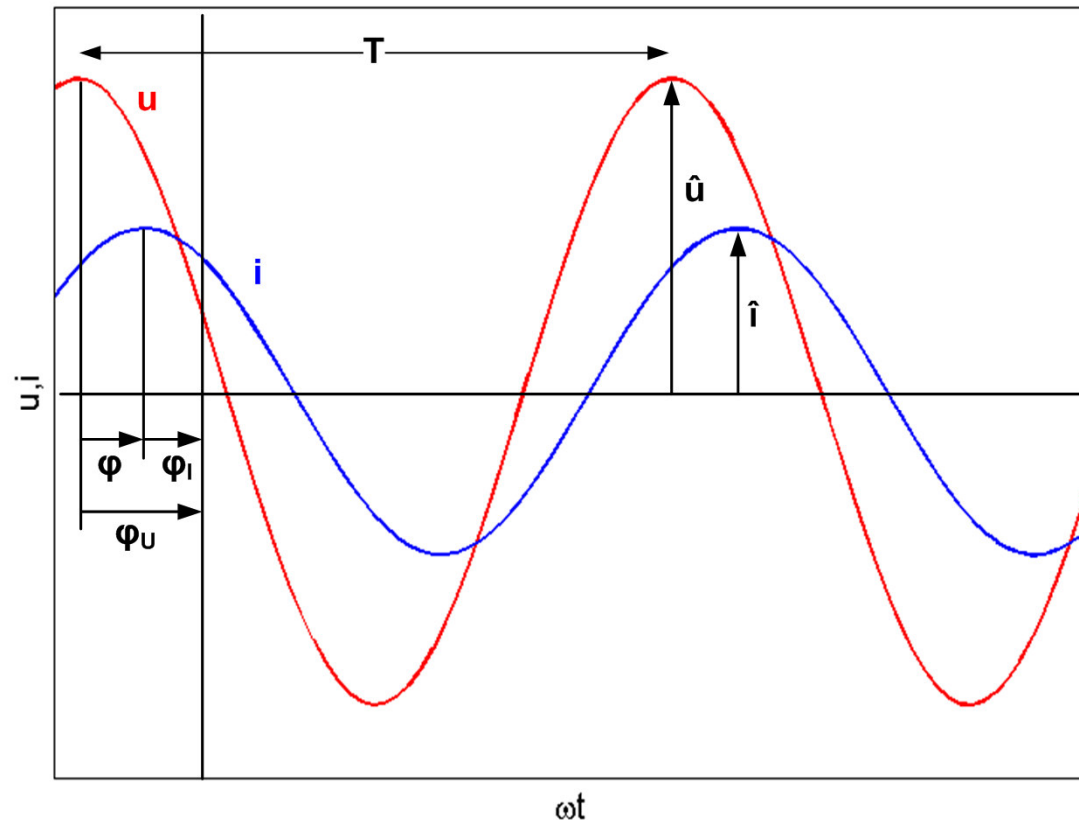
$$u_{12}(\omega t) = \hat{U}\sqrt{3} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

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

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

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

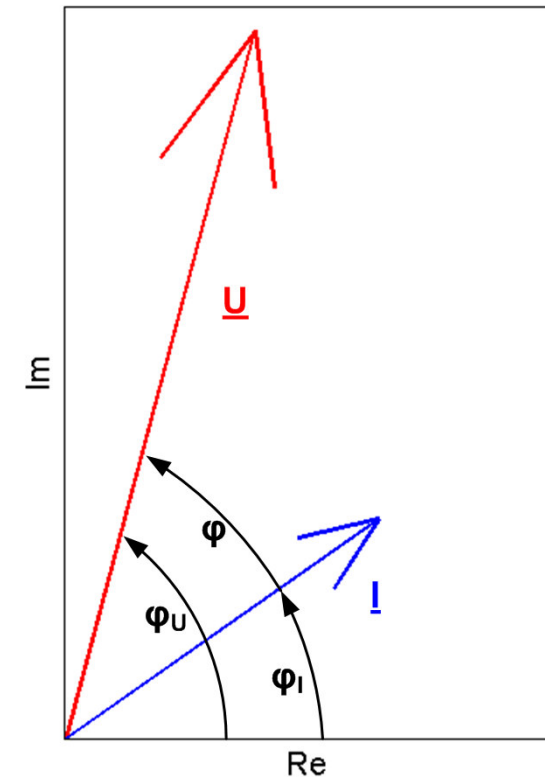
# Komplexer Effektivwert



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

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

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



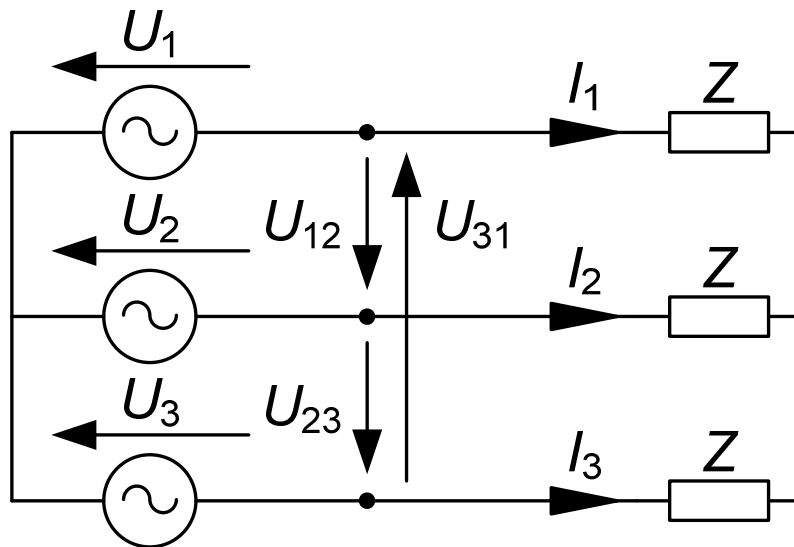
$$\underline{U} = U \cdot e^{j\varphi_U}$$

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

- zeitunabhängige Größe
- gilt nur für sinusförmige Größen

# Leistungsrechnung

- Für ein symmetrisches Drehstromsystem gilt:



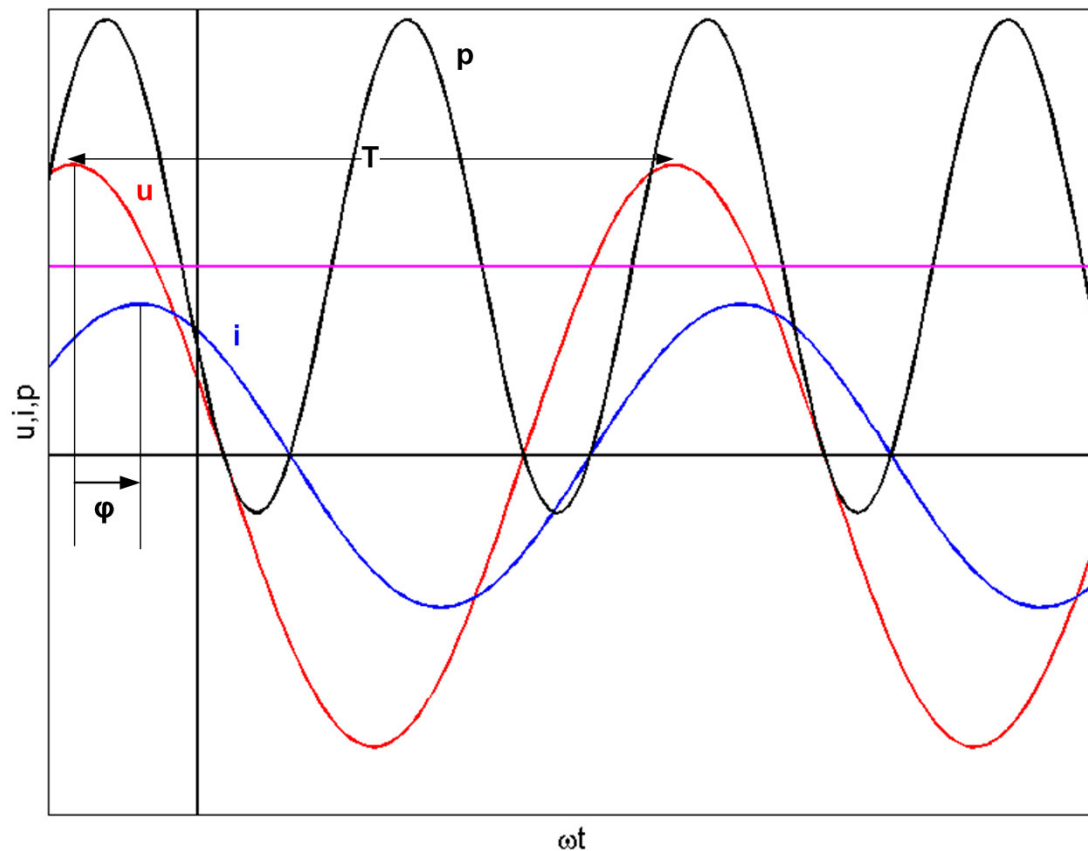
Scheinleistung  $S = 3U_S I_S$

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

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

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

# Momentanleistung und Wirkleistung



- Die Momentanleistung ergibt sich zu  

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

## 2. EMS-Übung

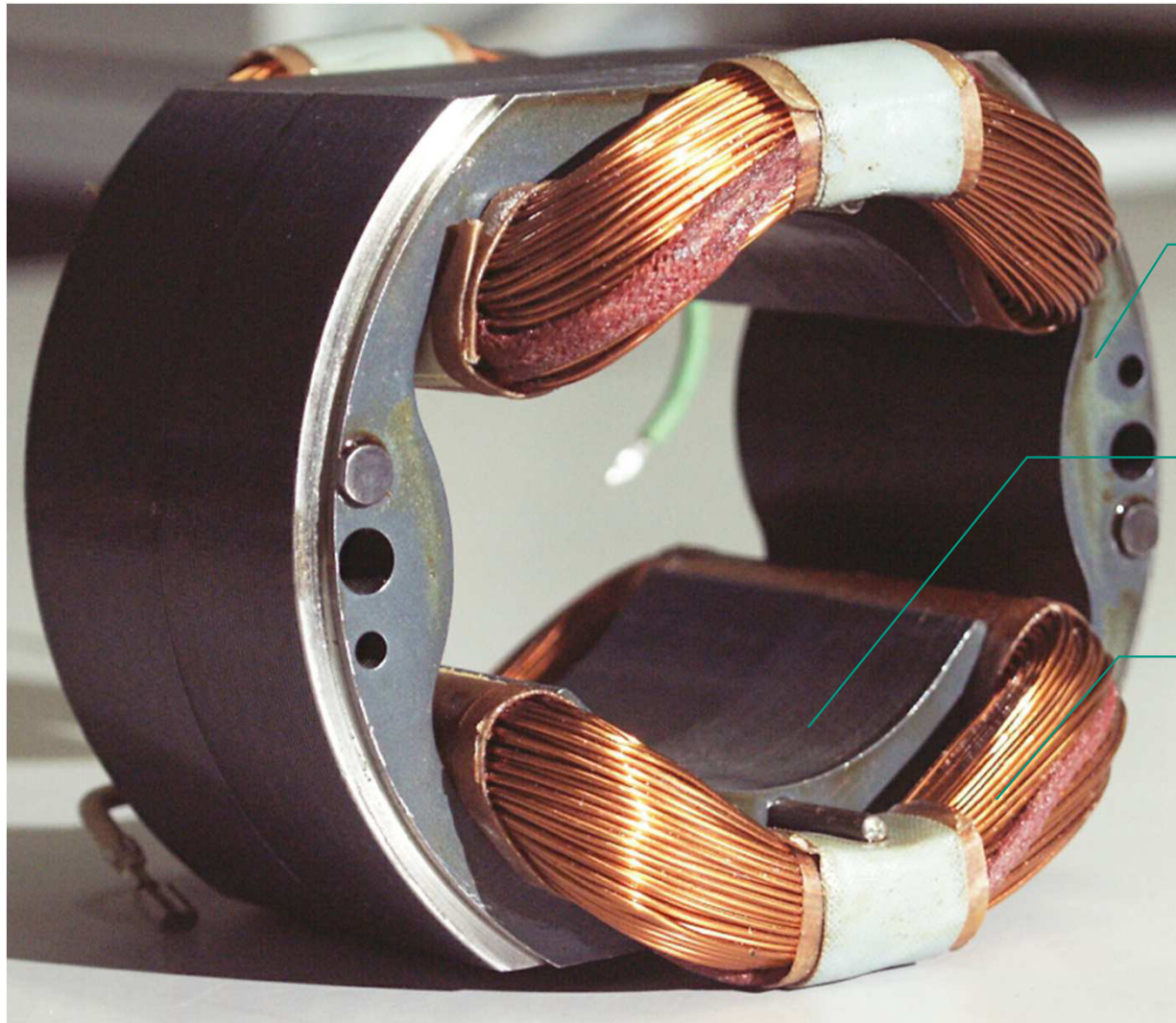
**21.04.2015**

**Dipl.-Ing. Mario Gommeringer**

Elektrotechnisches Institut (ETI)

### Gleichstrommaschine

# Stator

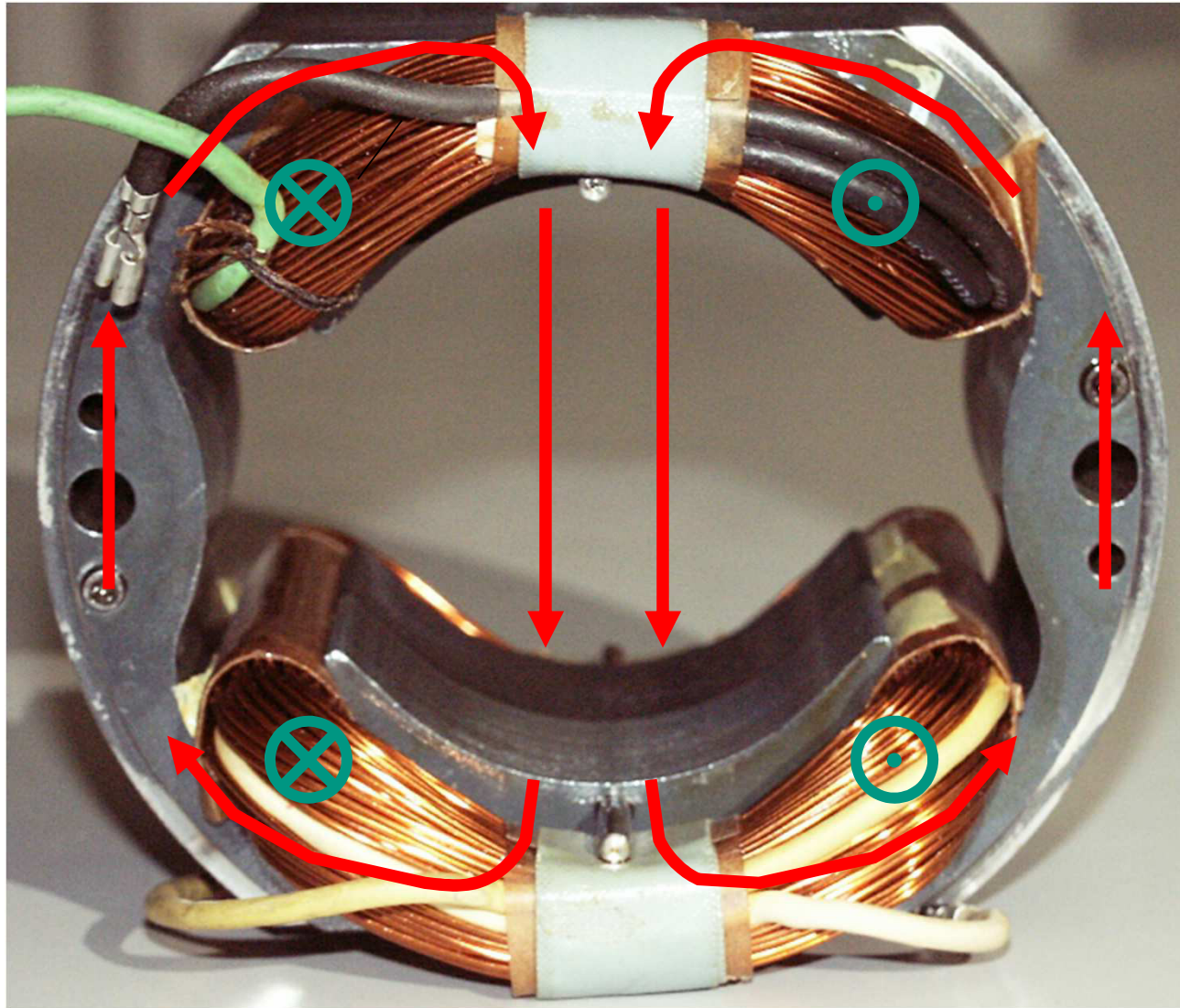


Joch

Polschuh

Feldwicklung/  
Erregerwicklung

# Stator

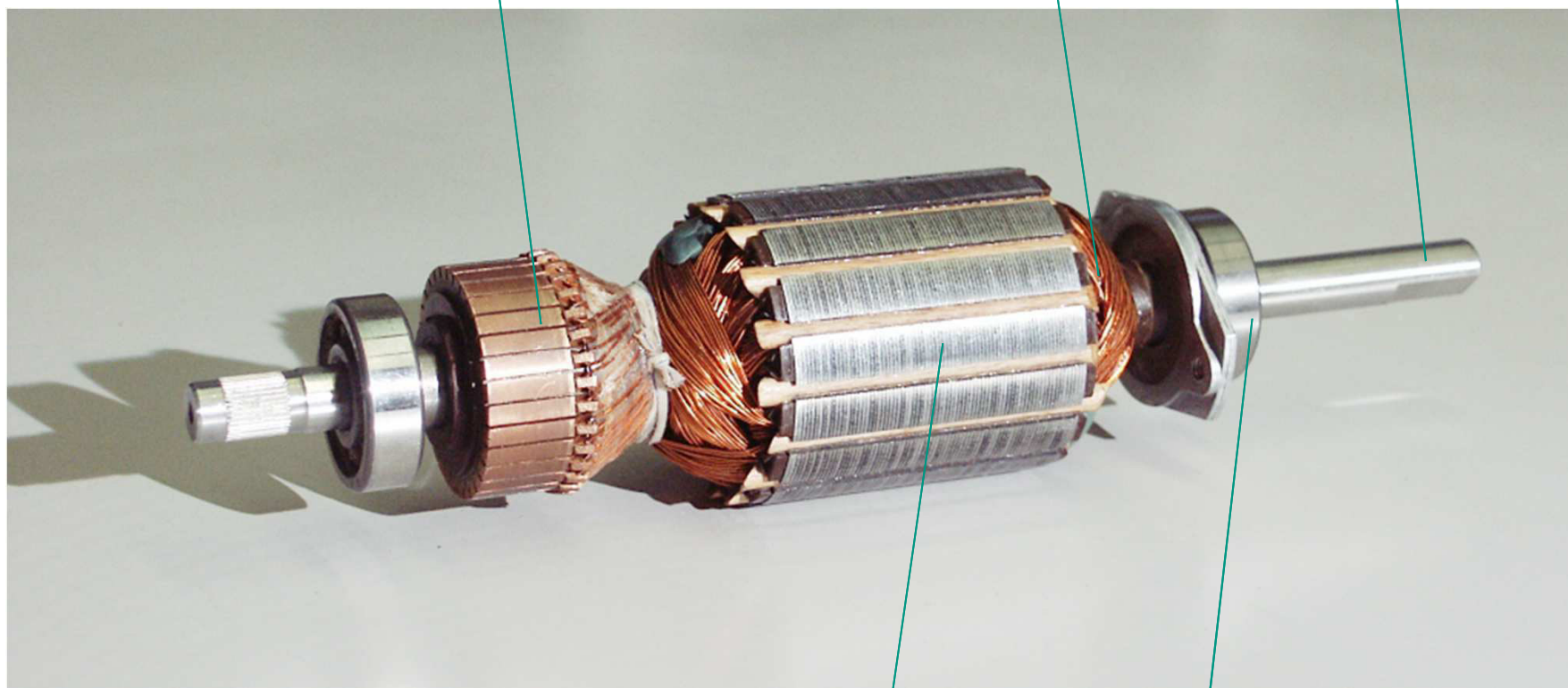


# Läufer/Rotor

Kommutator

Wickelkopf

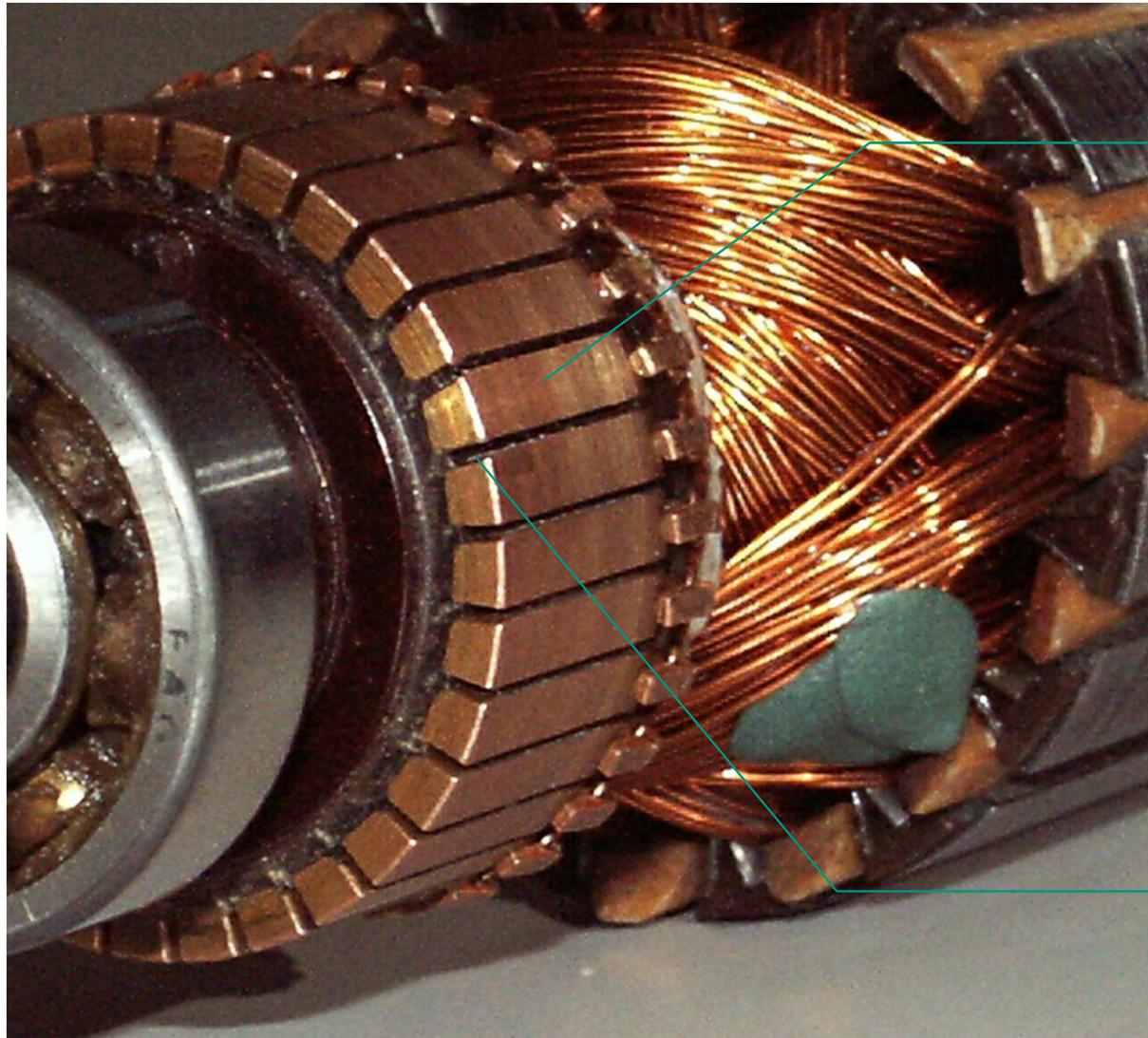
Welle



Rotorblechpaket

Lager

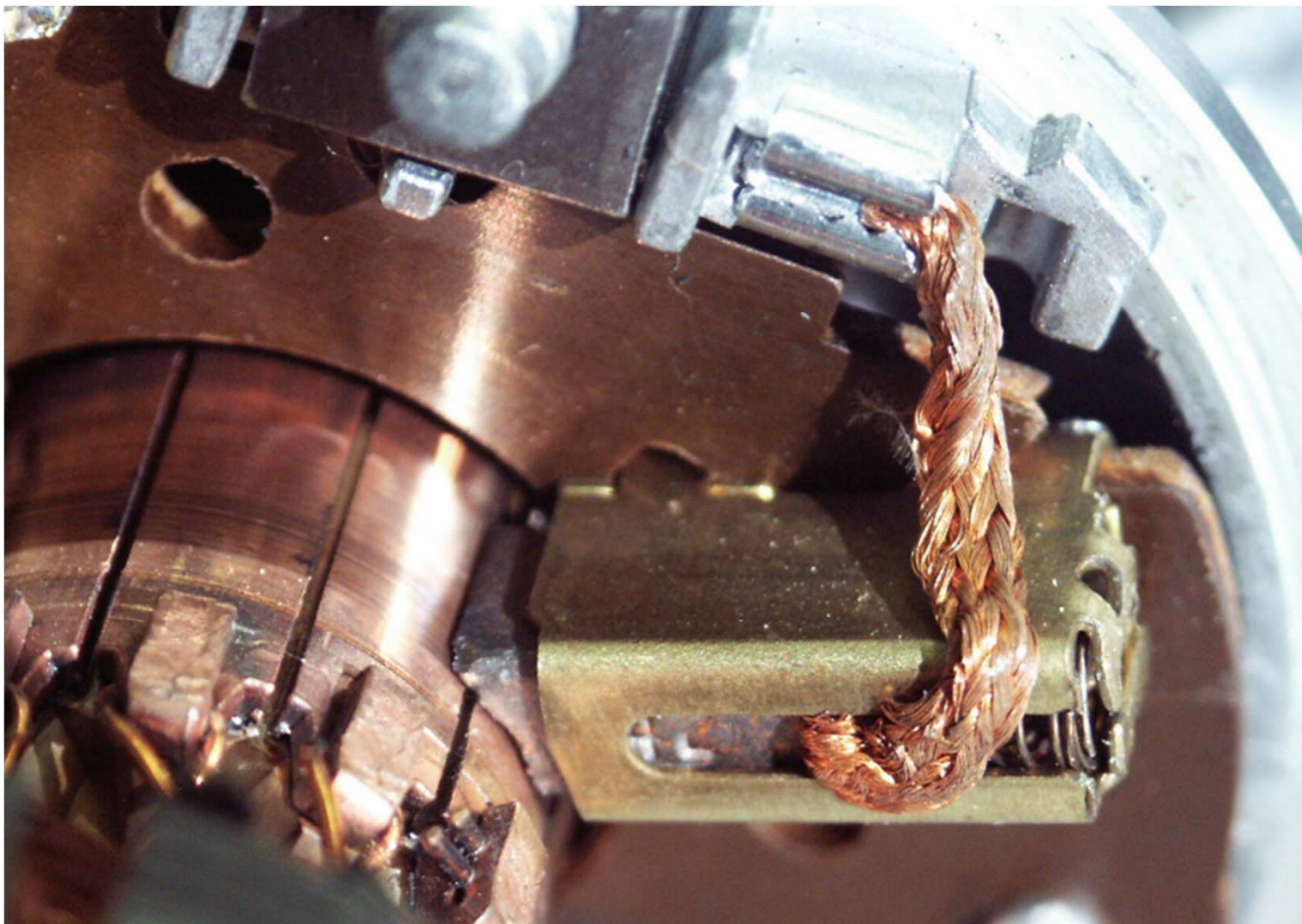
# Kommutator



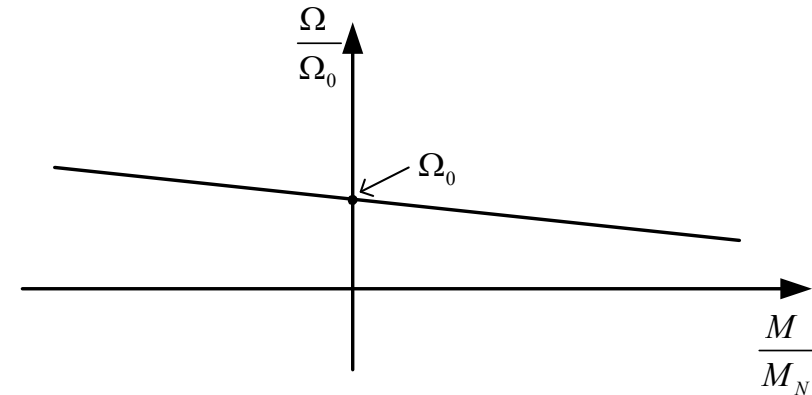
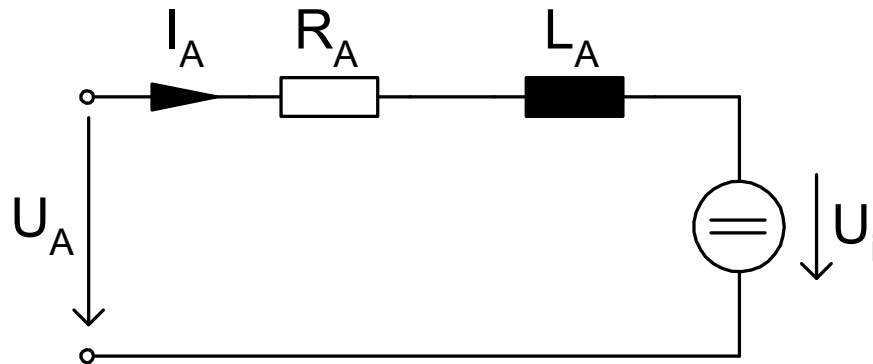
Kommutator-  
lamellen

Isolation

# Kohlen



# Ersatzschaltbild und Grundgleichungen



Innere Spannung:

Ankerspannungsgleichung:

Ankerspannungsgleichung stationär:

Momentengleichung:

Kennlinie:

Erregung:

$$u_i = c\Phi\Omega$$

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

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

$$M_i = c\Phi I_A$$

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

$$c\Phi \sim I_F$$

# 5. EMS-Übung

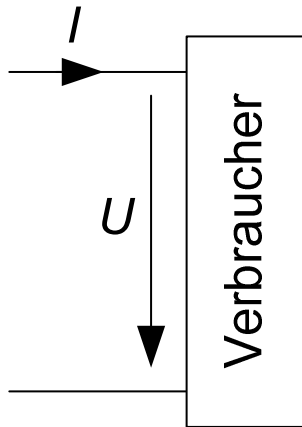
12.05.2015

Dipl.-Ing. Mario Gommeringer

Elektrotechnisches Institut (ETI)

## Synchronmaschine

# Zählpfeilsystem

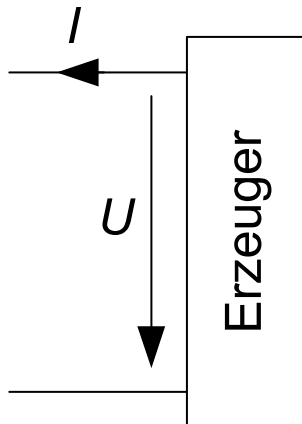
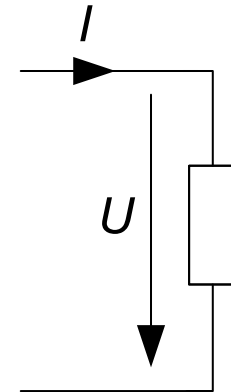


$$P > 0W$$

der Verbraucher nimmt Leistung auf

$$P < 0W$$

der Verbraucher gibt Leistung ab

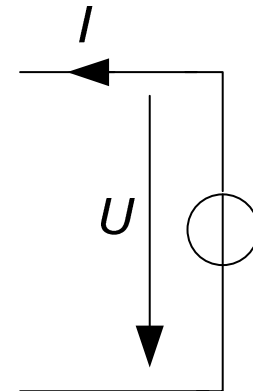


$$P > 0W$$

der Erzeuger gibt Leistung ab

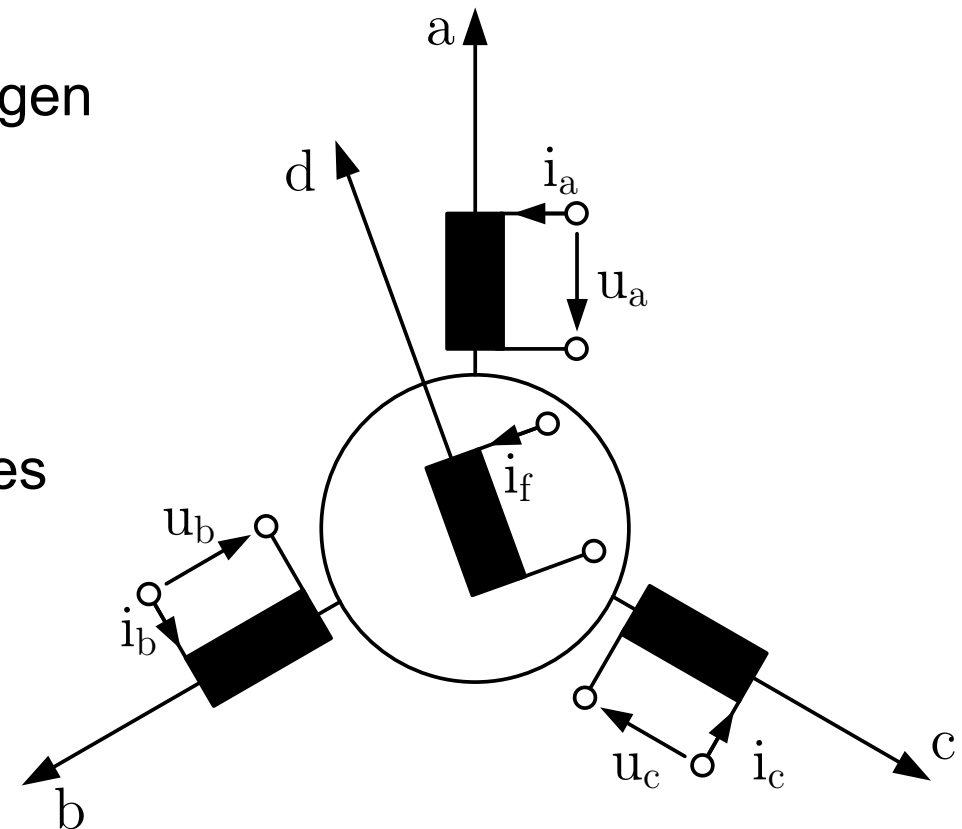
$$P < 0W$$

der Erzeuger nimmt Leistung auf



# Synchronmaschine

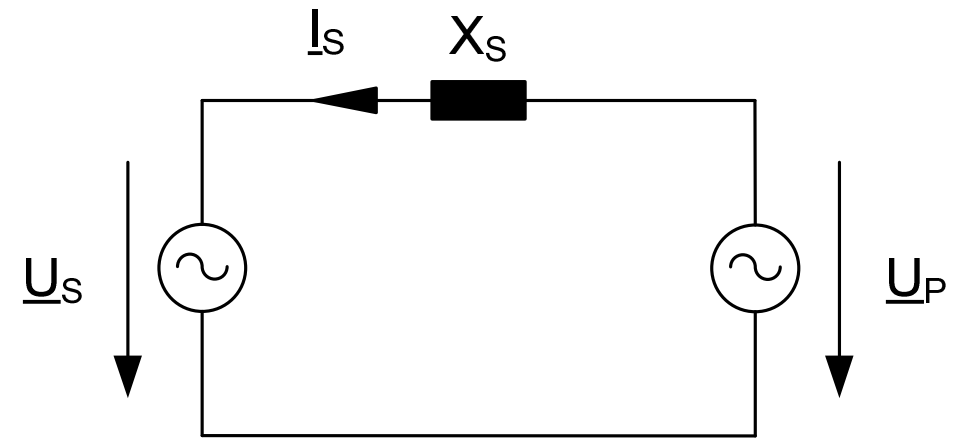
- Ständerwicklung (Drehstromwicklung)
- Räumlich um  $120^\circ$  versetzt (Polpaarzahl  $p=1$ )
- Die Magnetfelder der einzelnen Wicklungen bilden ein gemeinsames, rotierendes Magnetfeld
- Erregerwicklung auf dem Läufer oder Permanentmagnet erzeugt ein konstantes Magnetfeld



# 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



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

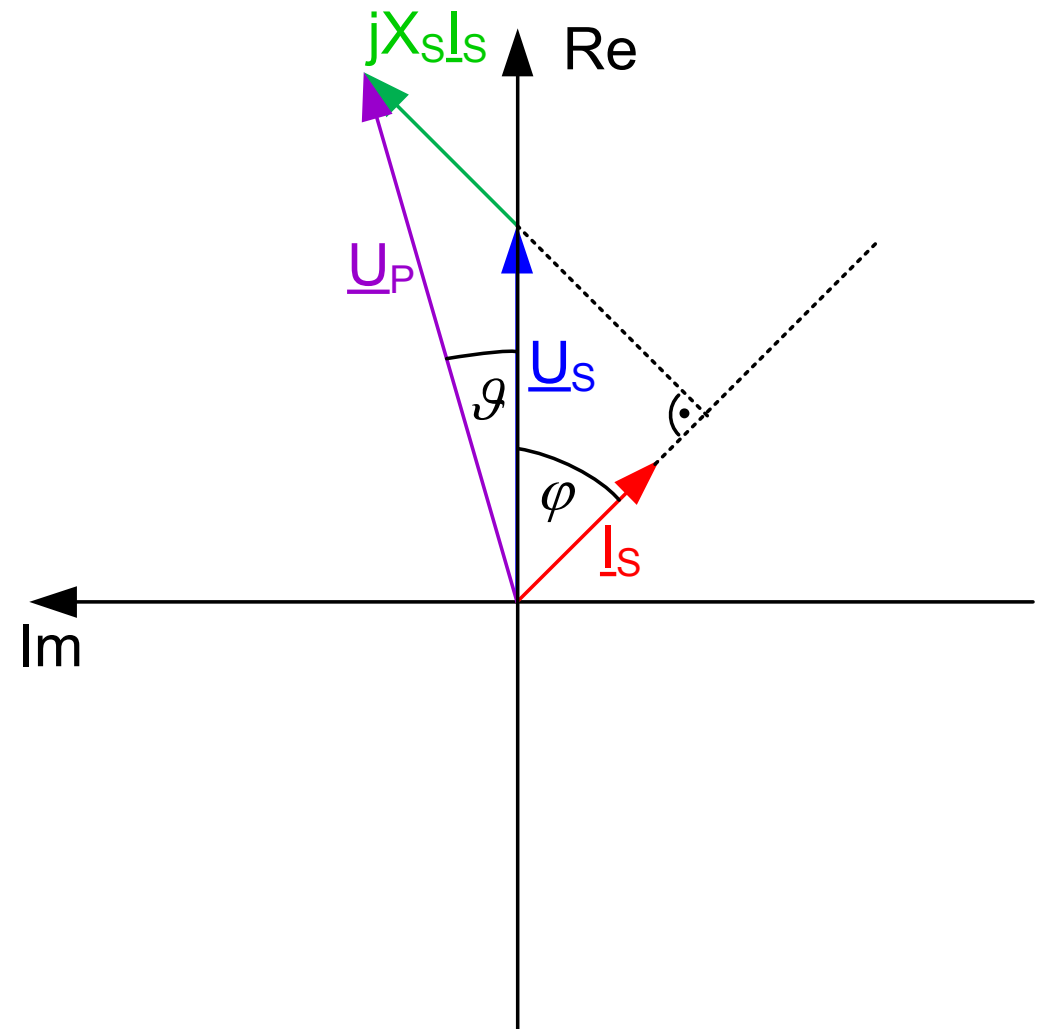
$$U_N = U_{SN} \cdot \sqrt{3}$$

# 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

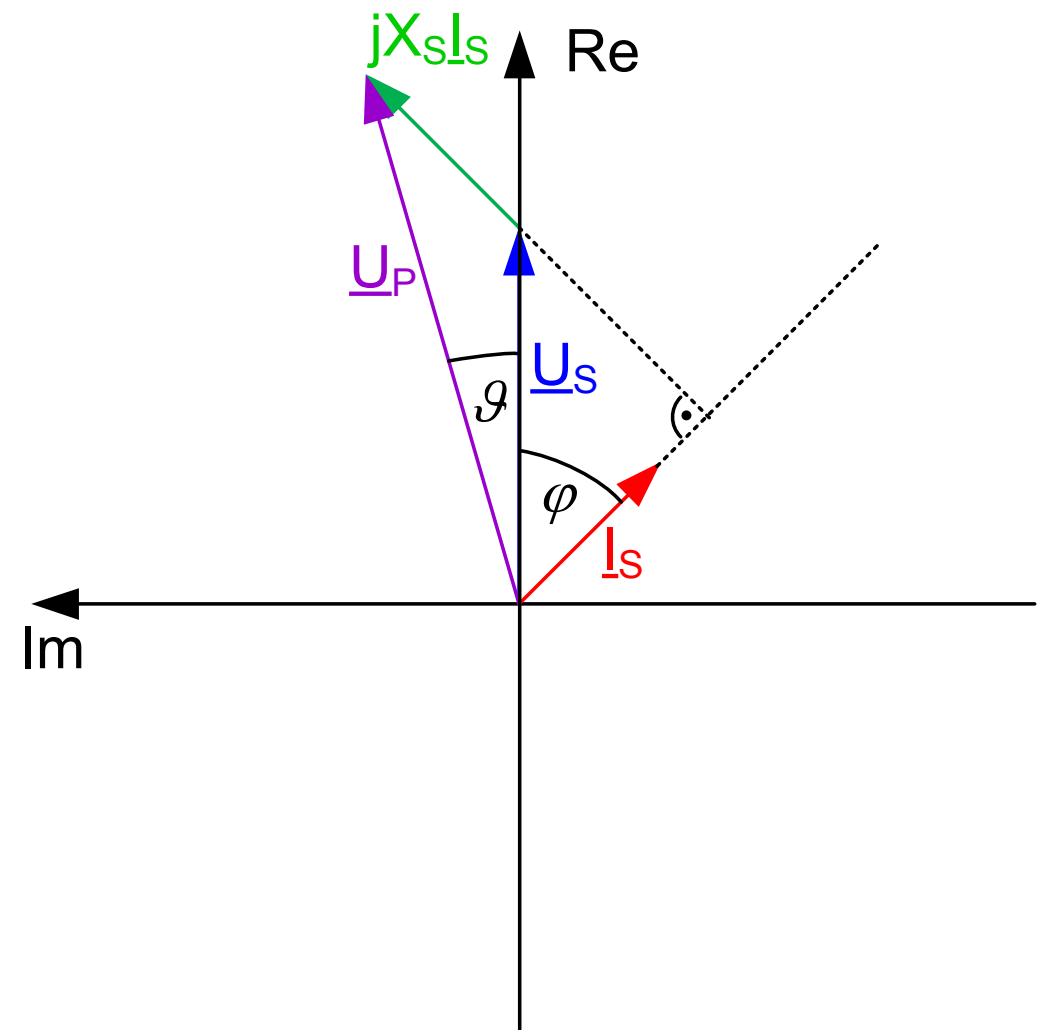
- $\cos(\varphi)$  übererregt
  - $\cos(\varphi)$  untererregt
- unterschieden werden



# 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 / Drehzahl

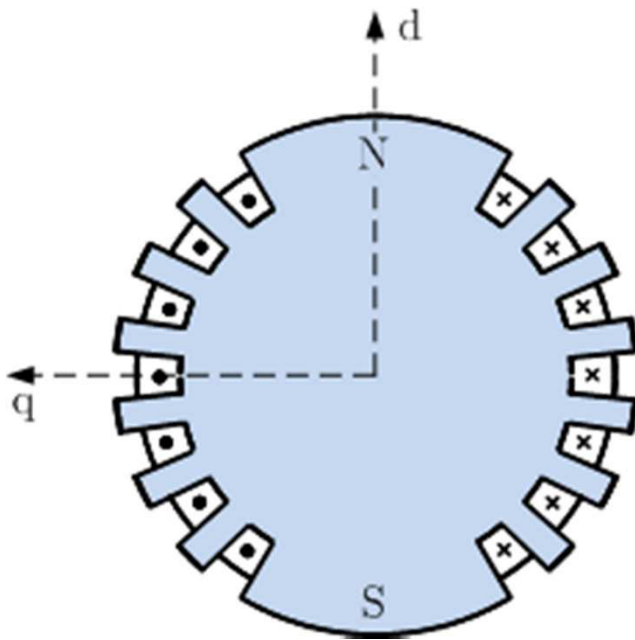
- Durch Variation des Erregerstroms kann die Aufnahme bzw. Abgabe von Blindleistung an der Synchronmaschine eingestellt werden.
- Eine übererregte Synchronmaschine zeigt kapazitives Verhalten
- Eine untererregte Synchronmaschine zeigt induktives Verhalten
- Die Polradspannung  $U_P$  ist proportional 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:

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

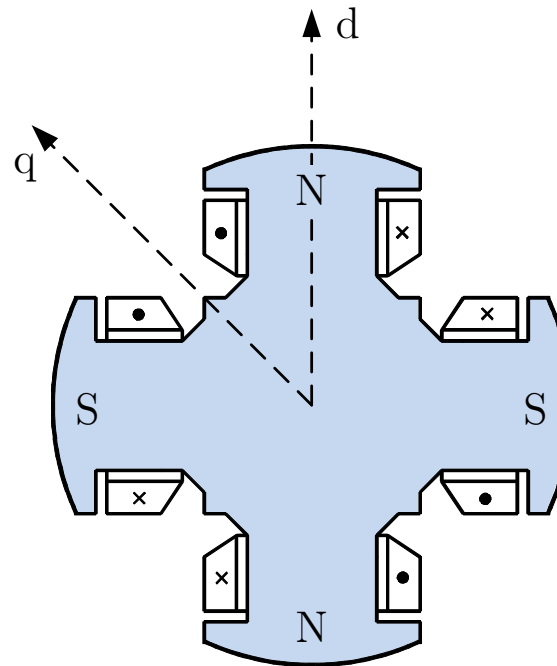
# Läuferbauformen



Elektrisch erregter  
Turborotor

$$p = 1$$

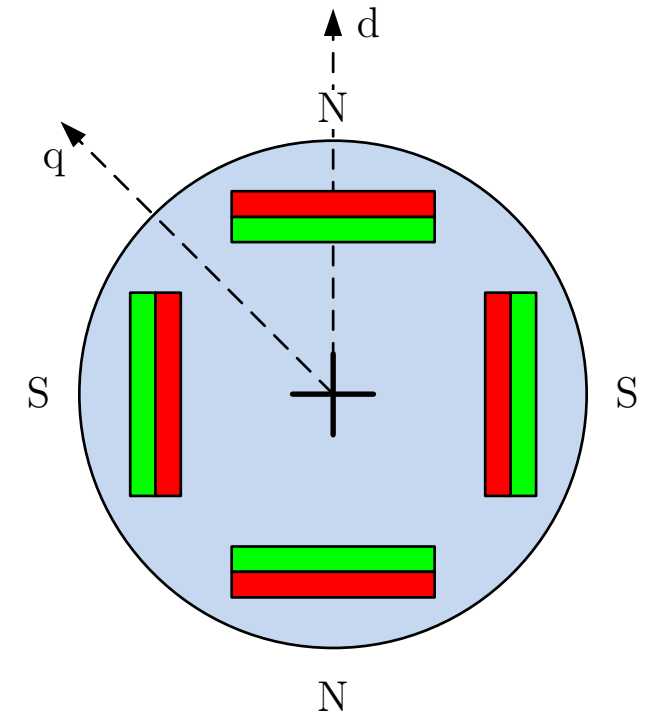
$$L_d = L_q$$



Elektrisch erregter  
Schenkelpolrotor

$$p = 2$$

$$L_d > L_q$$

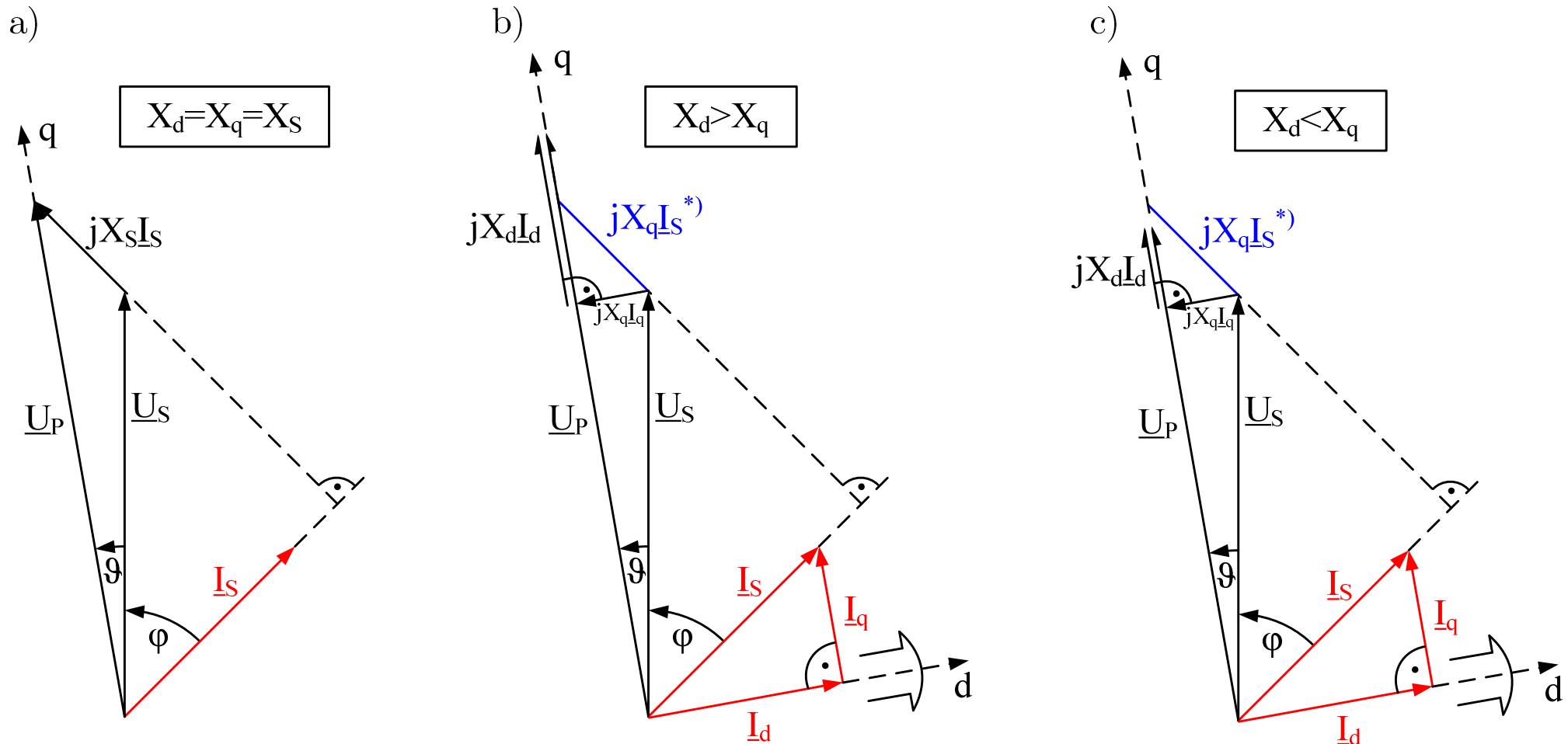


Rotor mit vergrabenen  
Magneten

$$p = 2$$

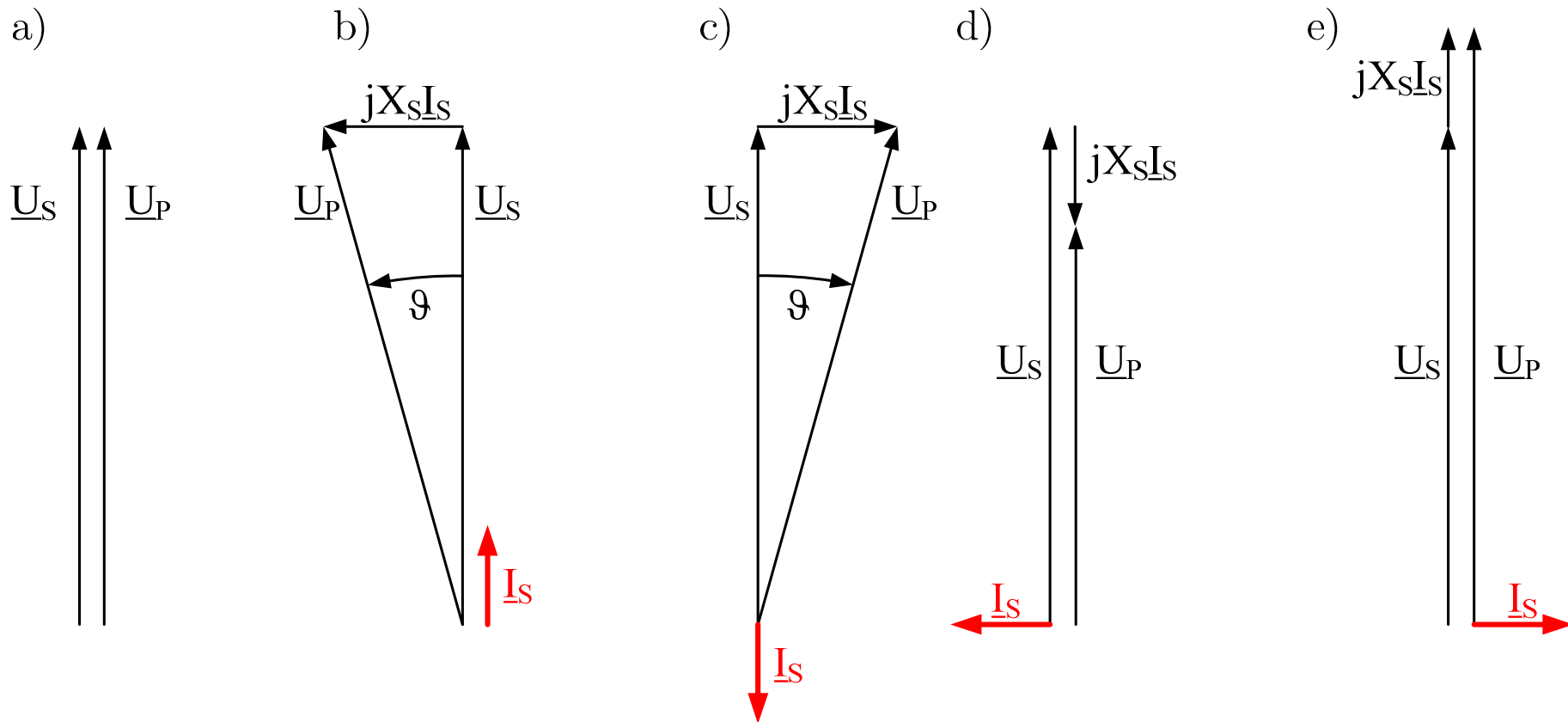
$$L_d < L_q$$

# Zeigerdiagramm für verschiedene Läuferbauformen



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

# Zeigerdiagramm für verschiedene Betriebszustände



Synchronmaschine mit Turboläufer am starren Netz

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

## 8. EMS-Übung

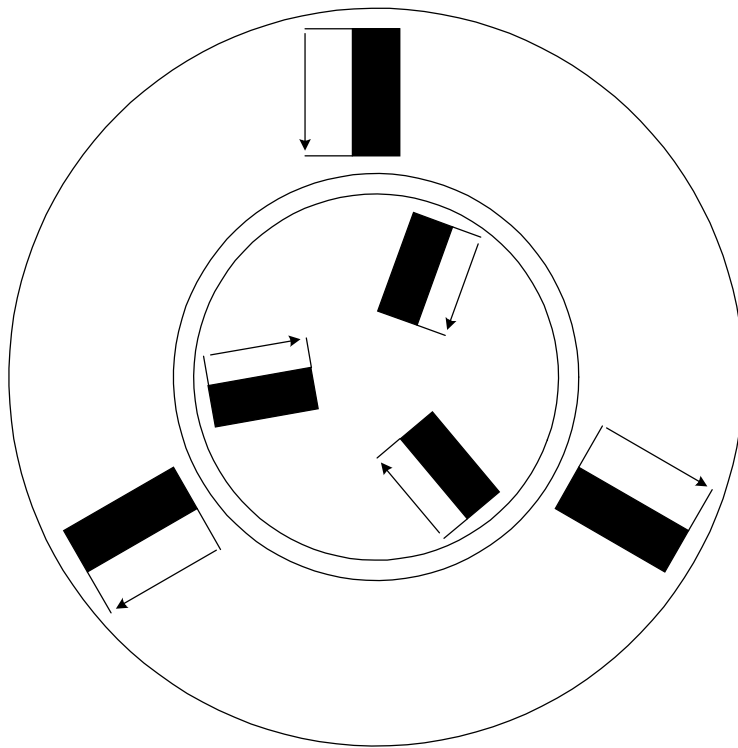
02.06.2015

Dipl.-Ing. Mario Gommeringer

Elektrotechnisches Institut (ETI)

### Asynchronmaschine

# 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

# Läufertypen



■ Kurzschlussläufer

■ Schleifringläufer



# 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.

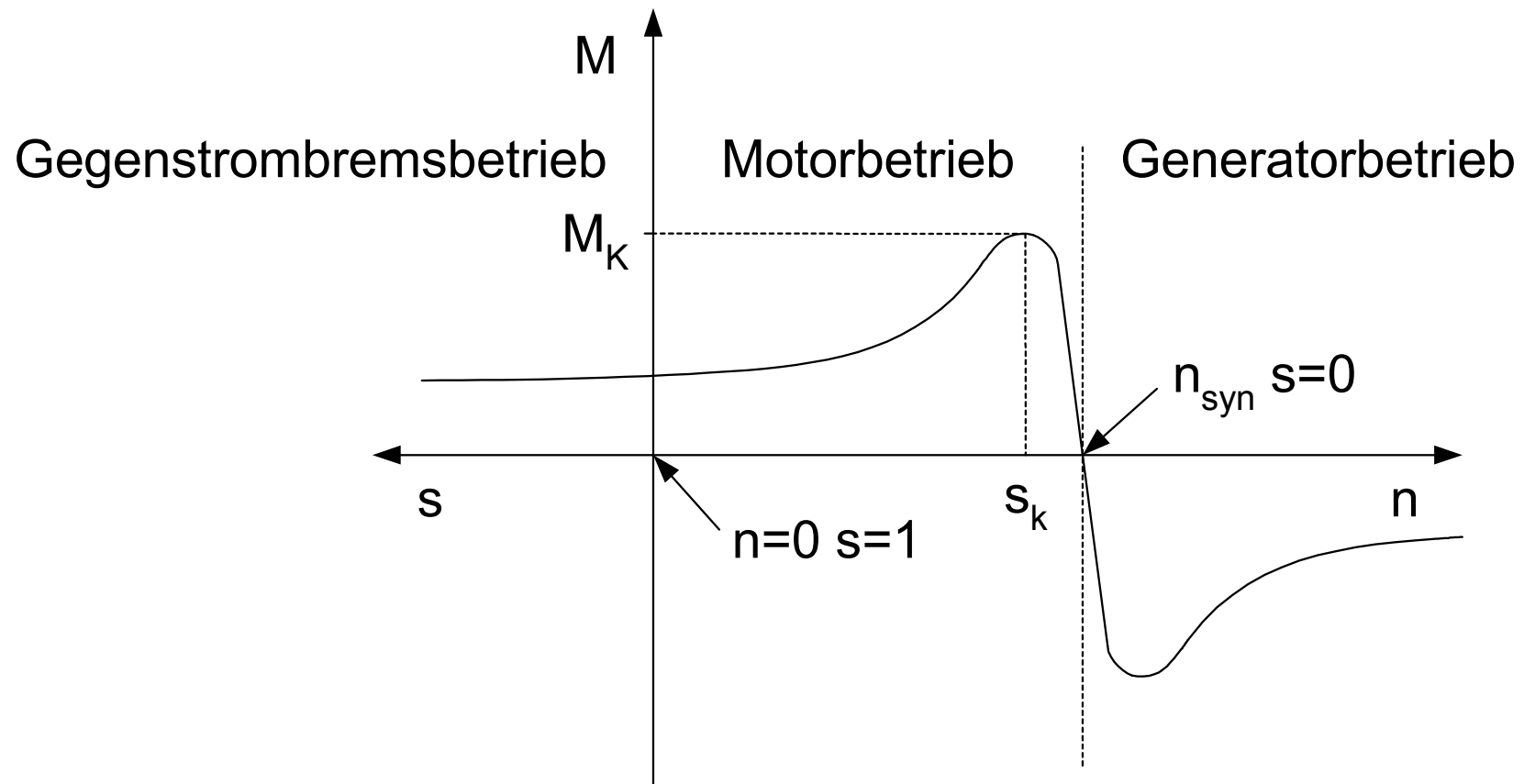
# Schlupf

- 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:

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



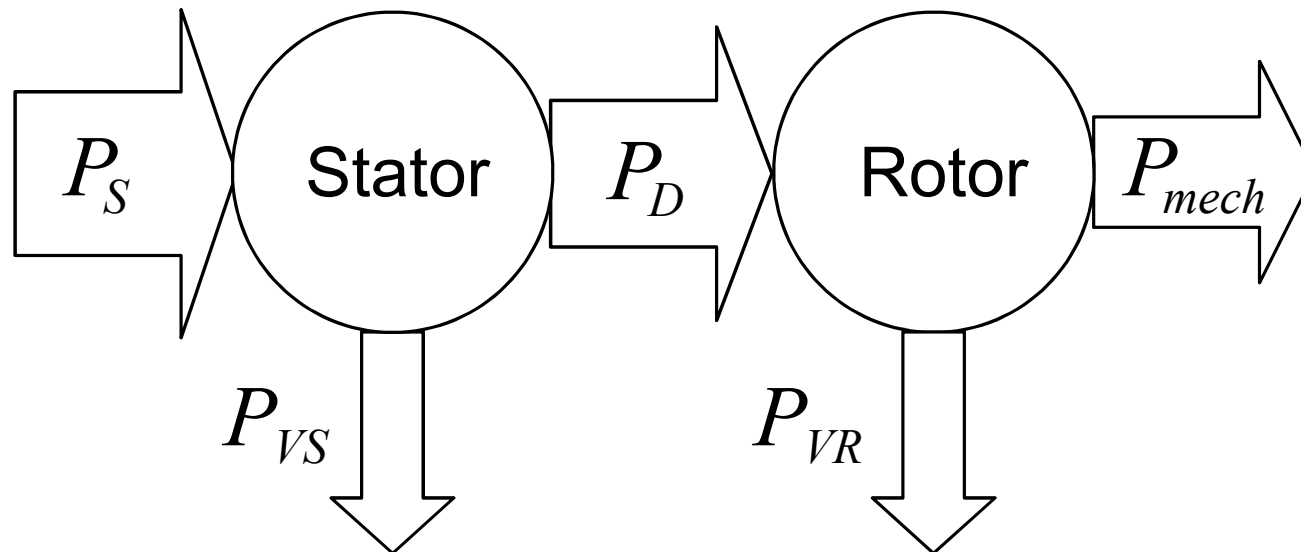
Typische Kennlinie einer Asynchronmaschine

# 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)



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

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

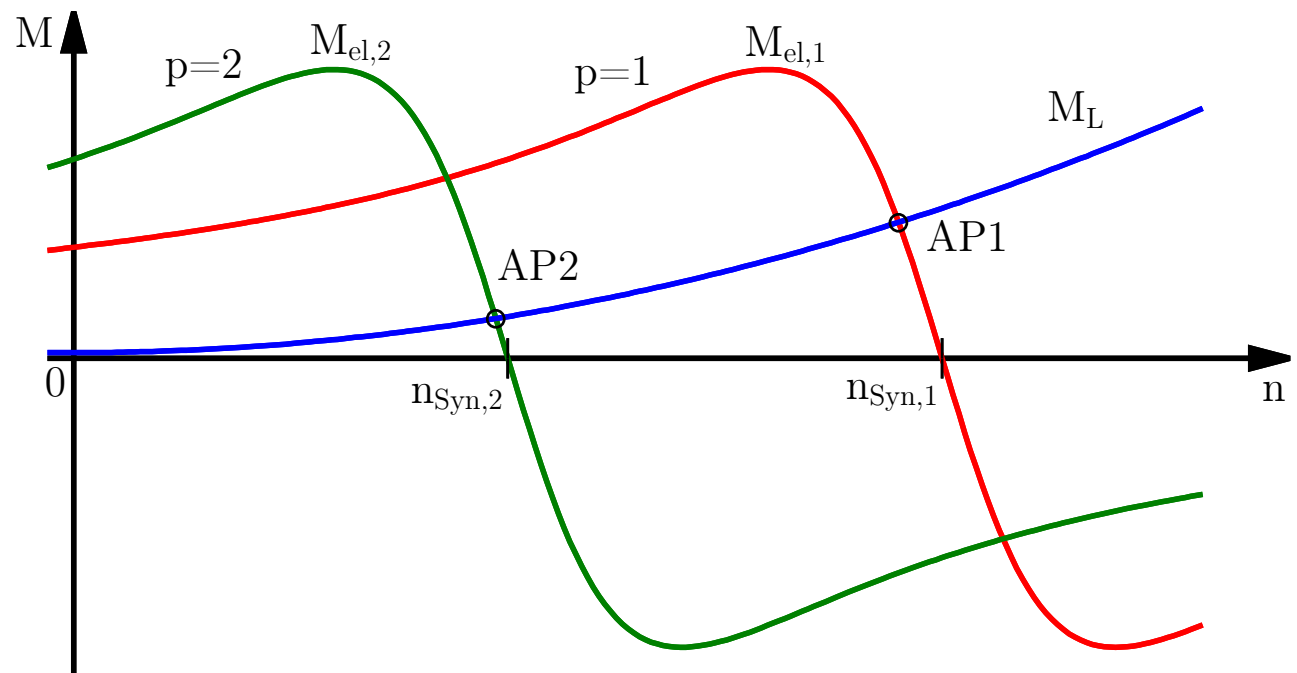
$$P_{VR} = sP_D = 3R'_R I_R'^2$$

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

# Drehzahlverstellung: Polumschaltung

## Polumschaltung:

- Verschieben des synchronen Punktes
- Grobe Abstufung
- Aufwändige Wicklung



AP1: Arbeitspunkt mit  $p=1$

AP2: Arbeitspunkt mit  $p=2$

$n_{Syn,1}$ : Synchrondrehzahl für  $p=1$

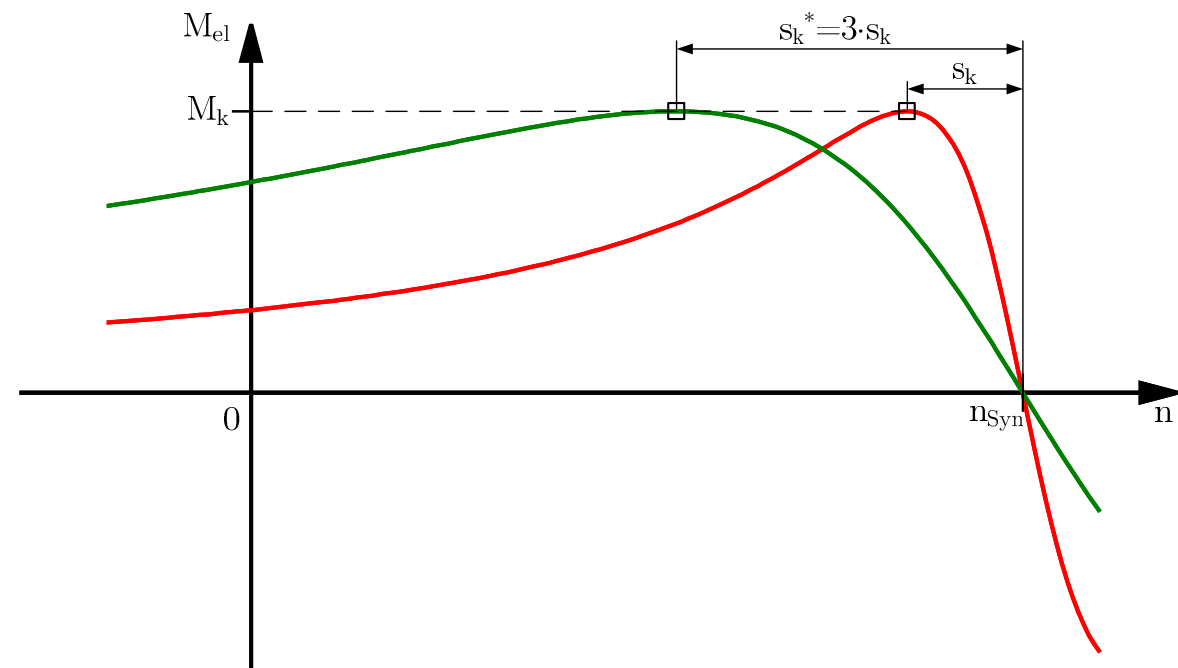
$n_{Syn,2}$ : Synchrondrehzahl für  $p=2$

# Läuferwiderstand

## Horizontale Streckung der Kennlinie

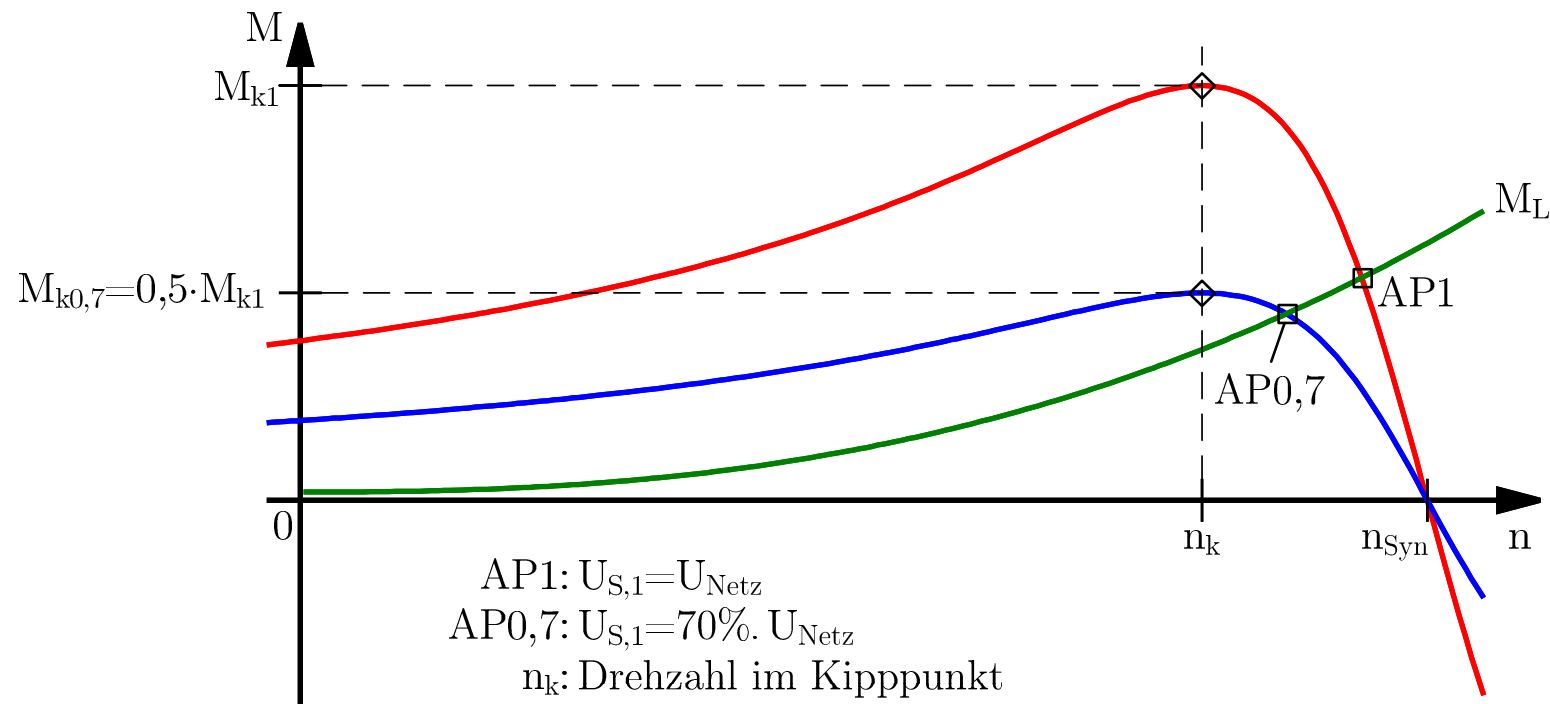
$$\frac{s^*}{s} = \frac{R_R + R_V}{R_R}$$

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



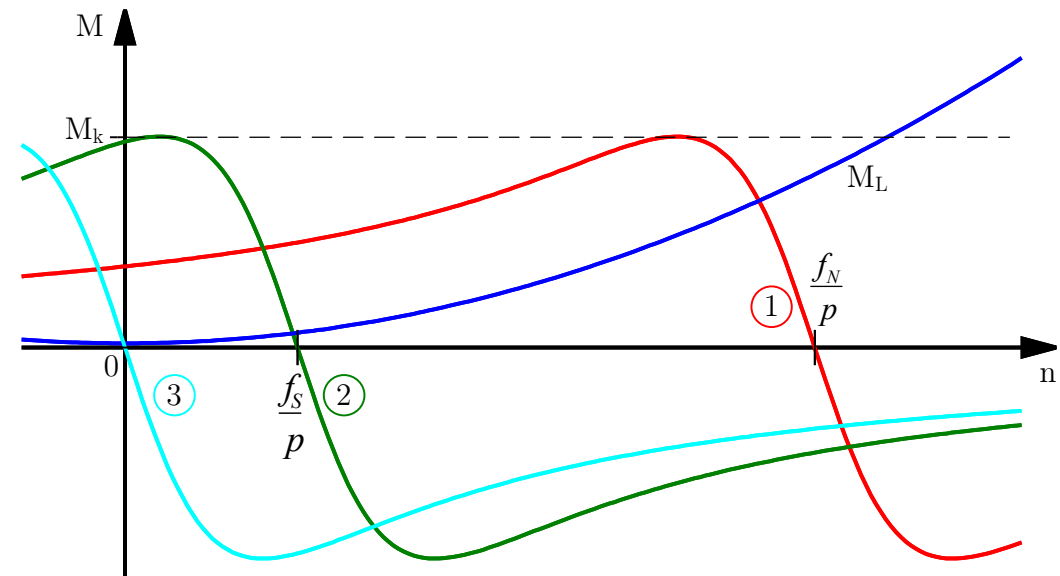
# Drehzahlverstellung

- 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  $f_s = 0$

## 8. EMS-Übung

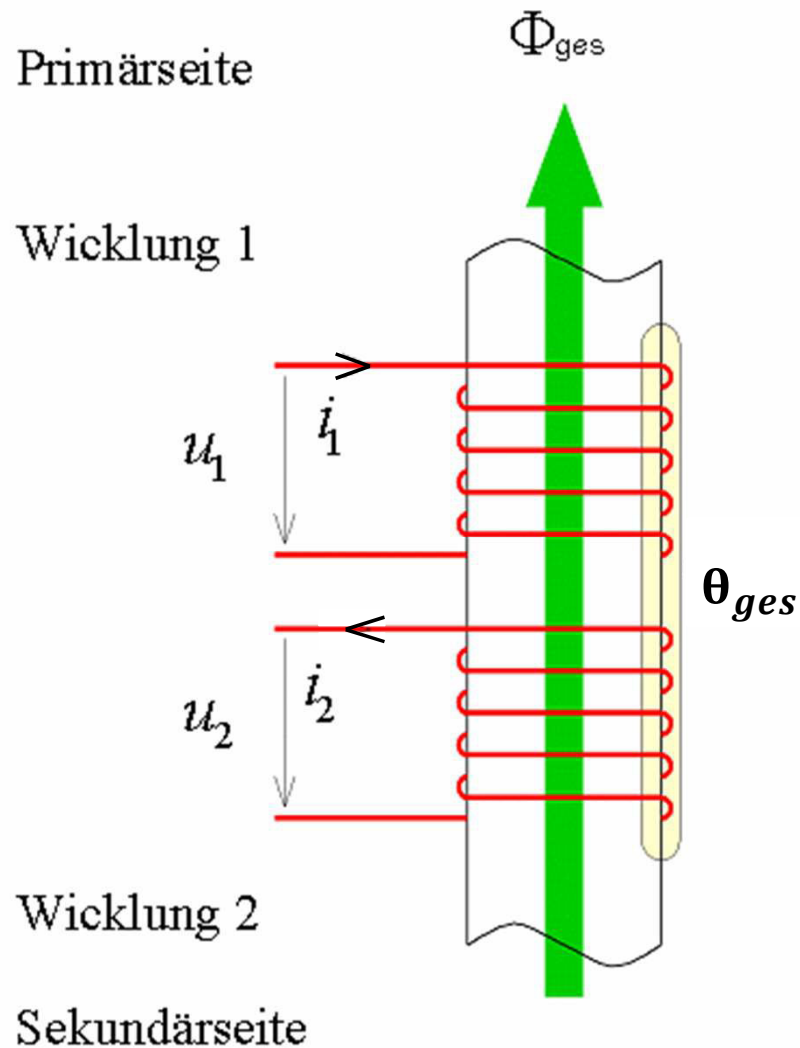
09.06.2015

Dipl.-Ing. Mario Gommeringer

Elektrotechnisches Institut (ETI)

# Transformator

# 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:

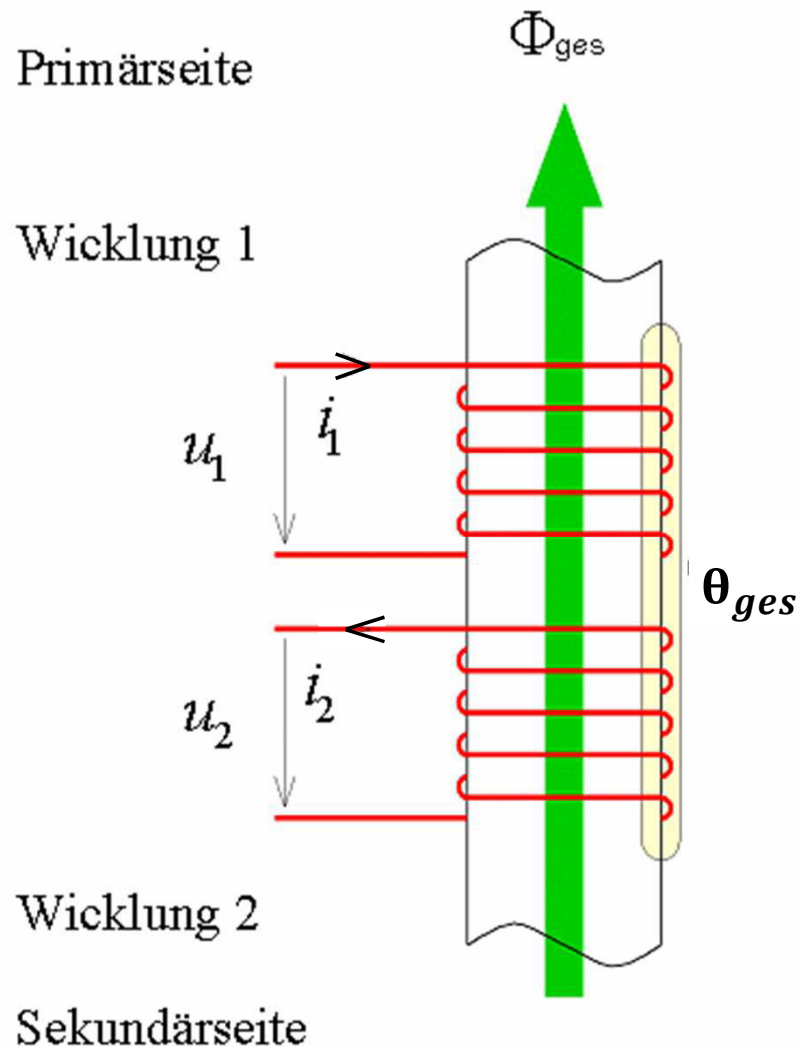
$$u_1 = w_1 \frac{d\Phi_{\text{ges}}}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{u_1}{u_2} = \frac{w_1}{w_2} = \ddot{u}$$

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

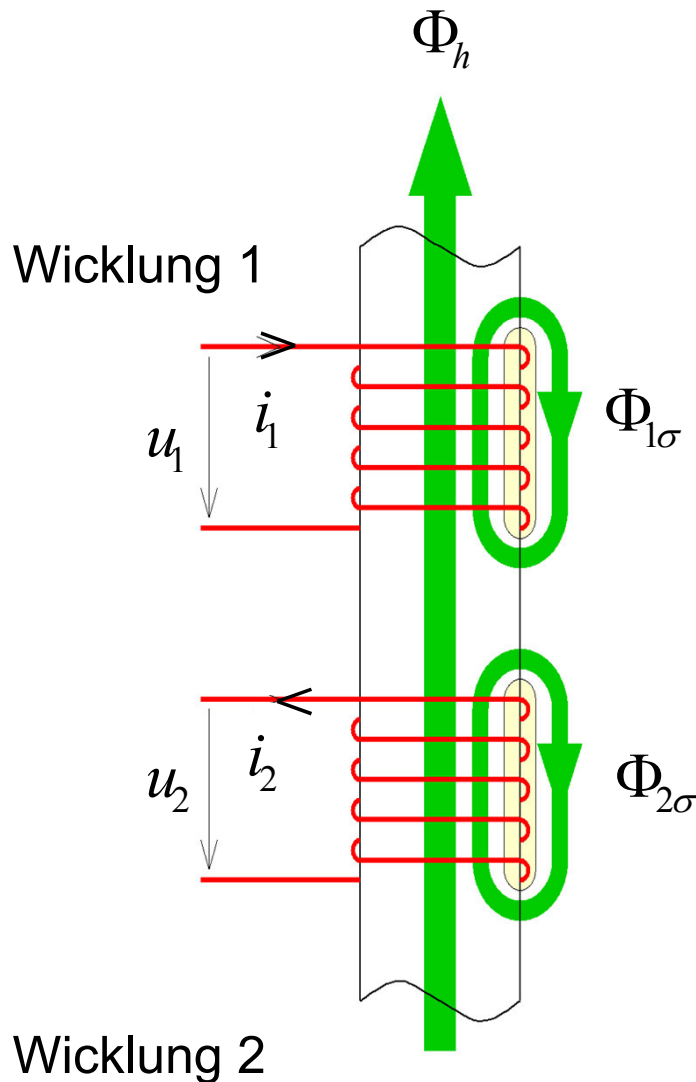
Stromübersetzung:

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

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



# 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

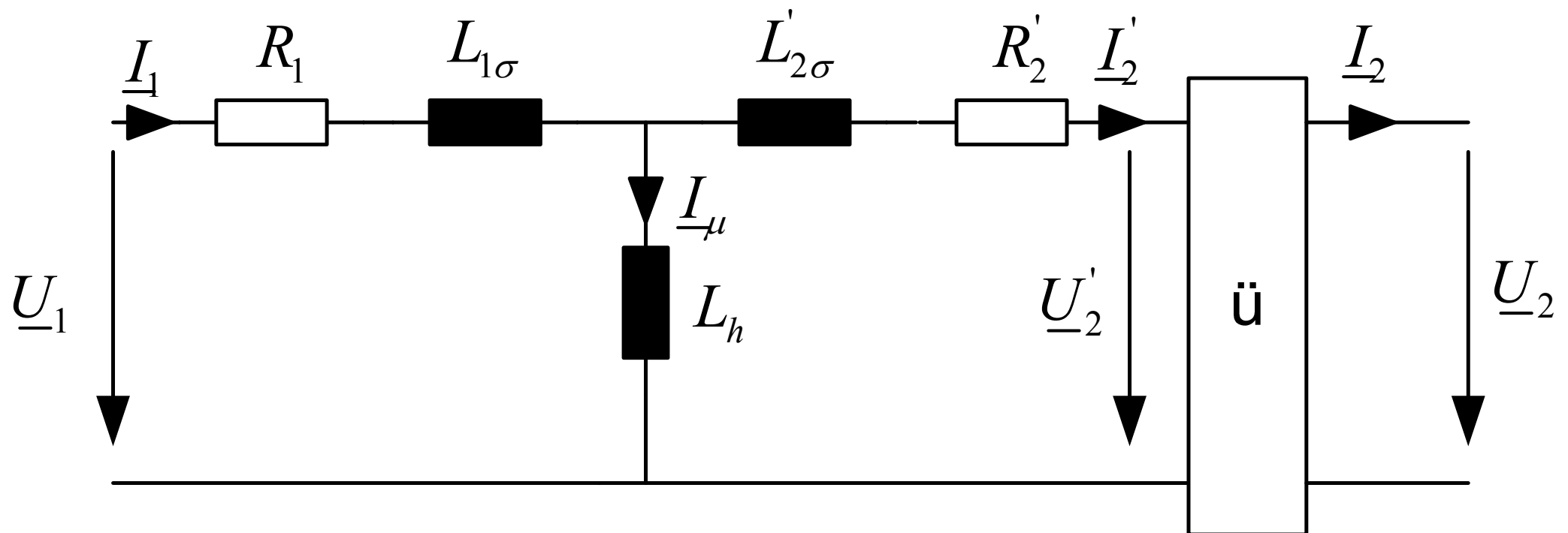
$$u_1 = w_1 \cdot \left( \frac{d\Phi_h}{dt} + \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt} \right) \quad u_2 = w_2 \cdot \left( \frac{d\Phi_h}{dt} + \frac{d\Phi_{2\sigma}}{dt} \right)$$

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

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

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

# 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:

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

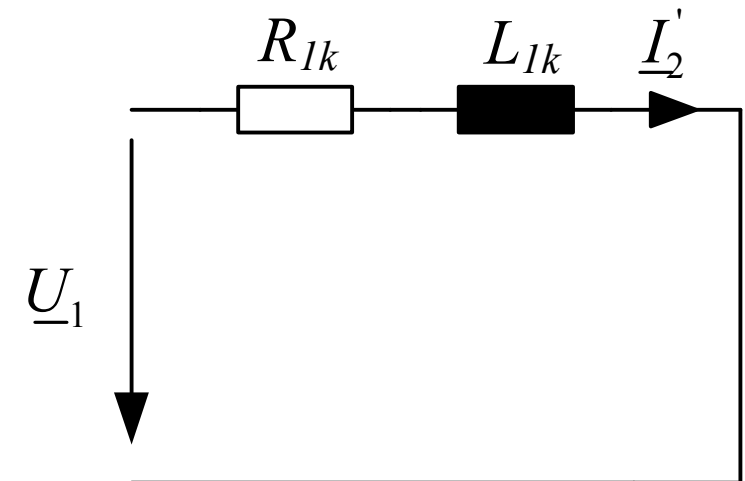
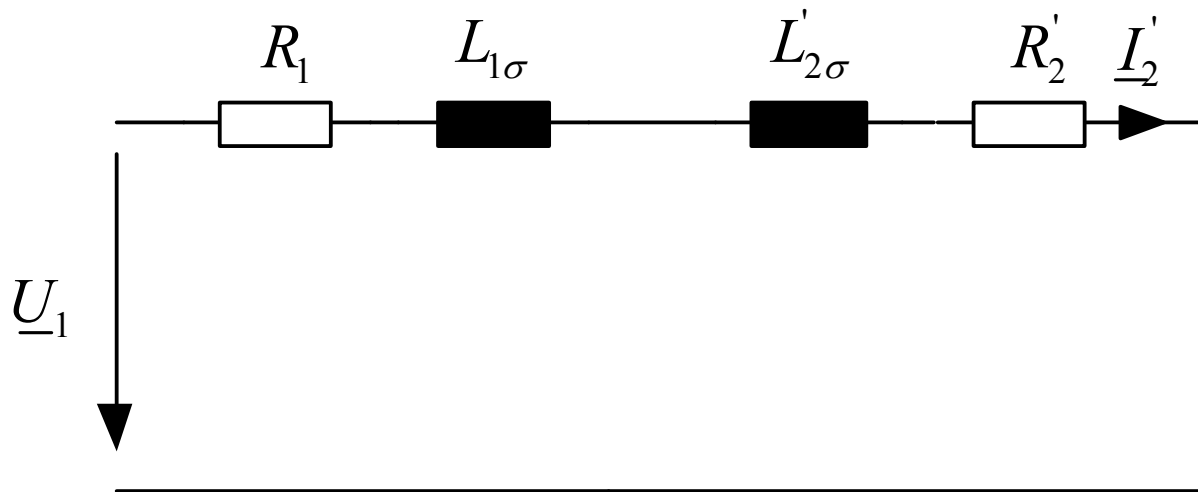
$$\frac{R_2}{R'_2} = \left( \frac{I_2'}{I_2} \right)^2 = \frac{1}{\ddot{u}^2} \quad \Rightarrow R'_2 = \ddot{u}^2 \cdot R_2$$

Für die Streuinduktivität gilt analog:

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

# 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.

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

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

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

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

# 13. EMS-Übung

07.07.2015

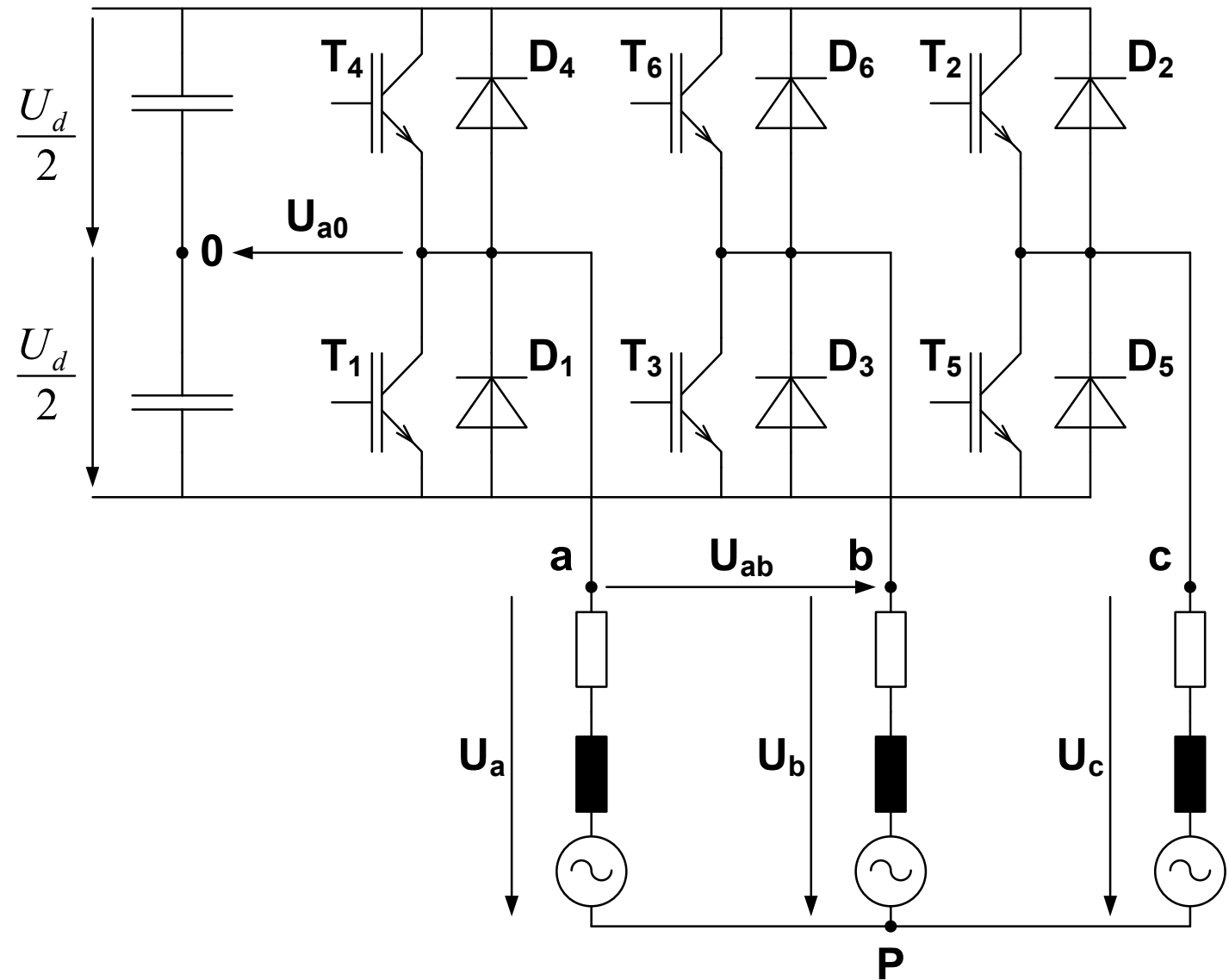
Dipl.-Ing. Mario Gommeringer

Elektrotechnisches Institut (ETI)

## Blocktaktung / Raumzeigermodulation

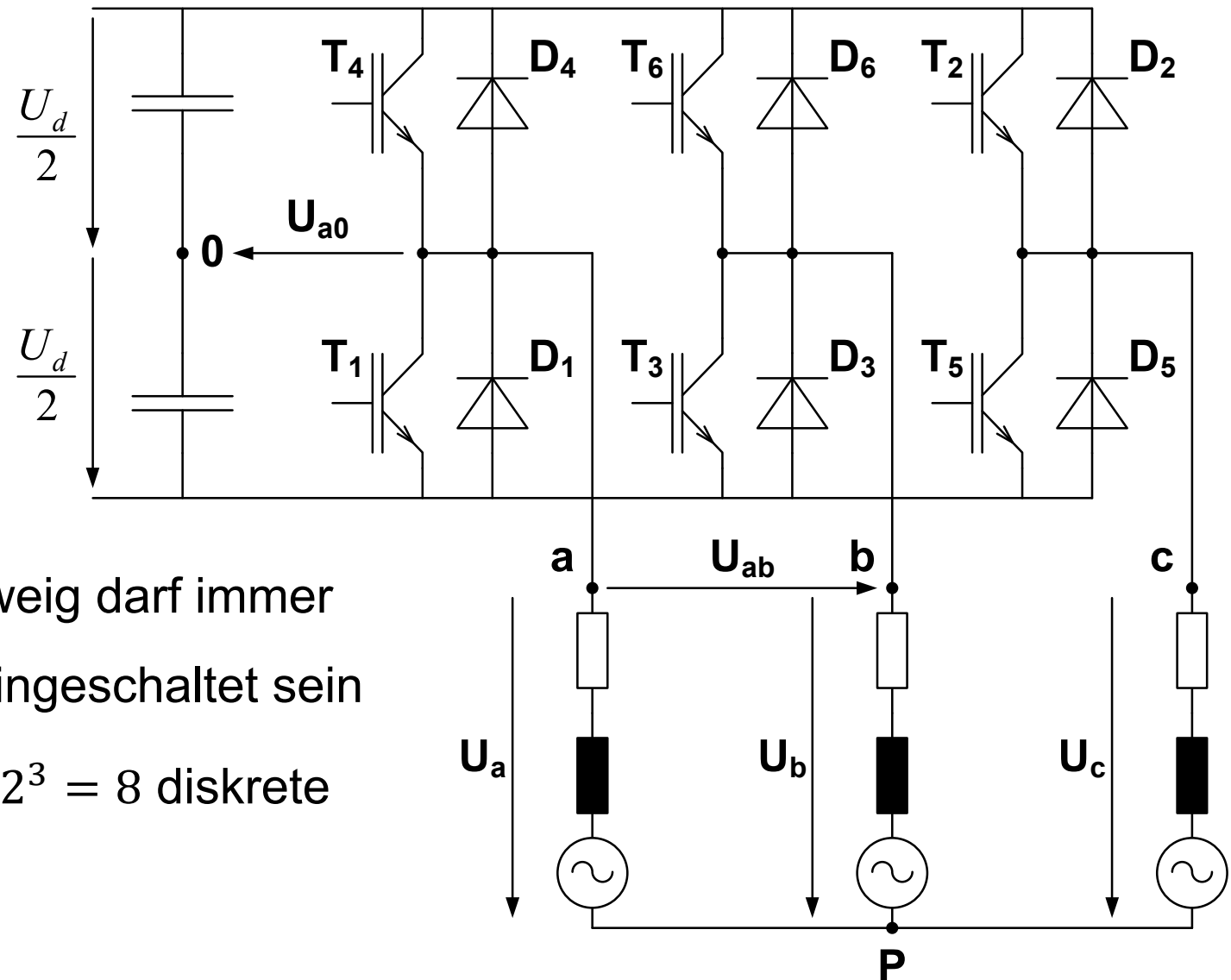
# Selbstgeführte Drehstrombrücke

## ■ Schaltbild



# Selbstgeführte Drehstrombrücke

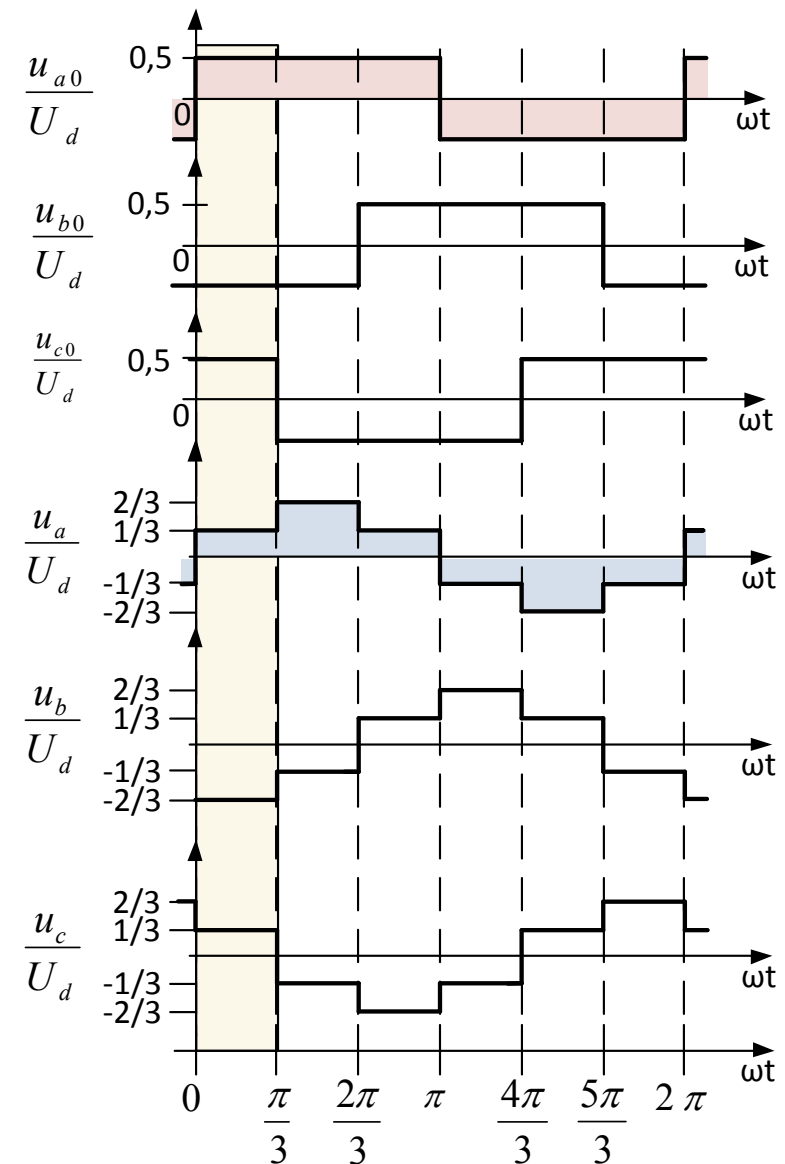
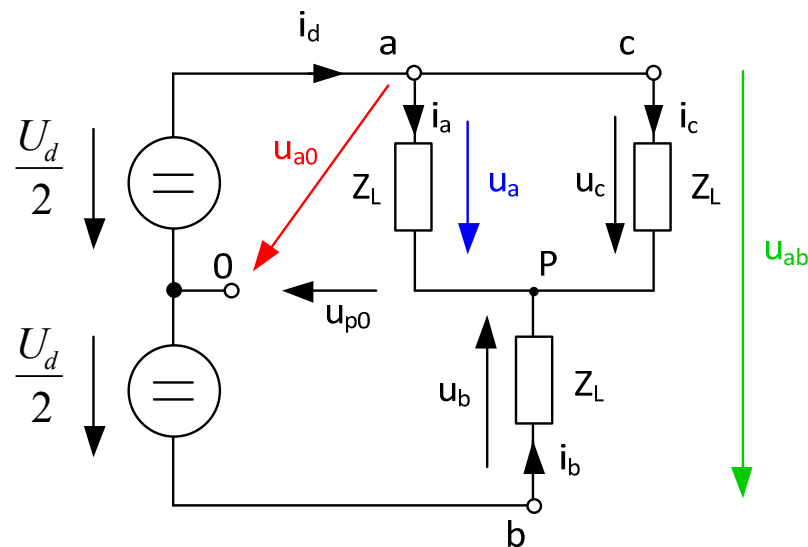
## Schaltbild



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

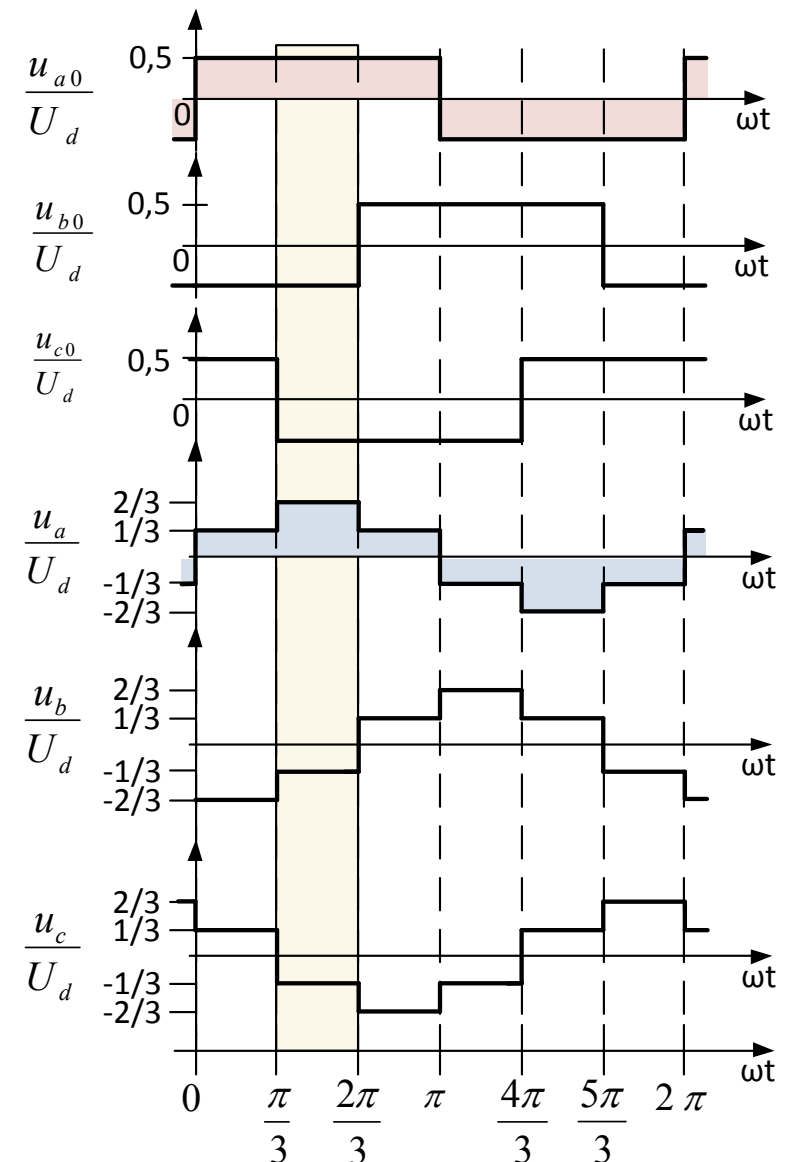
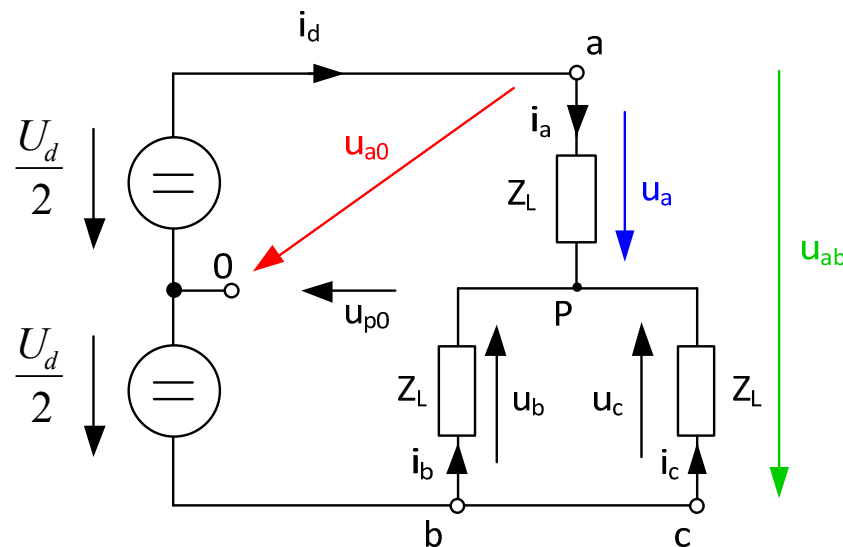
# Blocktaktung (1)

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



# Blocktaktung (2)

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

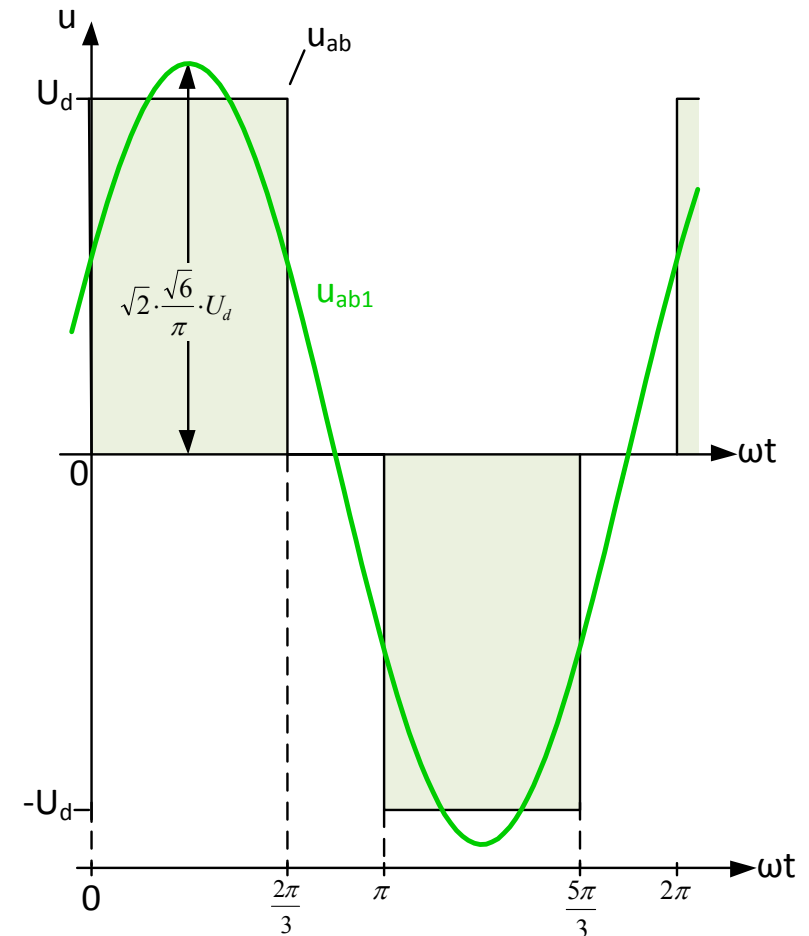


# Blocktaktung: Grundschwungung

- Zur Drehmomenterzeugung in einer Drehfeldmaschine tragen nur die Grundschwingungen von Strom und Spannung bei
- Grundschwingung 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

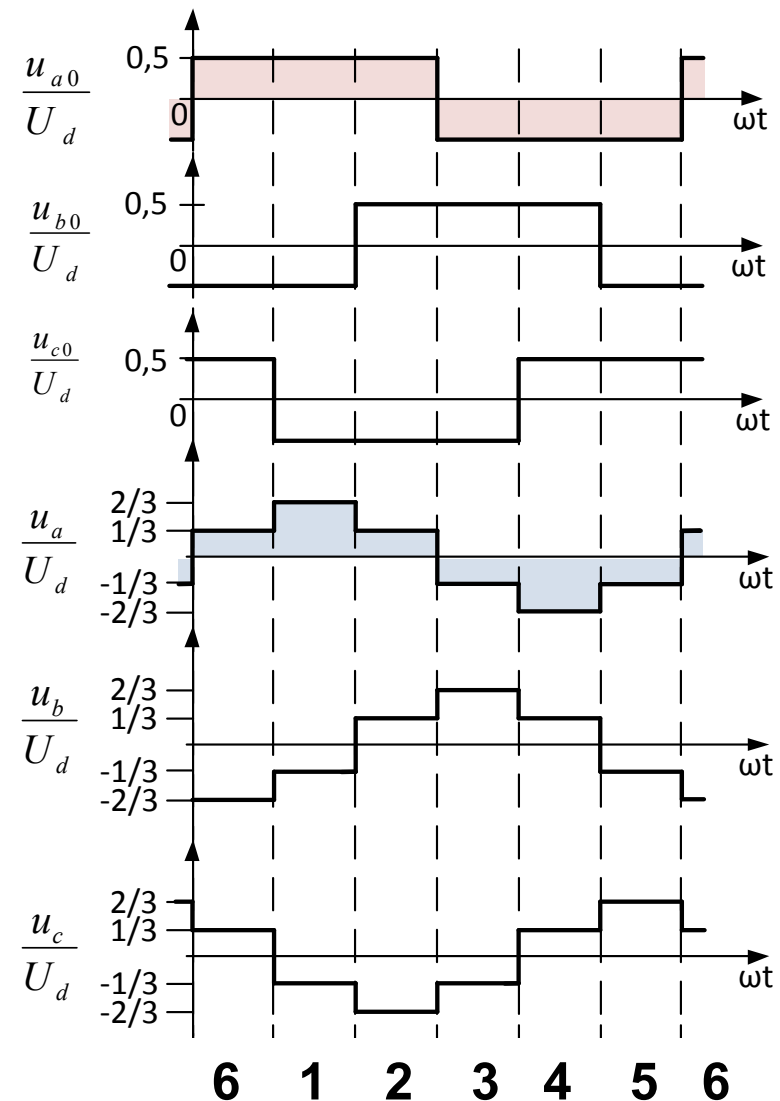
- $\underline{u} = \frac{2}{3} \cdot (u_1 + \underline{a} \cdot u_2 + \underline{a}^2 \cdot u_3)$

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

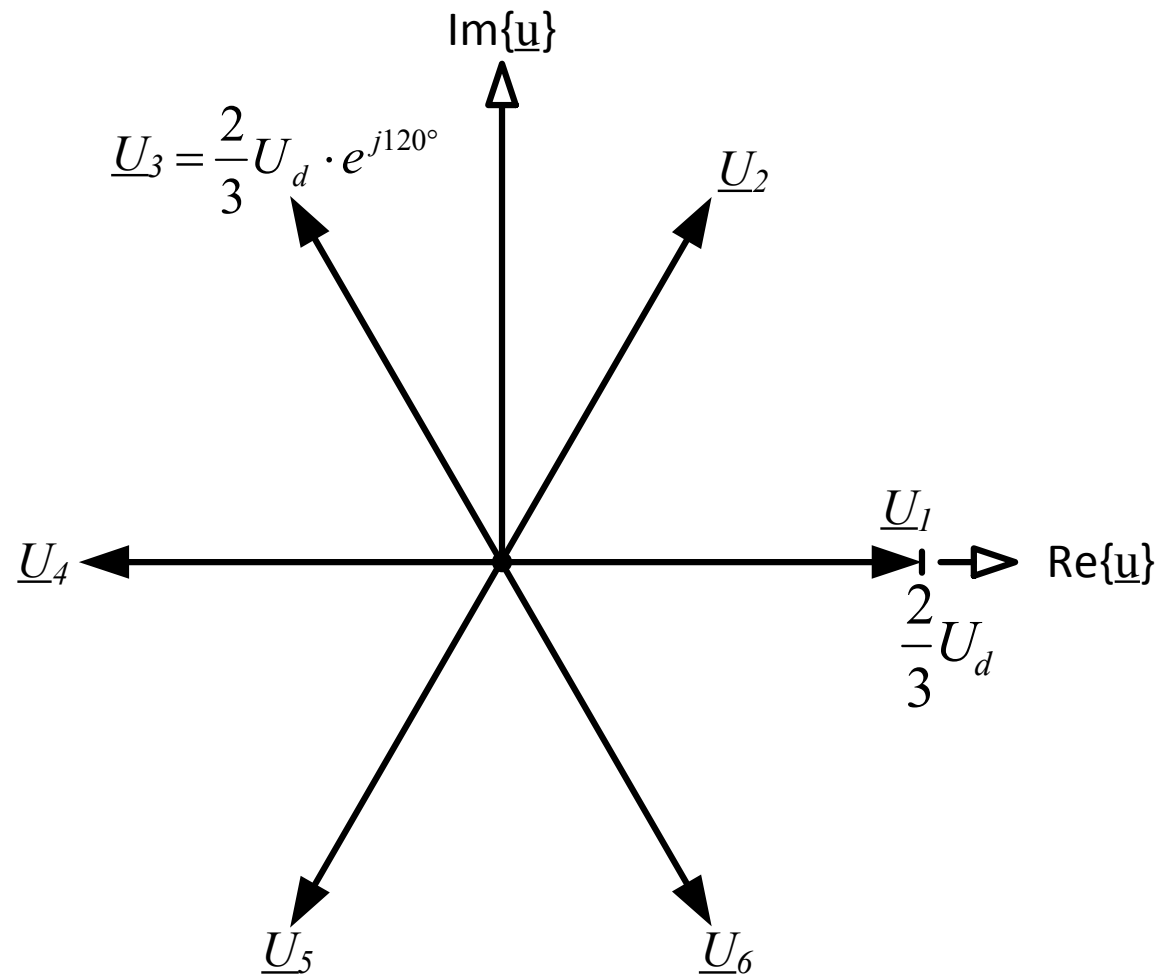


# Raumzeigerdarstellung (2)

| 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  |

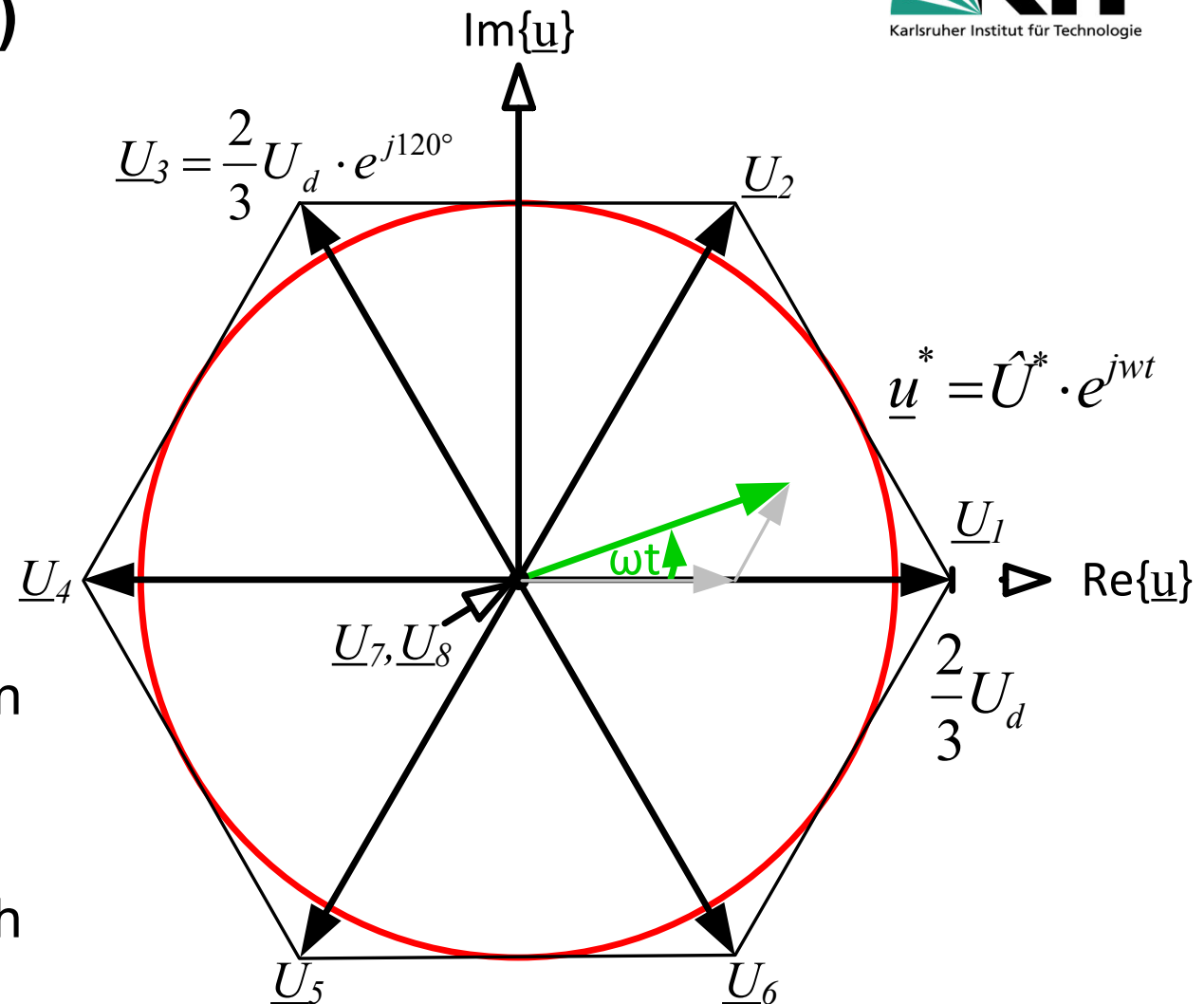
# Raumzeigerdarstellung der Schaltzustände bei Blocktaktung

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



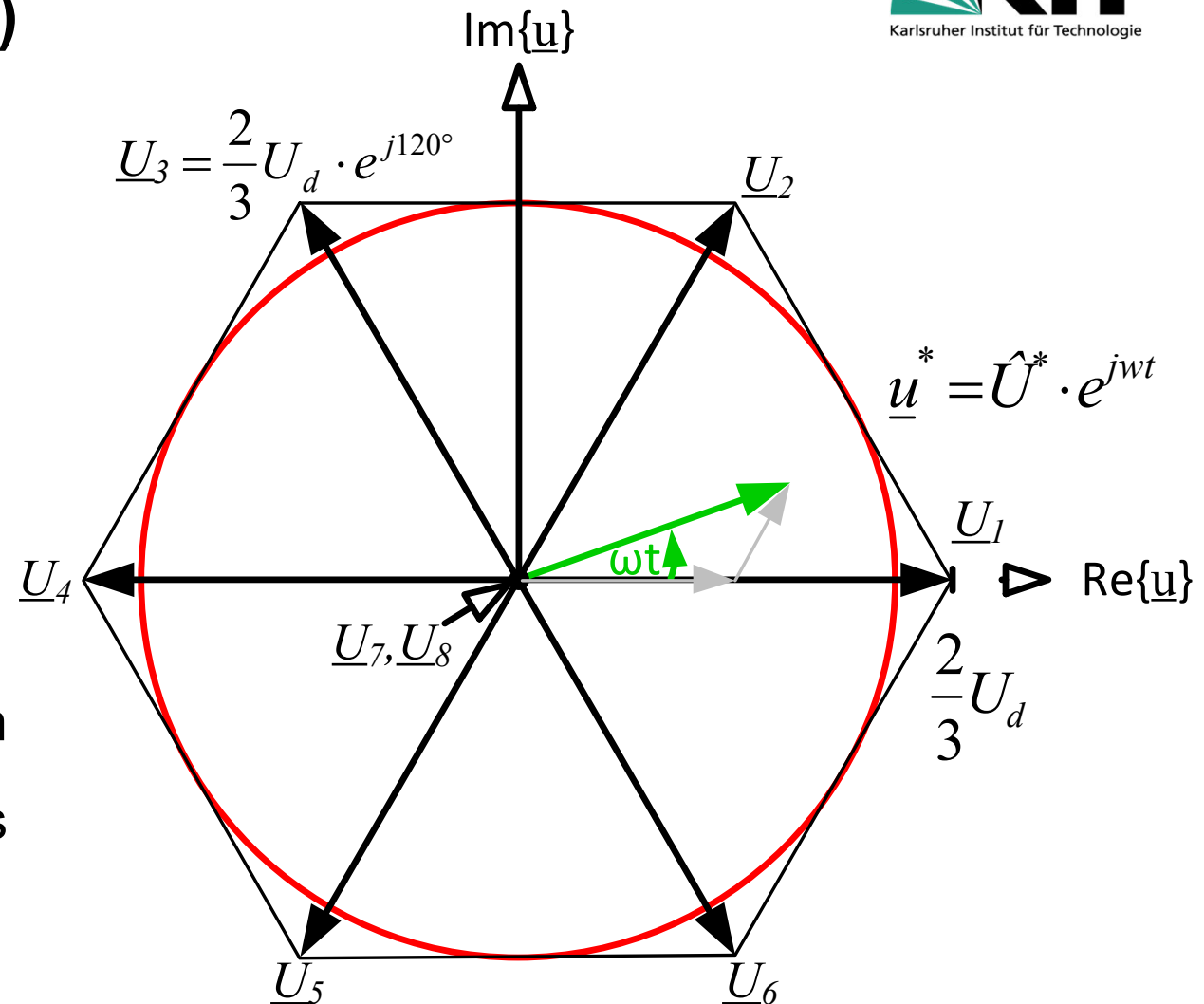
# Raumzeigermodulation (1)

- 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



# Grundschwingung bei Raumzeigermodulation

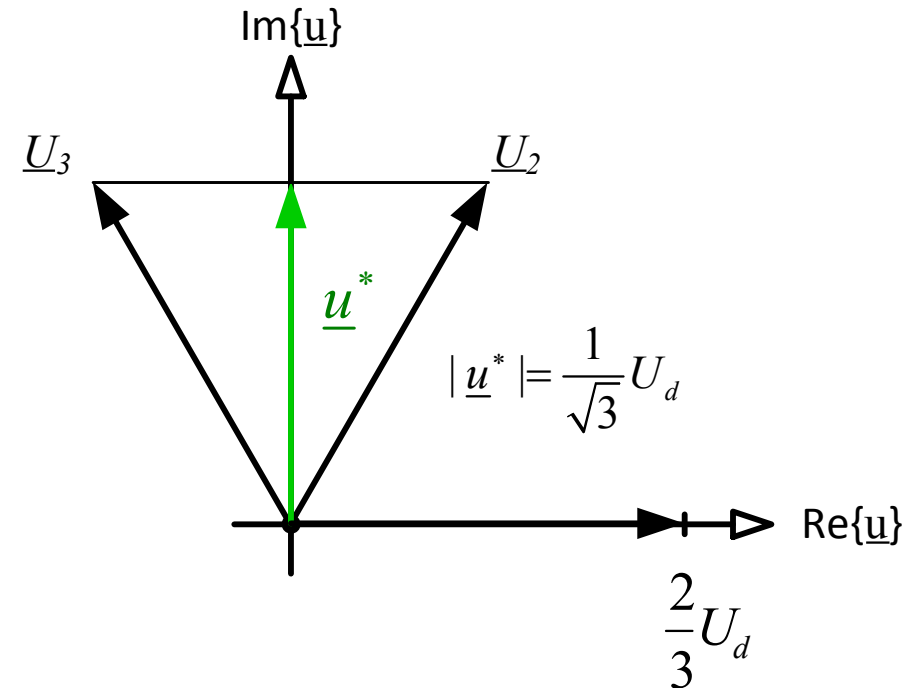
- Der Radius des Innkreises beträgt  $\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_d$

- 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:  $U_L = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_d$