

Grundlagen elektrische Antriebe

Kapitel 7: Grundlagen Drehfeldmaschinen

Prof. Dr.-Ing. A. Kleimaier

Aktuelles Kapitel

Kapitel 1: Einführung – Beispiele, Anwendungsgebiete

Kapitel 2: Grundlagen Magnetischer Kreis

3: Aufbau und Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine

4: Gesteuerter Betrieb der Gleichstrommaschine

4a: Leistungselektronik für Gleichstrommaschinen

5: Drehzahl geregelter Gleichstromantrieb: Systemanalyse

6: Elektrofahrzeuge

Grundverständnis
elektrischer Antrieb

- Gleichstrommaschine
- Steuerung & Regelung
- Gleichrichter, DC-Steller

→ **Kapitel 7:** Grundlagen Drehfeldmaschinen

8: Aufbau und Betriebsverhalten der Asynchronmaschine

9: Gesteuerter Betrieb der Asynchronmaschine

10: Betriebsarten und drehzahlvariabler Betrieb der ASM

10a: Leistungselektronik für Drehfeldmaschinen

Drehfeldmaschinen:

- Drehfeldwicklung
- Asynchronmaschine
- Wechselrichtertechnik

Kapitel 11: Aufbau und Betriebsverhalten Synchronmaschine

12: Aktuelle Entwicklung: neue Maschinenvarianten

13: Ansteuerung und Systemverhalten BLDC-Motor

Synchronmaschine:

- fremderregte SM
- PMSM, MDM, BLDC-Motor

Inhalt Kapitel 7 : Grundlagen Drehfeldmaschinen

Stator von Drehfeldmaschinen:

7.0 Wechselstrom und Drehstrom

7.1 Wicklungsaufbau

7.2 Erzeugung Drehfeld

7.3 Ersatzschaltbild

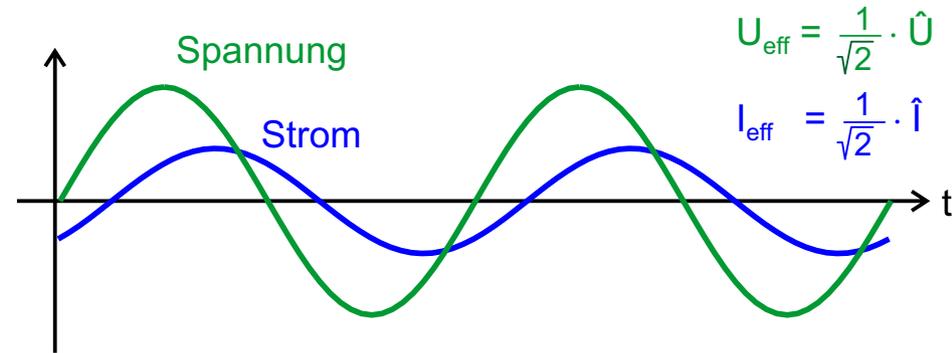
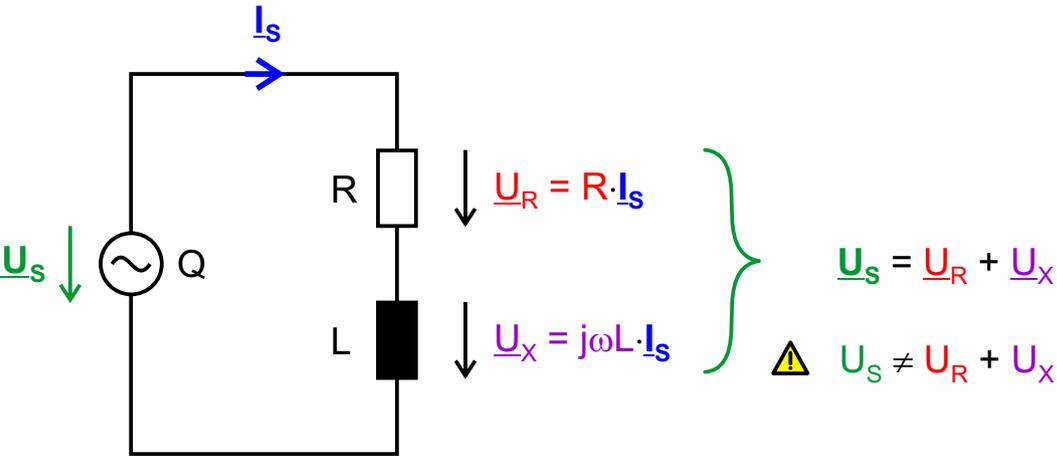
7.4 Vergleich mit Gleichstrommaschine

7.5 Maschinenvarianten

7.6 Raumzeiger

7.0 Wechselstrom

Wechselstromkreis: ohm'sch-induktive Last



$\underline{U}_s, \underline{I}_s$: komplexe Zeiger

Kreisfrequenz: $\omega = 2\pi \cdot f$

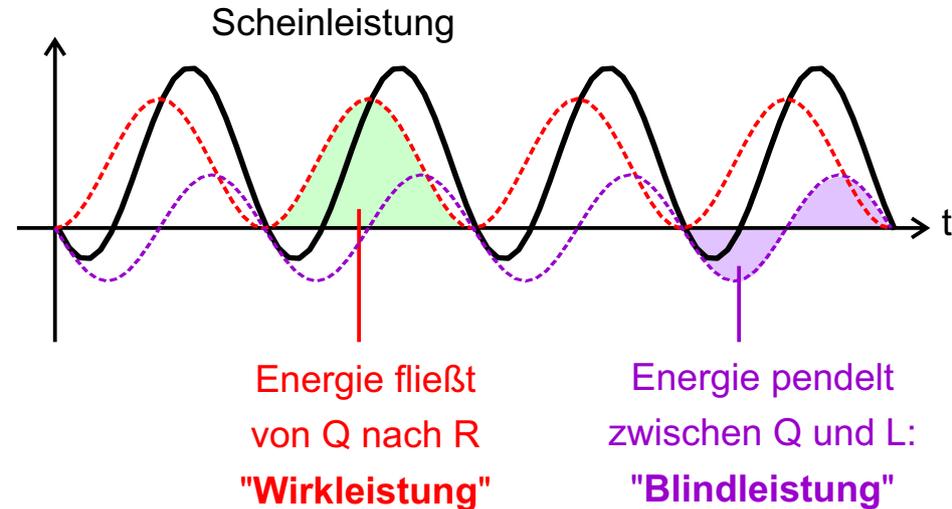
$$S = \underline{U}_s \cdot \underline{I}_s = \frac{1}{2} \hat{U}_s \cdot \hat{I}_s$$

↑
Effektivwerte

↑
Scheitelwerte

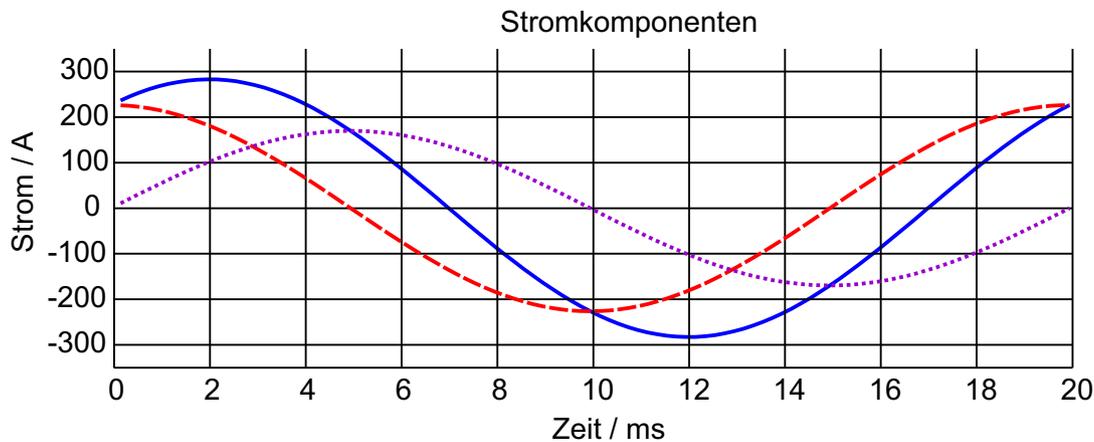
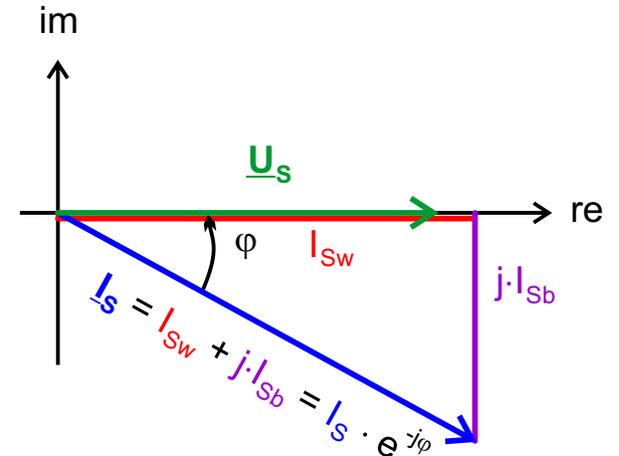
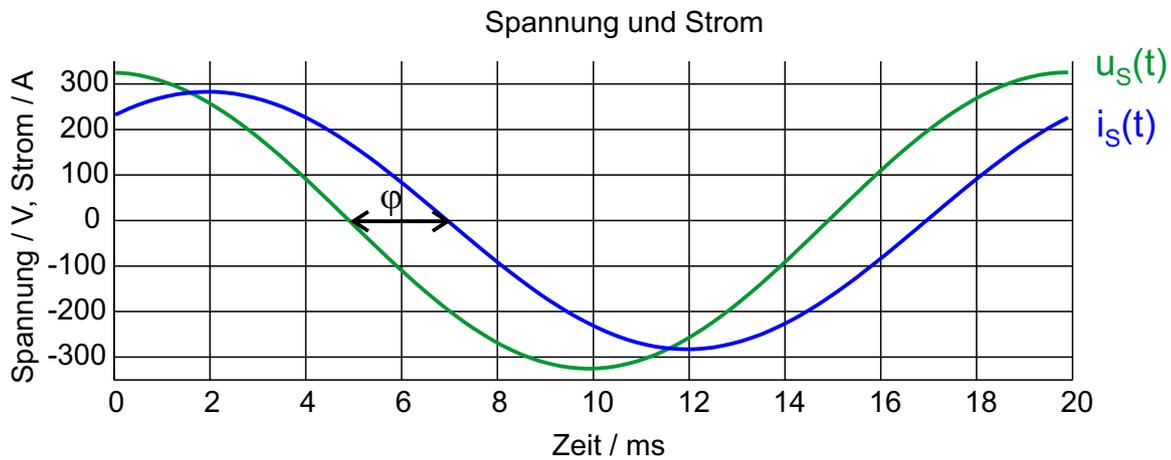
$$\underline{I}_s = I_{sw} + j \cdot I_{sb} = I_s \cdot e^{-j\varphi}$$

↑
Effektivwert =
Betrag des komplexen
Stromzeigers



7.0 Wechselstrom

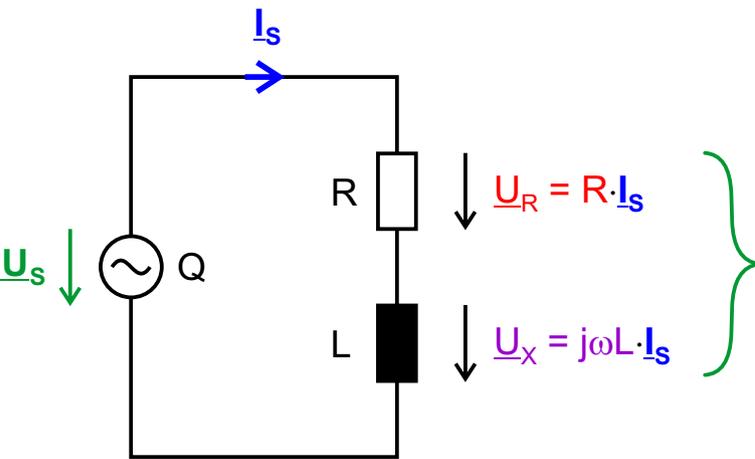
Wechselstromkreis: Zeitverläufe



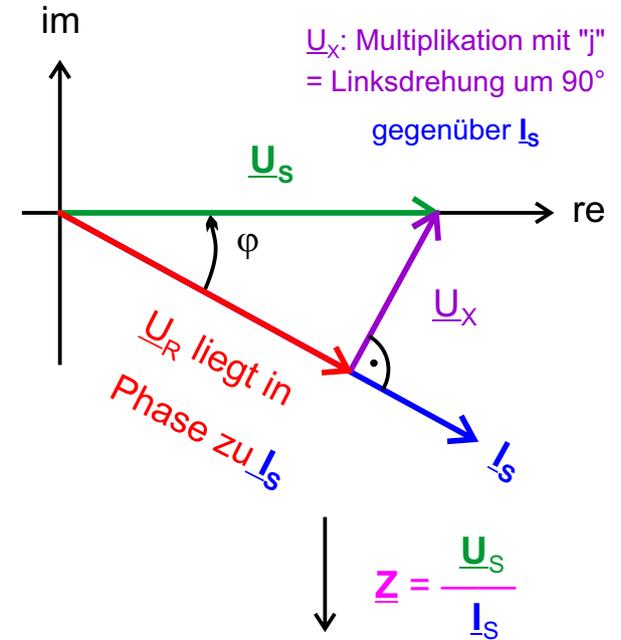
- Wirkkomponente I_{sw} in Phase mit U_s
- Blindkomponente I_{sb} 90° nacheilend

7.0 Wechselstrom

Wechselstromkreis: Zeigerdiagramm



$$\underline{U}_s = \underline{U}_R + \underline{U}_X$$

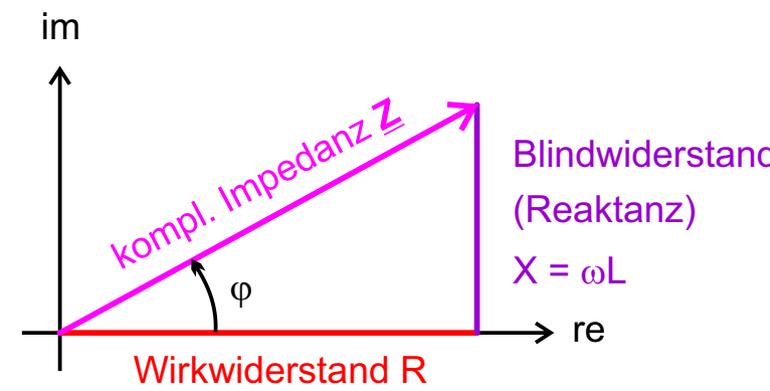


$$\varphi = \text{atan} \frac{X}{R}$$

$$\underline{I}_s = \frac{\underline{U}_s}{\underline{Z}} = \frac{\underline{U}_s}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

Scheinwiderstand

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

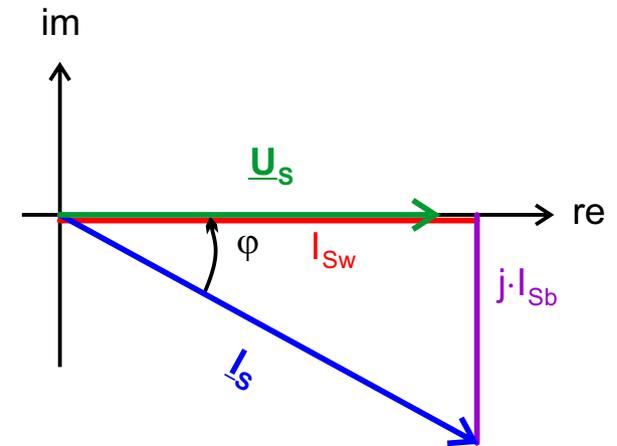


7.0 Wechselstrom

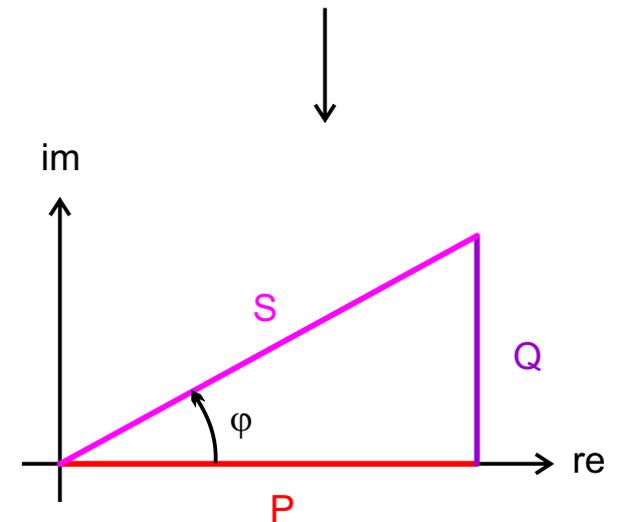
Wechselstromkreis: Wirk- und Blindleistung

Wirkkomponente des Stromes I_{Sw} liegt
in Phase mit der Spannung: Wirkleistung

Blindkomponente des Stromes I_{Sb} steht
senkrecht zur Spannung: Blindleistung

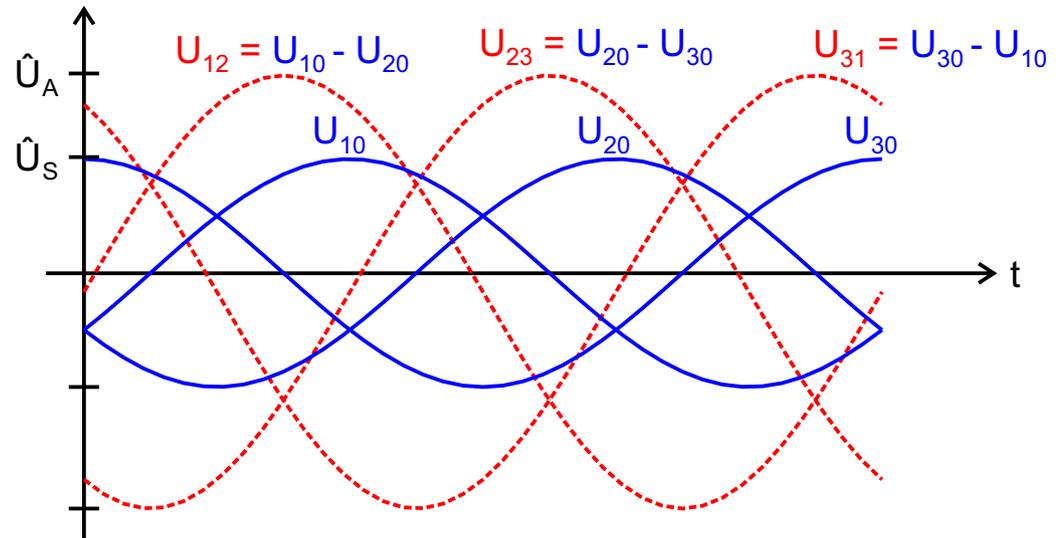
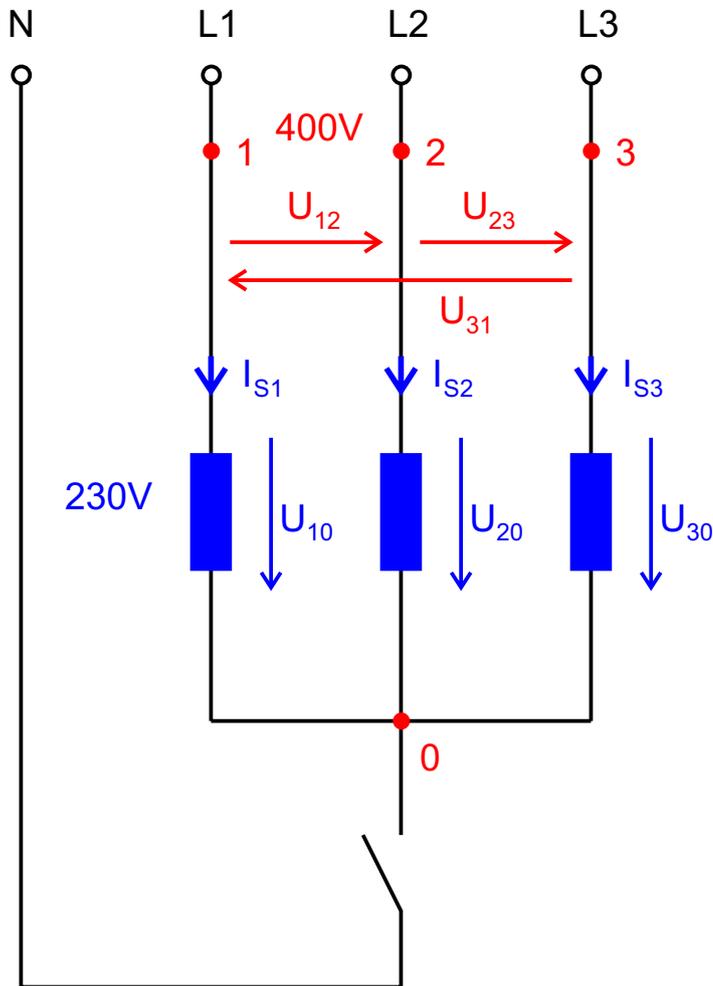


Scheinleistung	$S = U_S \cdot I_S$	Einheit: VA
Wirkleistung	$P = U_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi$	Einheit: W
Blindleistung	$Q = U_S \cdot I_S \cdot \sin \varphi = \sqrt{S^2 - P^2}$	Einheit: var Voltampere Reaktiv



7.0 Drehstrom

Außenleiter- und Nullpunktspannungen



Sternschaltung (Y-Schaltung), symmetrische Last \rightarrow Nulleiter stromlos

• Außenleiterspannung $U_A = \sqrt{3} \cdot U_S$ Strangspannung bei Y-Schaltung

• Scheinleistung:

• Wirkleistung:

• Blindleistung:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_A \cdot I_S = 3 \cdot U_S \cdot I_S = \frac{3}{2} \cdot \hat{U}_S \cdot \hat{I}_S$$

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

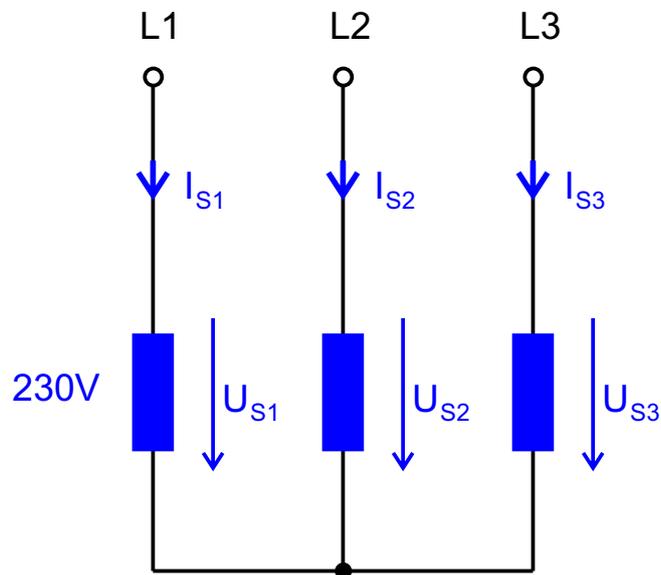
$$Q = S \cdot \sin \varphi$$

7.0 Drehstrom

Stern- und Dreieckschaltung

Nennspannung Drehstromnetz = Außenleiterspannung = 400V

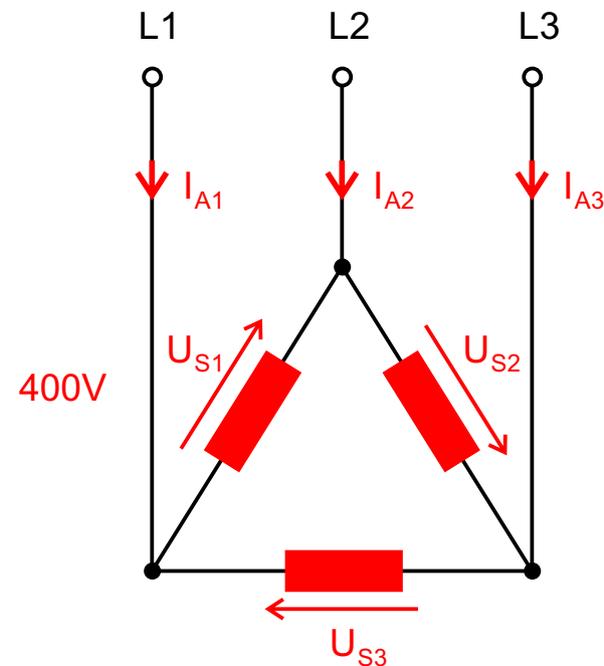
Y-Schaltung am 400V-Netz



$$\text{Strangspannung} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Außenleiterspannung}$$

$$\text{Strangstrom} = \text{Außenleiterstrom}$$

Δ-Schaltung am 400V-Netz

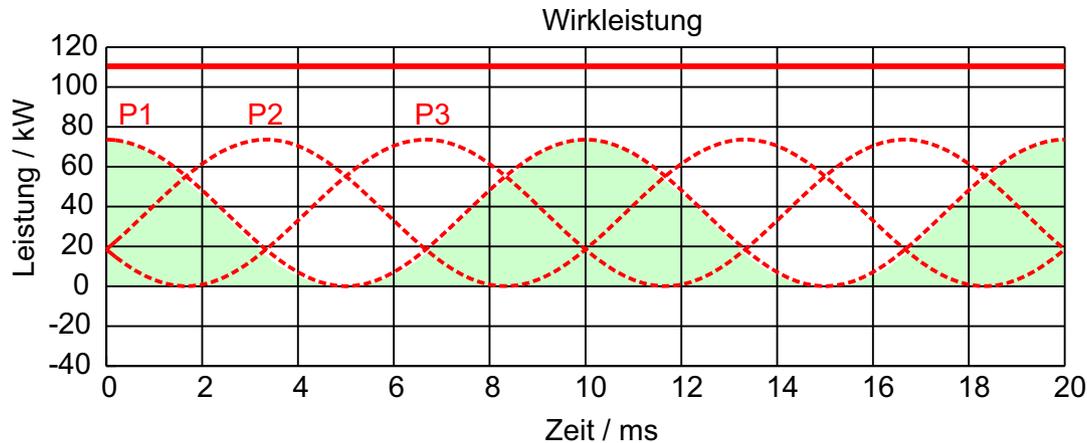


$$\text{Strangspannung} = \text{Außenleiterspannung}$$

$$\text{Strangstrom} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Außenleiterstrom}$$

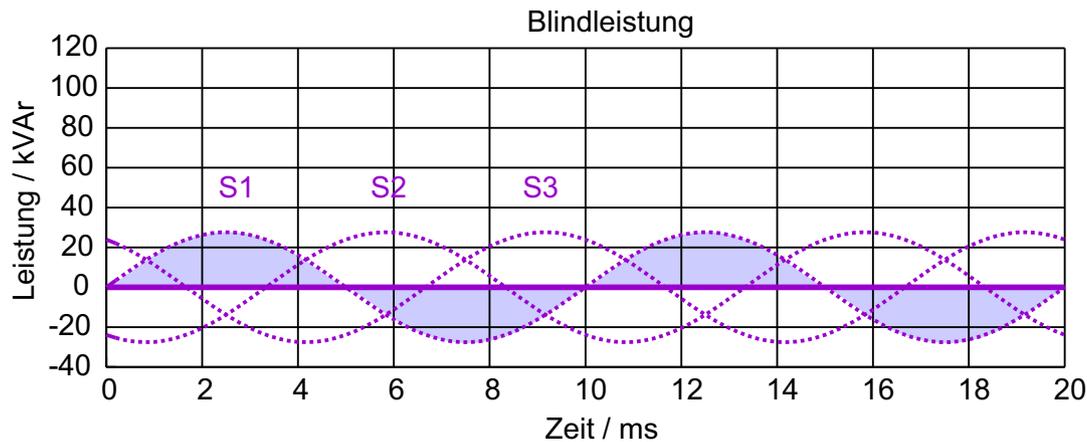
7.0 Drehstrom

Zeitverhalten Wirk- und Blindleistung – alle drei Phasen



Wirkleistung:

- $P(t) = U_{S1} \cdot I_{S1w} + U_{S2} \cdot I_{S2w} + U_{S3} \cdot I_{S3w}$
- $\cos^2 x$: Wechselanteile heben sich auf
- $\cos^2 x$: Gleichanteile addieren sich: $P = \frac{3}{2} \cdot \hat{U}_S \cdot \hat{I}_{Sw}$

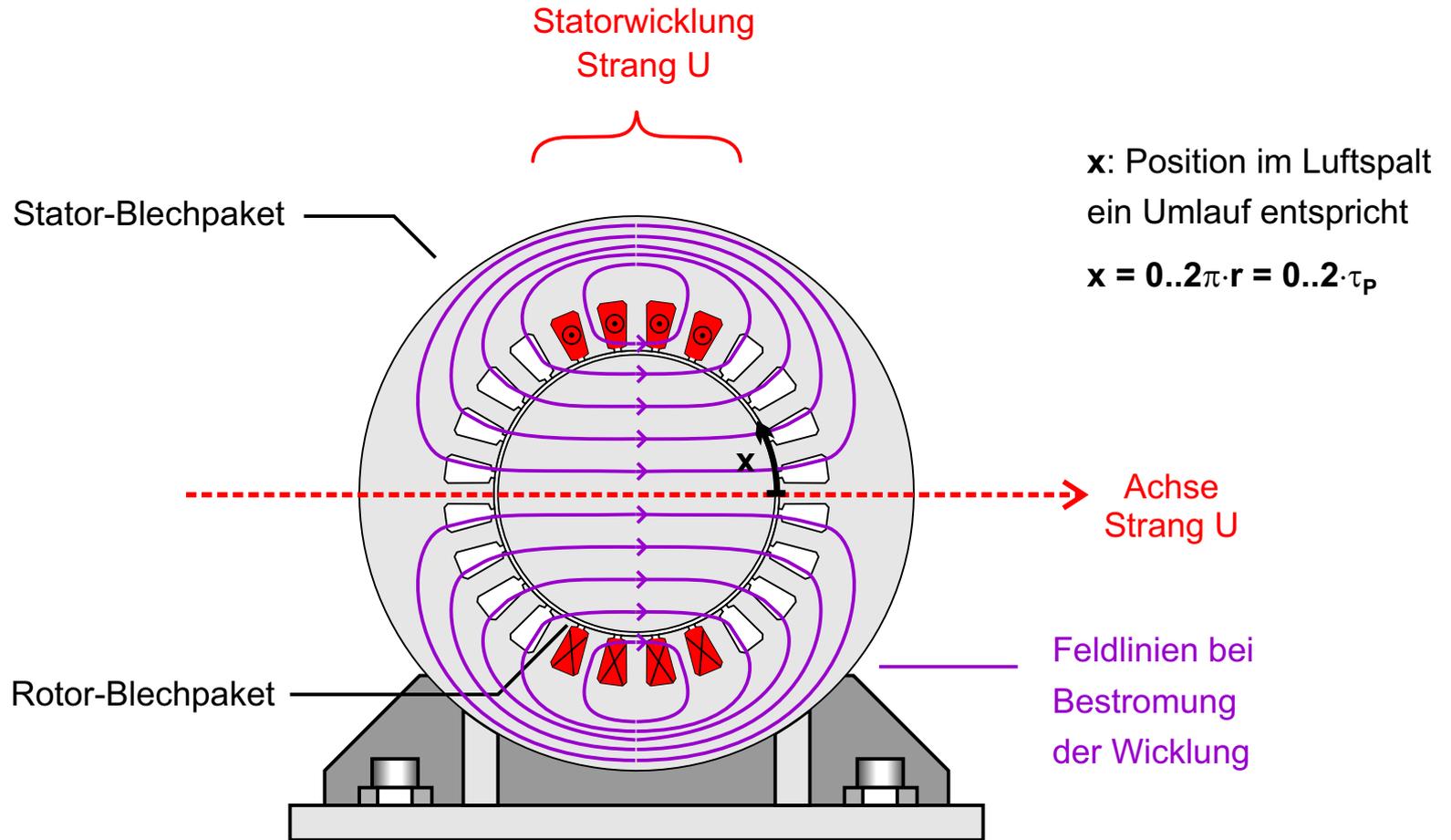


Blindleistung:

- $Q(t) = U_{S1} \cdot I_{S1b} + U_{S2} \cdot I_{S2b} + U_{S3} \cdot I_{S3b}$
- Summe aller 3 Phasen ergibt Null
- Blindenergie pendelt jedoch über die Einzelphasen. Deshalb: $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$

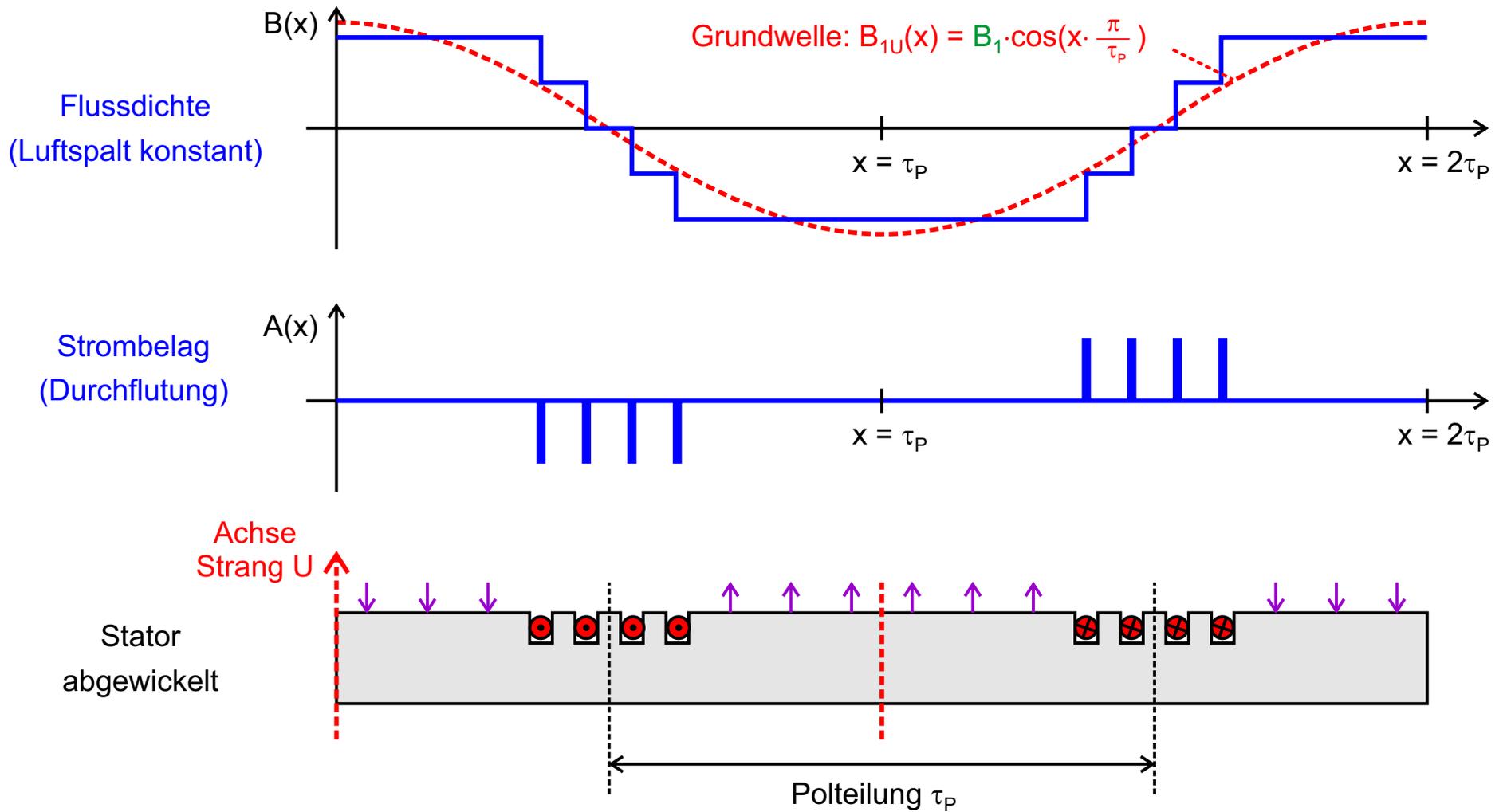
7.1 Wicklungsaufbau

Aufbau und Feldverlauf Phase U für $p = 1$



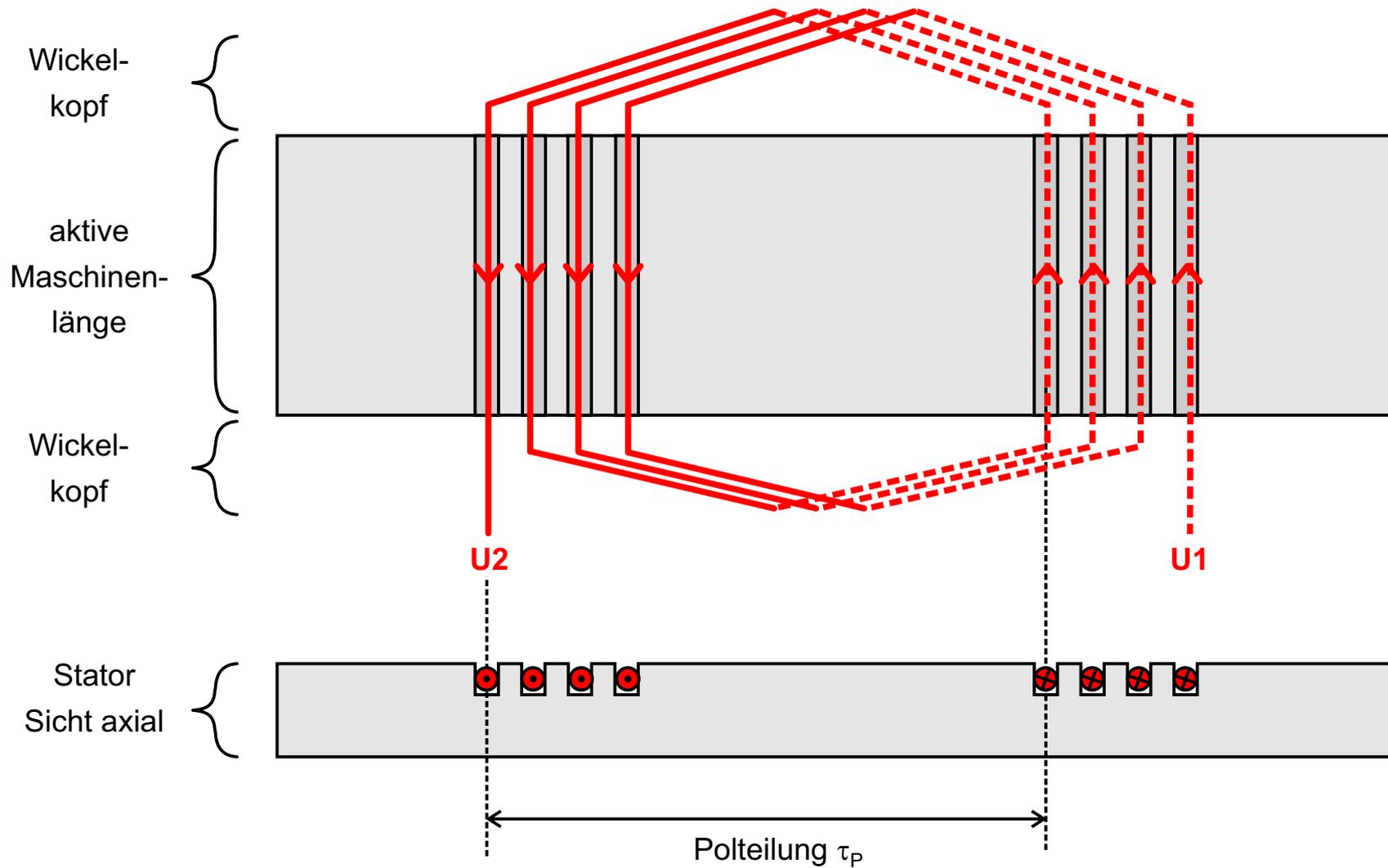
7.1 Wicklungsaufbau

Durchflutung und Flussdichteverlauf im Luftspalt



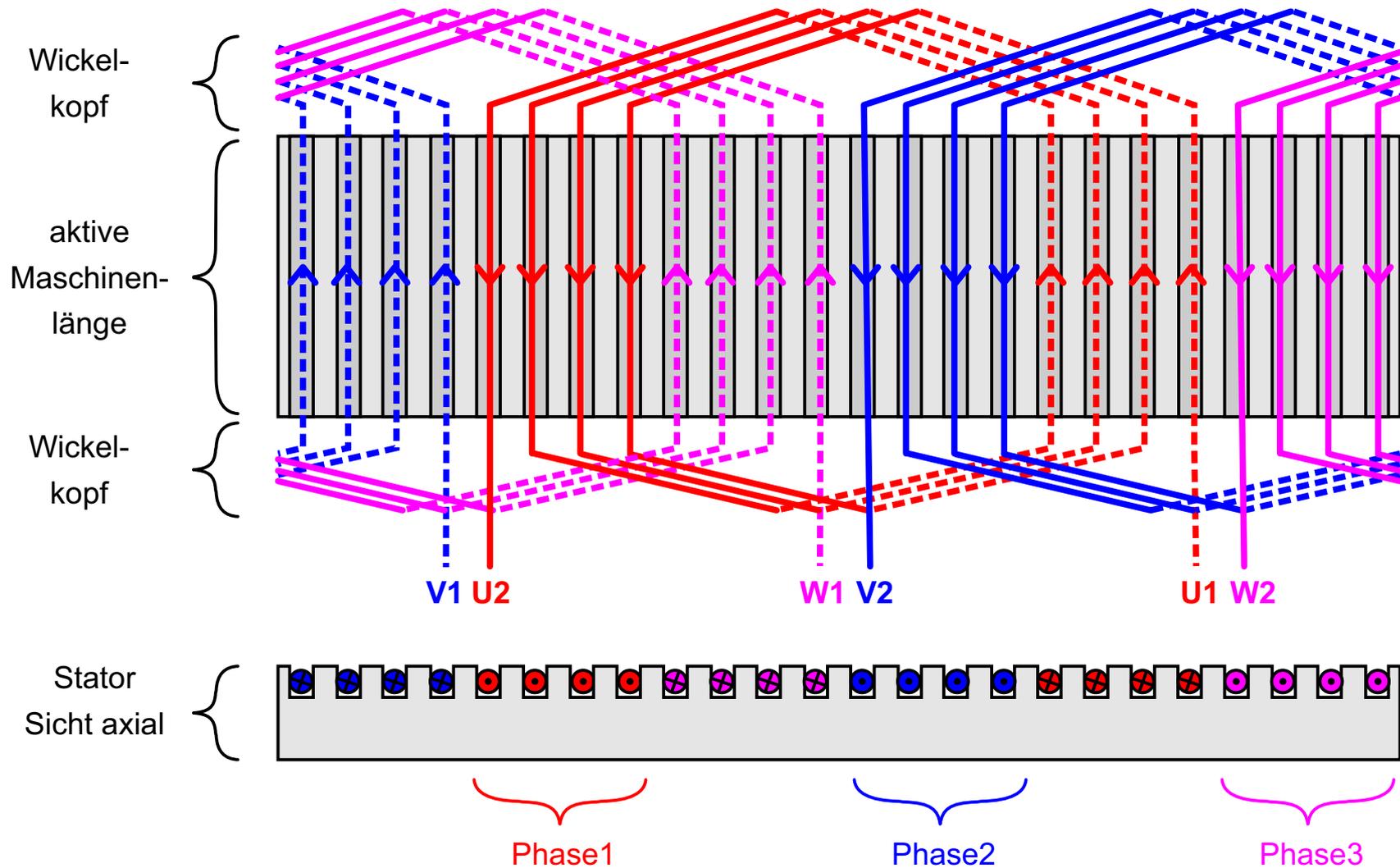
7.1 Wicklungsaufbau

hier: Strangwicklung mit fester Spulenweite



7.1 Wicklungsaufbau

Drehfeldwicklung: drei um 120° räumlich versetzte Systeme



7.2 Erzeugung Drehfeld

Grundprinzip

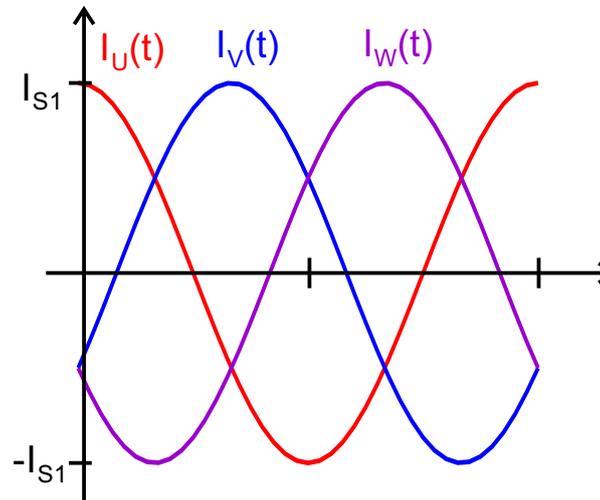
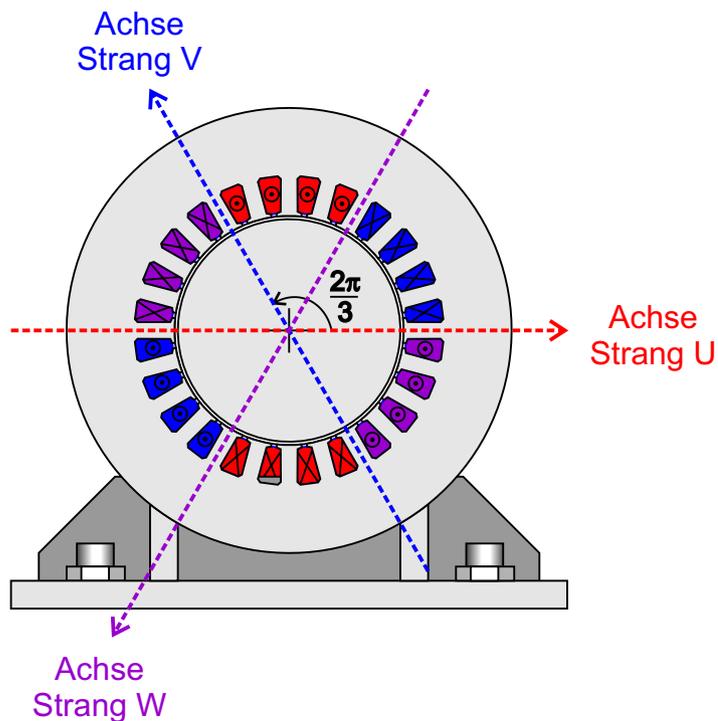
Statorwicklung mit räumlich um 120° versetzten Strängen

+

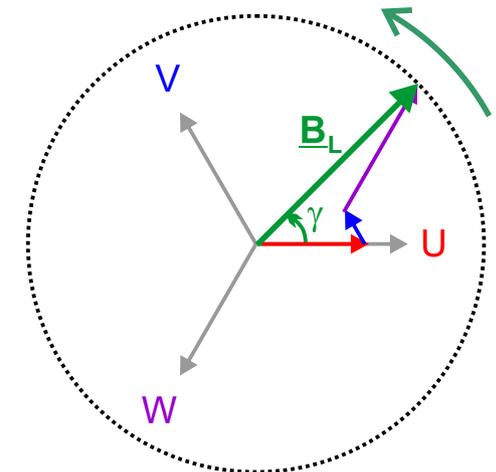
Drehstrom mit zeitlich um 120° versetzten Strangströmen

=

Drehfeld



Betrag und Lage:
Raumzeiger \underline{B}_L



komplexer Raumzeiger: $\underline{B}_L = B_L \cdot e^{j\gamma}$ Betrag von $\underline{B}_L =$ Zeigerlänge: $B_L = \frac{3}{2} B_1$ (mehr dazu in Abschn. 7.6)

Im Luftspalt der Maschine: umlaufende Flussdichtewelle $B(x,t) = \frac{3}{2} B_1 \cdot \cos(\omega \cdot t - x \cdot \frac{\pi}{\tau_p})$

7.2 Erzeugung Drehfeld

Grundprinzip, mathematisch dargestellt

Flussdichte ortsabhängig

$$B_U(x) = B_{1U} \cdot \cos\left(x \cdot \frac{\pi}{\tau_p}\right)$$

$$B_V(x) = B_{1V} \cdot \cos\left(x \cdot \frac{\pi}{\tau_p} - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$B_W(x) = B_{1W} \cdot \cos\left(x \cdot \frac{\pi}{\tau_p} - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Bestromung



$$B_{1n} \sim I_n(t), \quad n = U, V, W$$

$$B_{1U} = B_1 \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$B_{1V} = B_1 \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$B_{1W} = B_1 \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Flussdichte orts- und zeitabhängig

$$B_U(t, x) = B_1 \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \cos\left(x \cdot \frac{\pi}{\tau_p}\right)$$

$$B_V(t, x) = B_1 \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(x \cdot \frac{\pi}{\tau_p} - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$B_W(t, x) = B_1 \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(x \cdot \frac{\pi}{\tau_p} - \frac{4\pi}{3}\right)$$

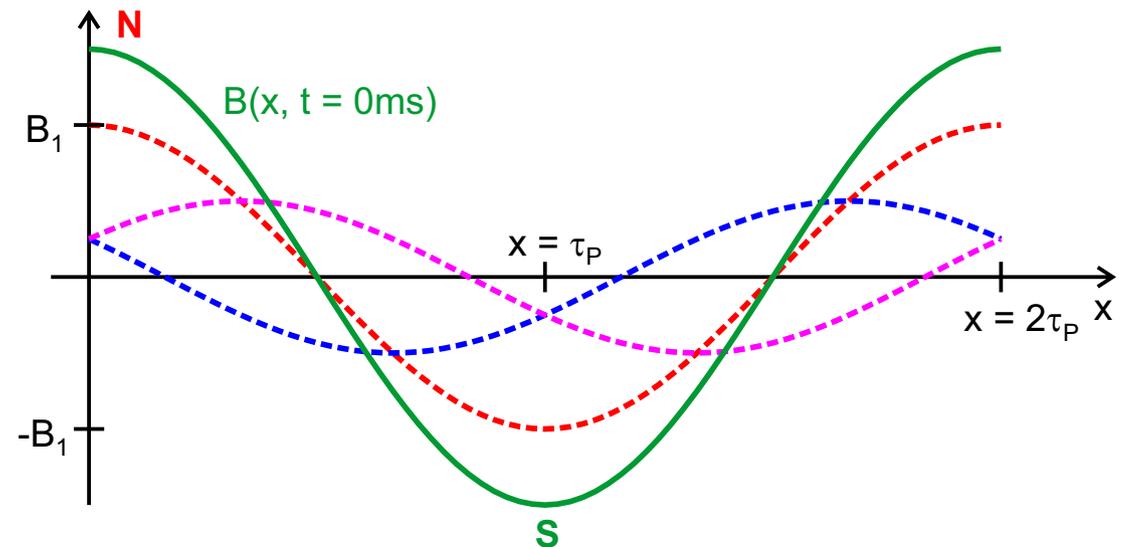
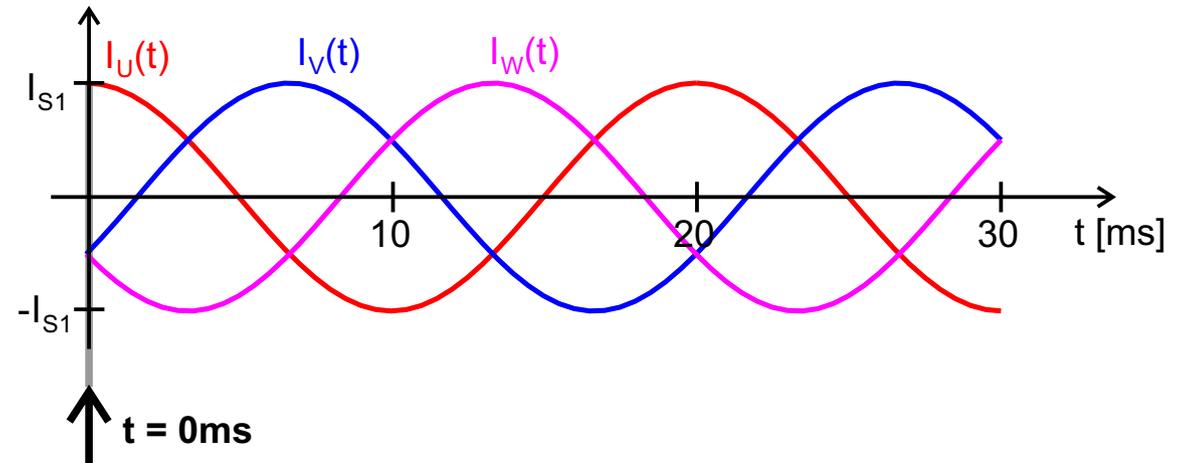
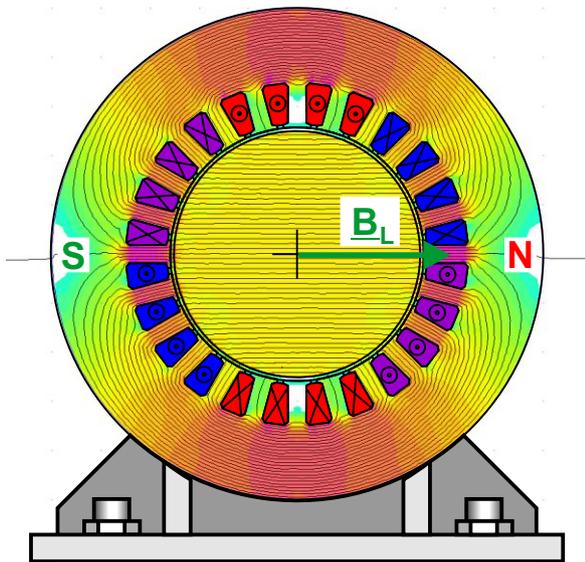
Resultierende Flussdichte:

$$B(t, x) = B_U(t, x) + B_V(t, x) + B_W(t, x)$$

$$B(t, x) = \frac{3}{2} B_1 \cdot \cos\left(\omega \cdot t - x \cdot \frac{\pi}{\tau_p}\right)$$

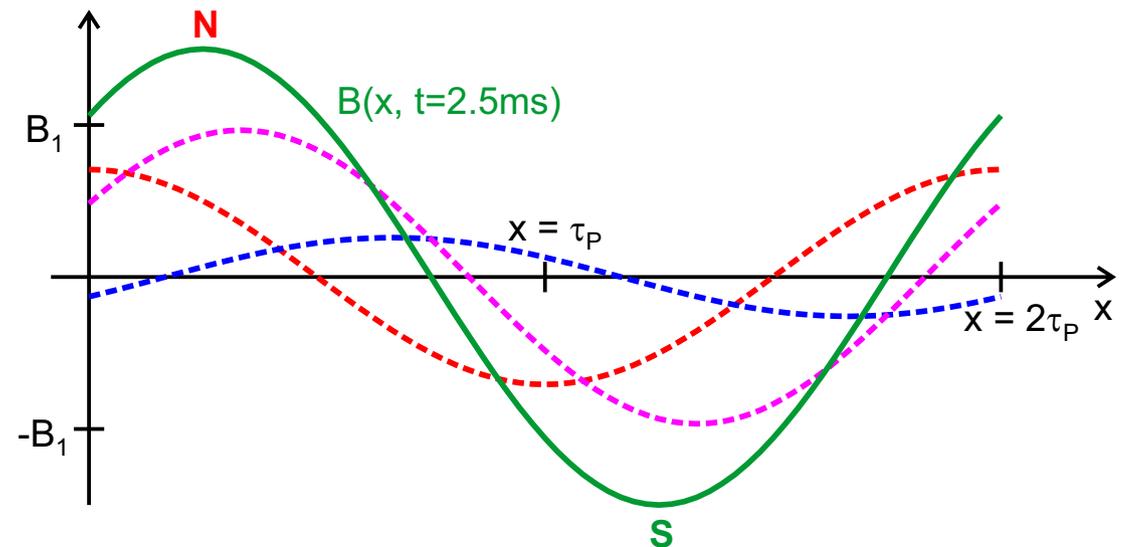
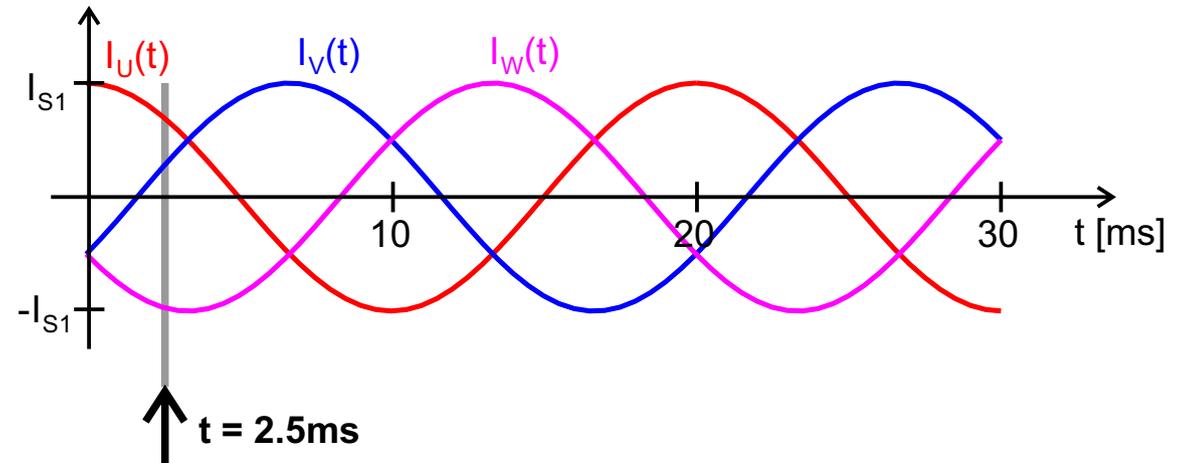
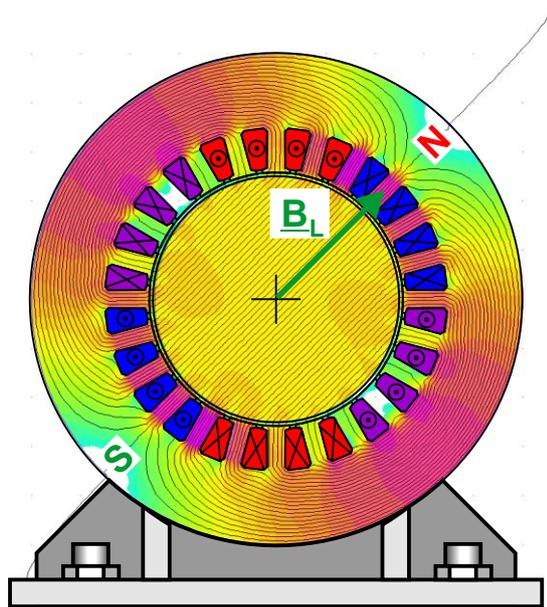
7.2 Erzeugung Drehfeld

Bestromung der Drehfeldwicklung



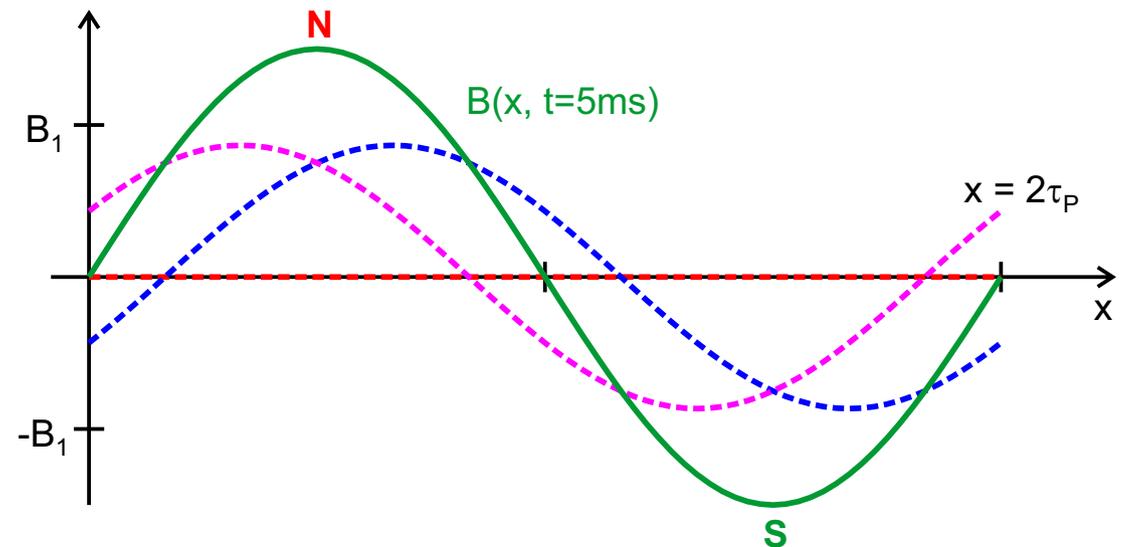
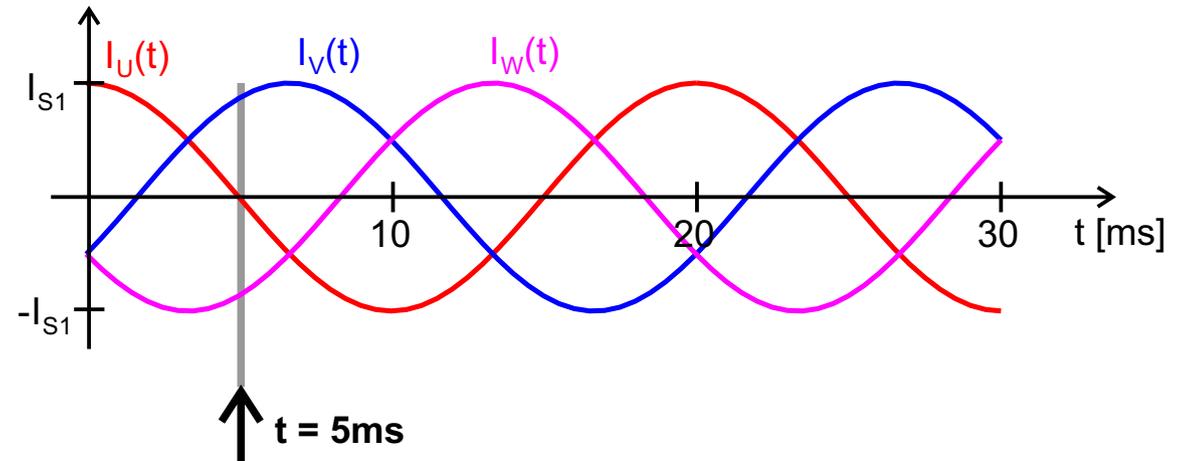
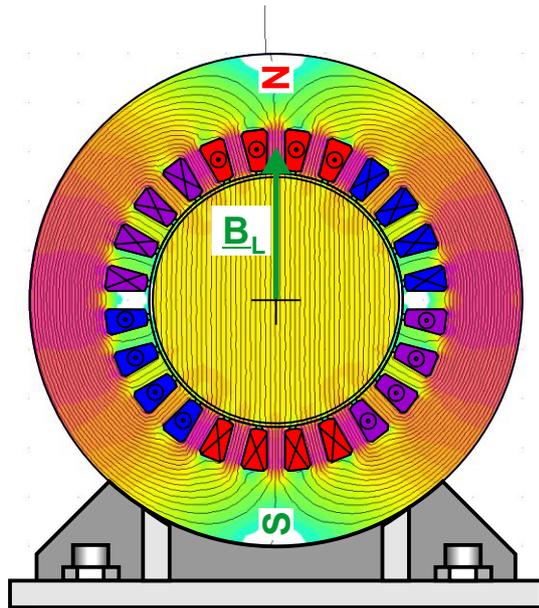
7.2 Erzeugung Drehfeld

Bestromung der Drehfeldwicklung



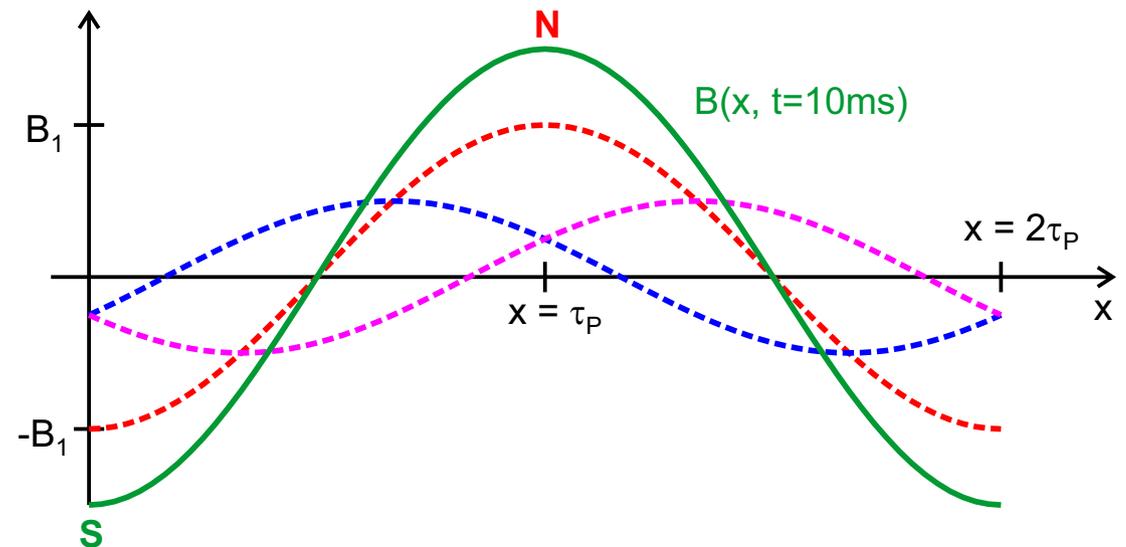
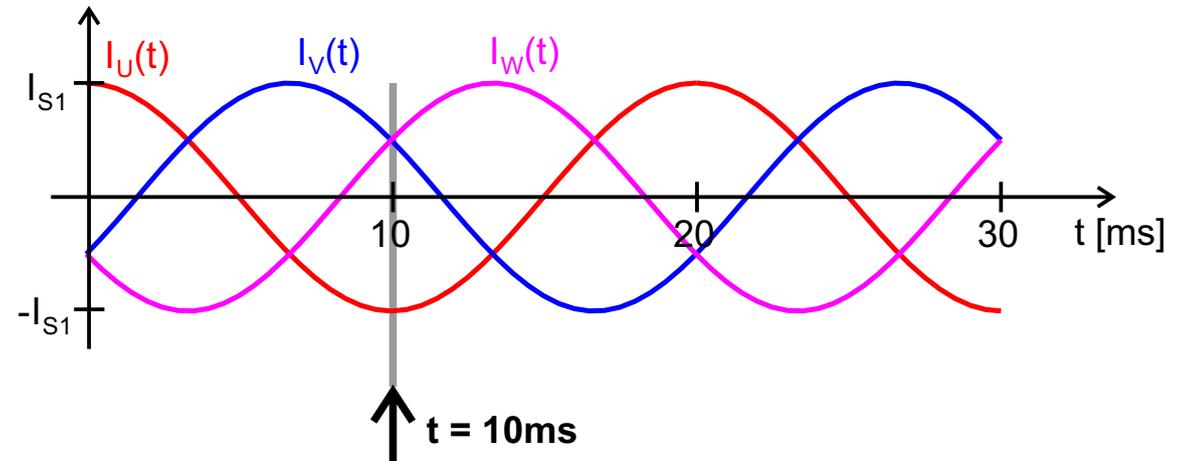
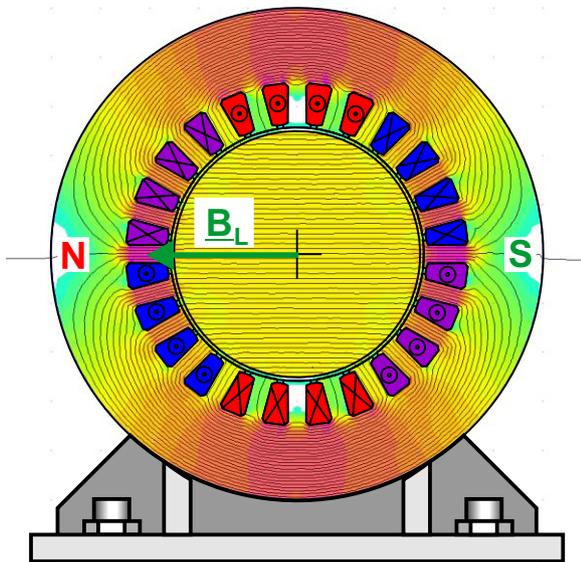
7.2 Erzeugung Drehfeld

Bestromung der Drehfeldwicklung



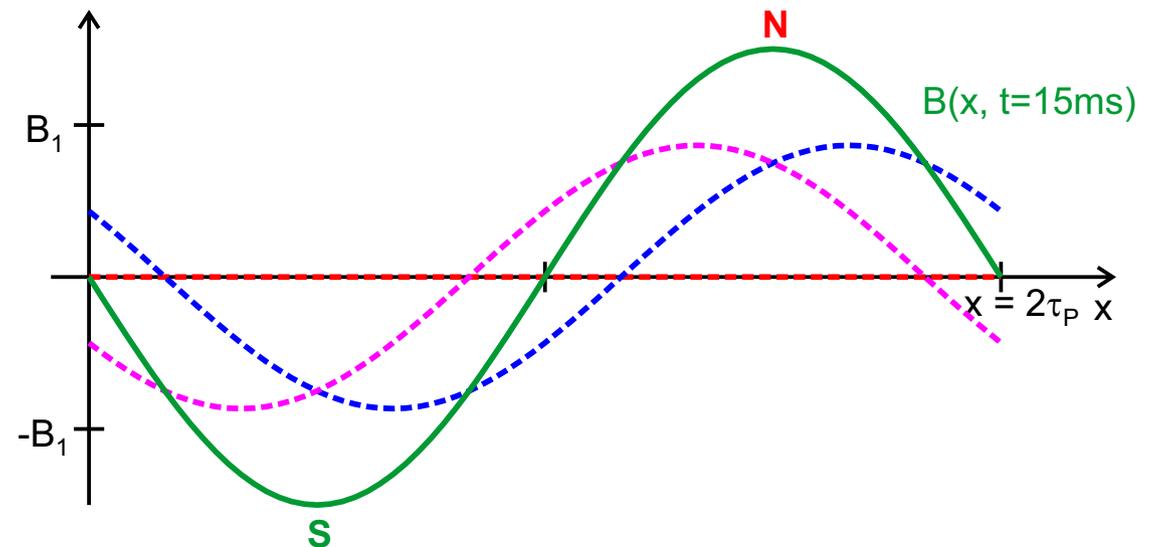
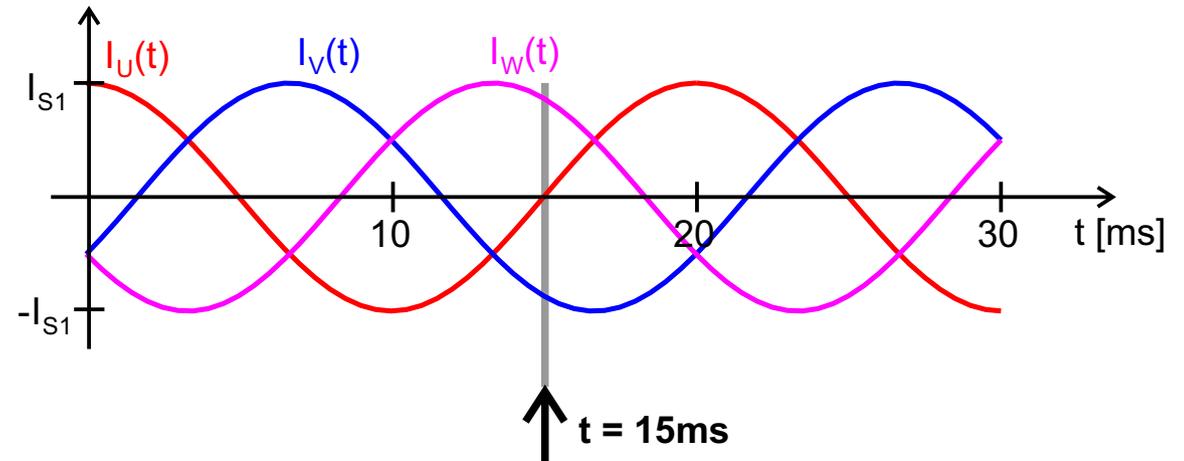
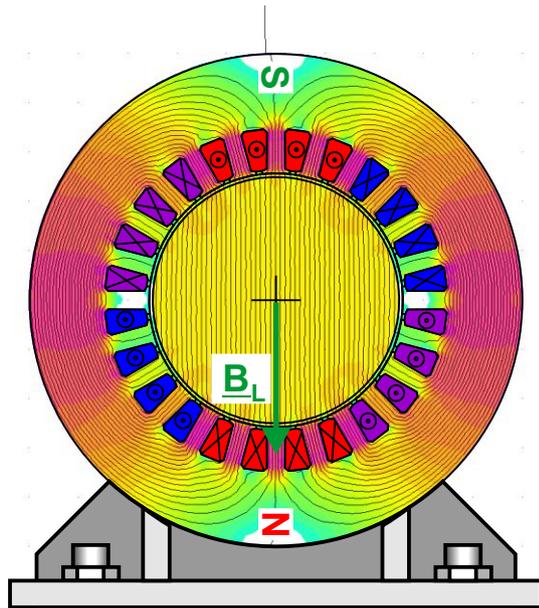
7.2 Erzeugung Drehfeld

Bestromung der Drehfeldwicklung



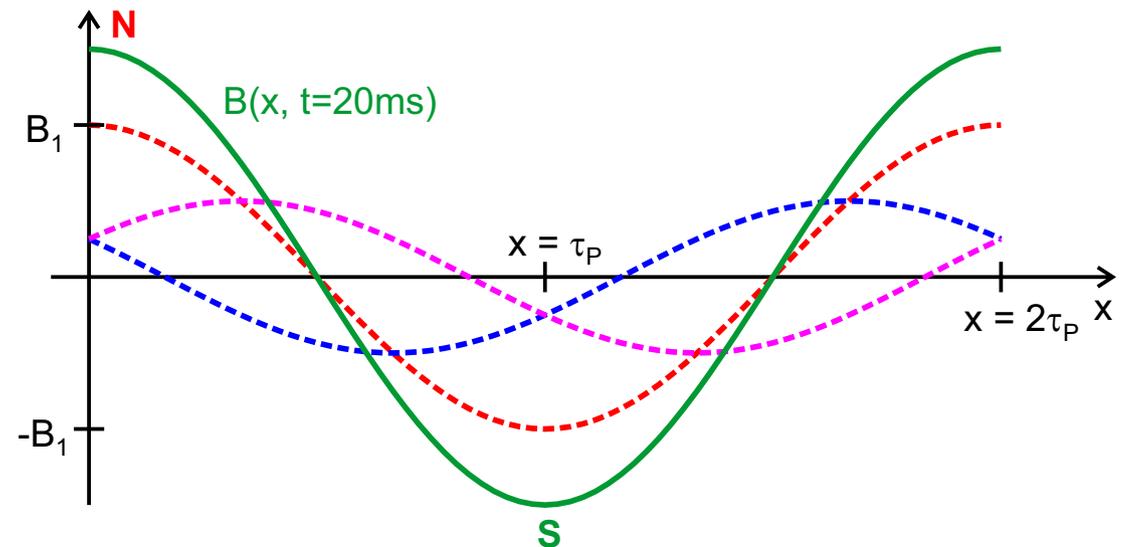
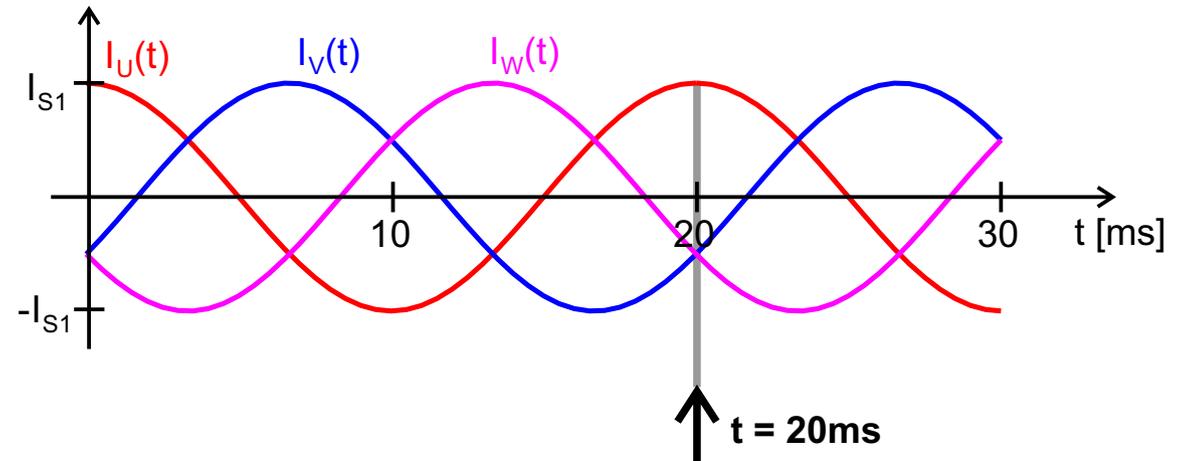
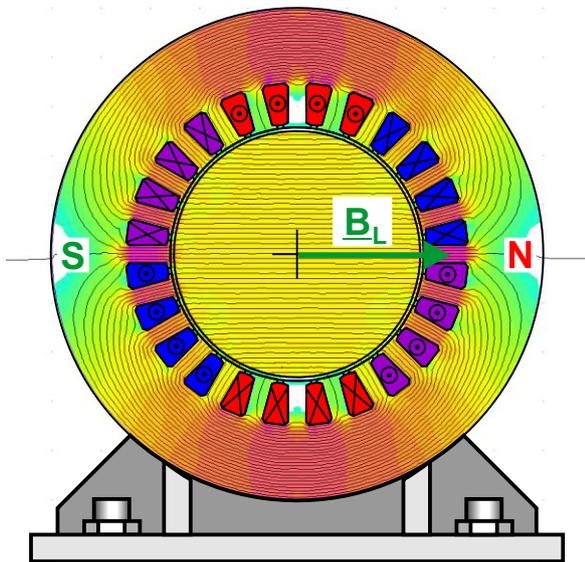
7.2 Erzeugung Drehfeld

Bestromung der Drehfeldwicklung



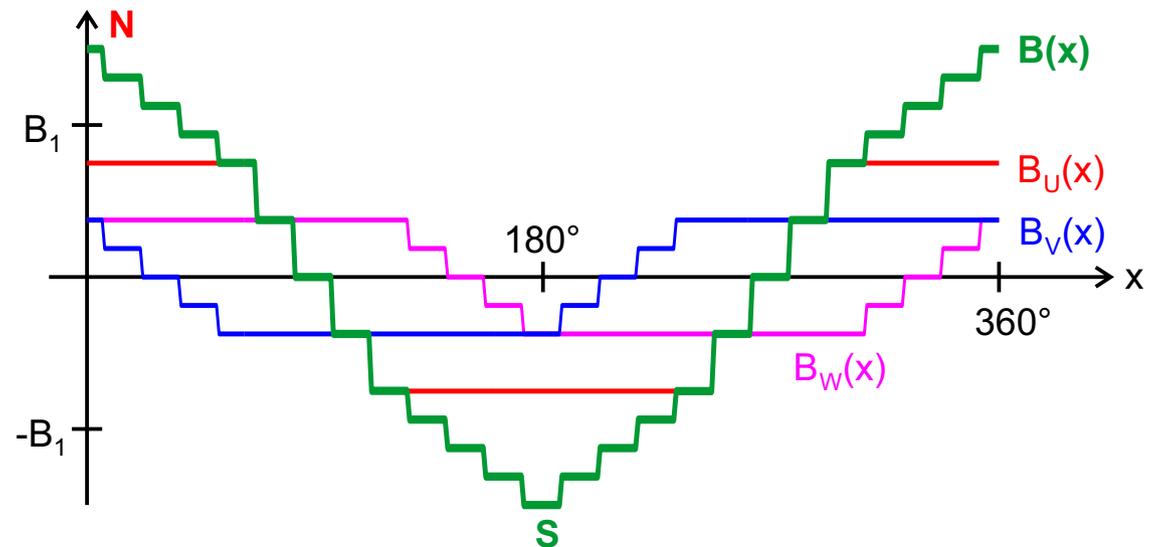
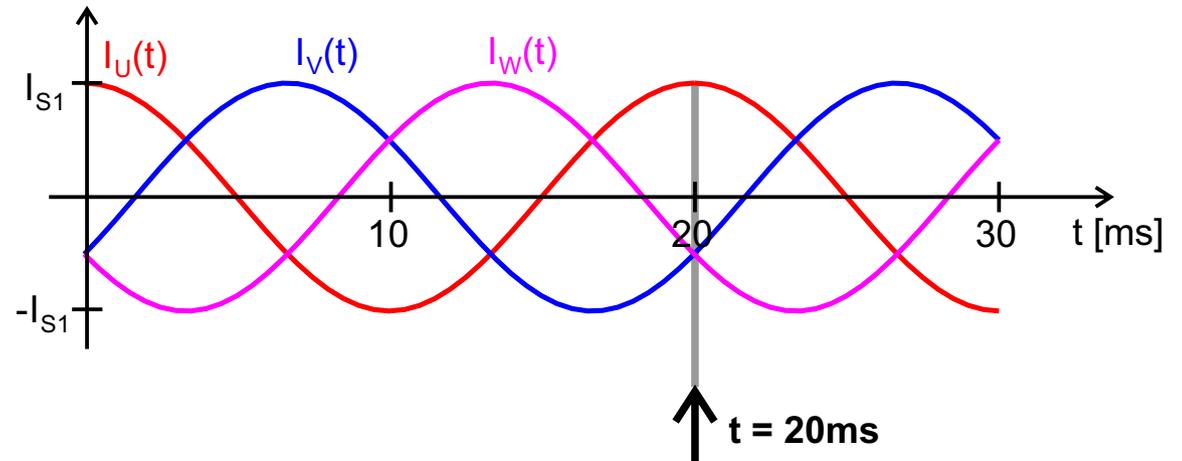
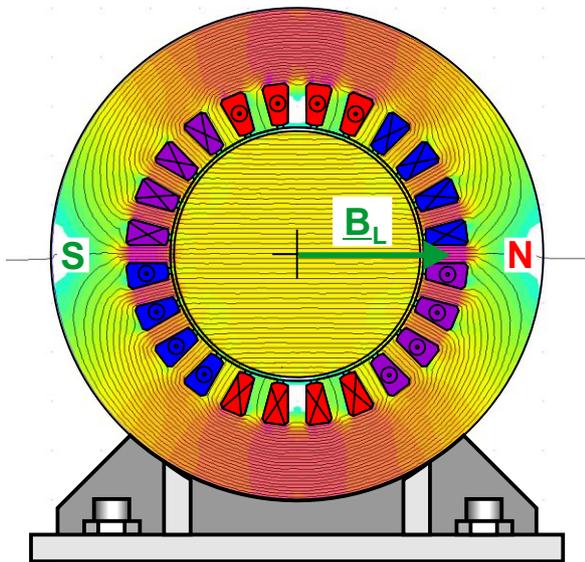
7.2 Erzeugung Drehfeld

Bestromung der Drehfeldwicklung



7.2 Erzeugung Drehfeld

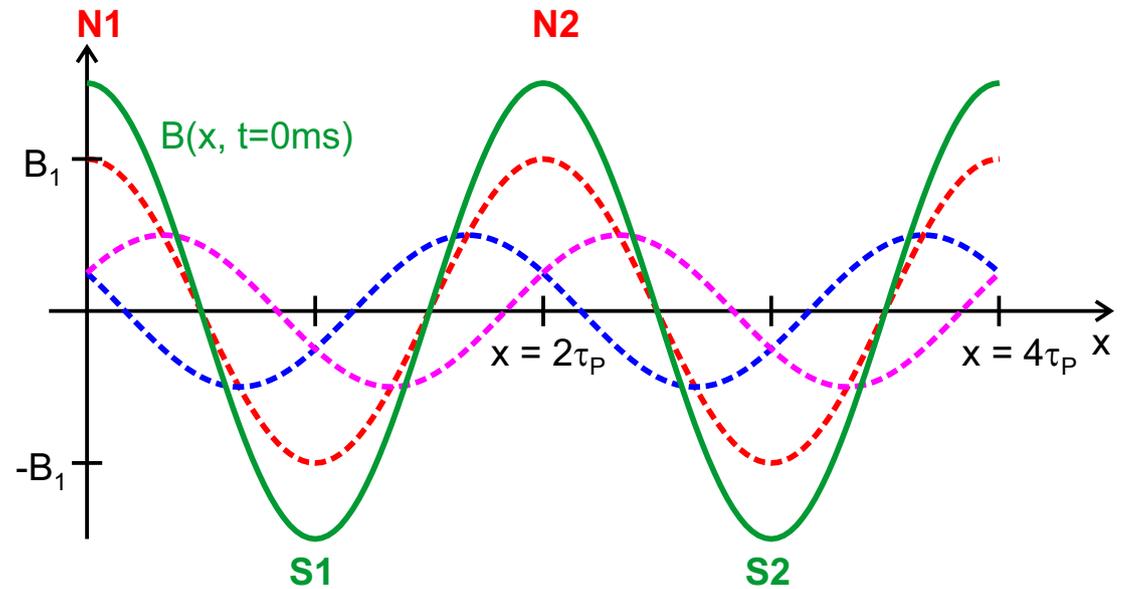
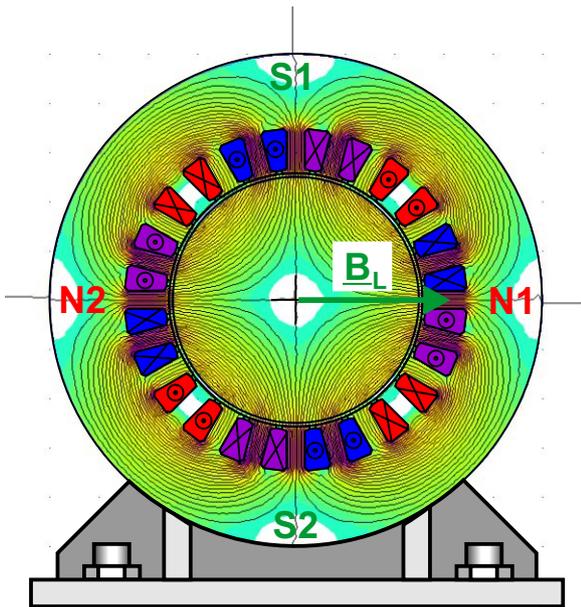
Realer Kurvenverlauf einer Wicklung mit $q=4$ Nuten pro Pol und Strang



7.2 Erzeugung Drehfeld

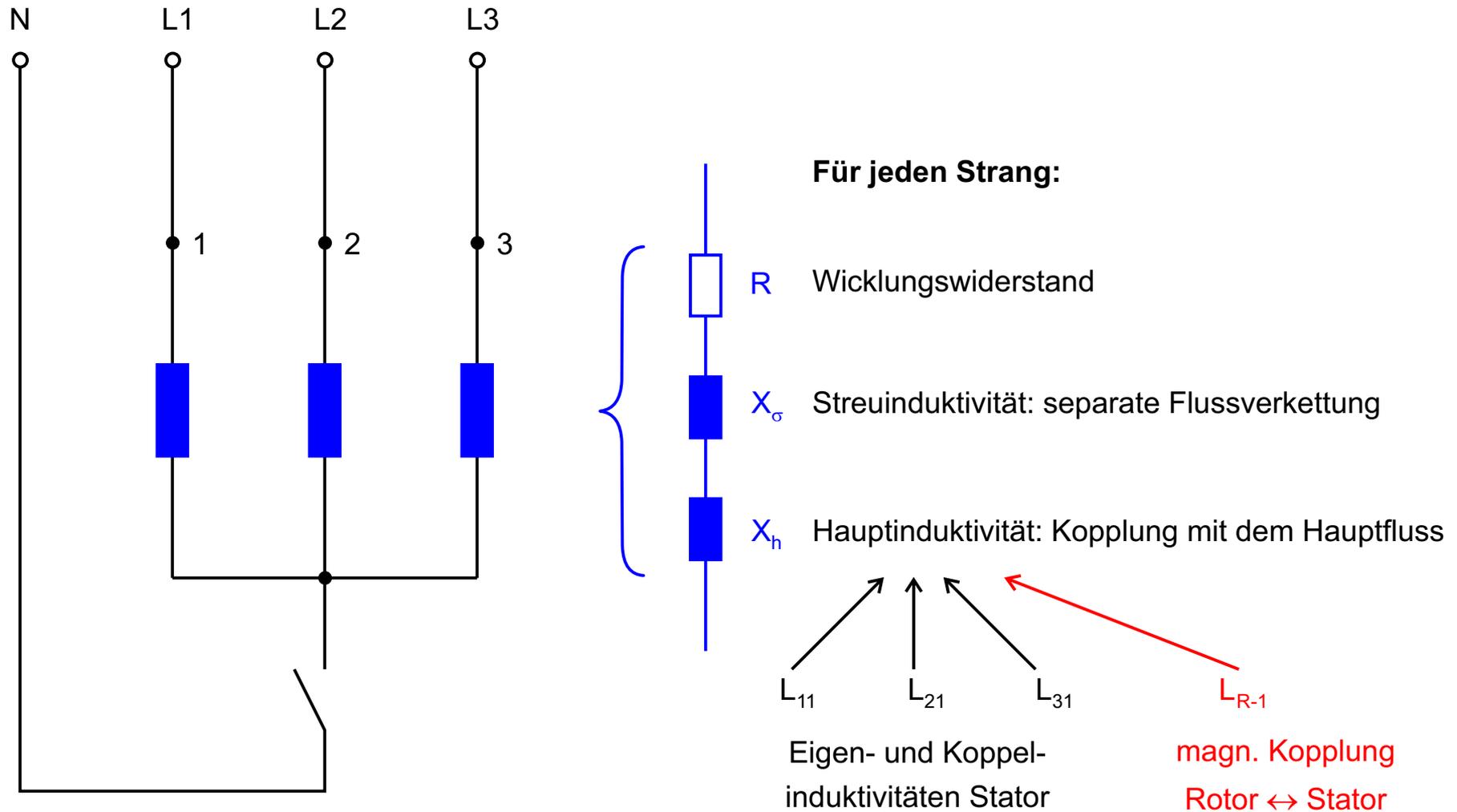
Polpaarzahl $p = 2$

- Flussachse = 1. Scheitelpunkt (Nordpol N1) der Luftspaltwelle
- 1 geometrischer Umlauf der Flussachse = 2 elektrische Perioden
- allgemein: $f_{\text{mech}} = \frac{1}{p} \cdot f_{\text{el}}$



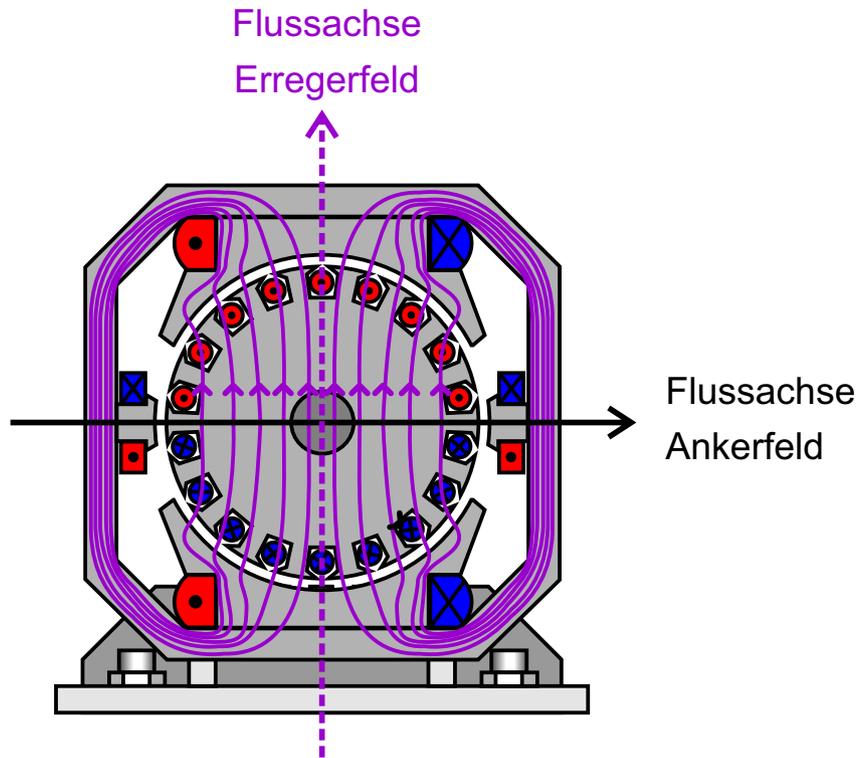
7.3 Ersatzschaltbild

Elemente Ersatzschaltbild Stator



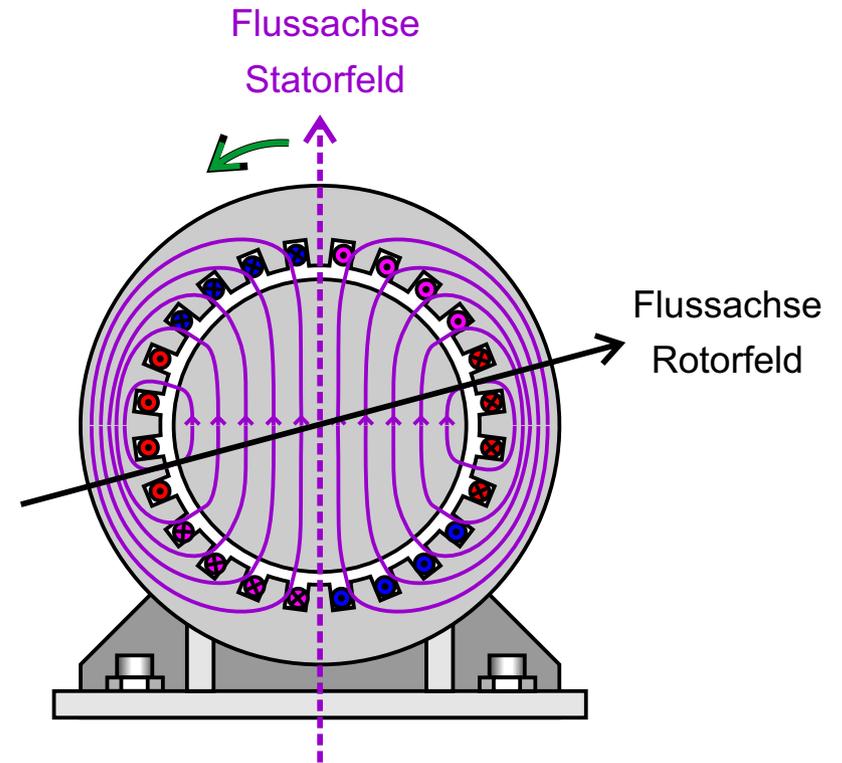
7.4 Vergleich mit Gleichstrommaschine

Gleichstrommaschine



- Erreger- und Ankerfeld stehend
- max. Drehmoment bei 90°Versatz
- Kommutierung: Stromwendung im Anker

Drehfeldmaschine

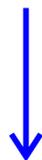


- Stator- und Rotorfeld umlaufend
- Motorbetrieb: Rotorfeld nacheilend
- Kommutierung: AC-Bestromung Stator

7.5 Maschinenvarianten

Stator einer 3-phasigen Maschine mit Drehfeldwicklung

- Wicklungssystem mit 3 räumlich um 120° el. versetzten Phasenwicklungen
- Bestromung mit 3 zeitlich um 120° el. versetzten Phasenströmen
- Idealisierte Betrachtung: Flussdichtekurve + Ströme sinusförmig: "Grundwellenmaschine"
- Ergibt eine im Luftspalt umlaufende Feldwelle: "Drehfeld"
- Polpaarzahl > 1 : es laufen p Vollwellen im Luftspalt um
- 1 geometrischer Umlauf im Luftspalt benötigt p elektrische Perioden $\rightarrow f_{\text{mech}} = \frac{1}{p} \cdot f_{\text{el}}$
- (Elegante) mathematische Beschreibung: Raumzeiger
- 2-phasiges orthogonales Ersatzsystem (90° Phasenversatz): " α - β -System"



Rotor mit
Induktionswicklung

Asynchronmaschine



Rotor mit
eigener Erregung

Synchronmaschine

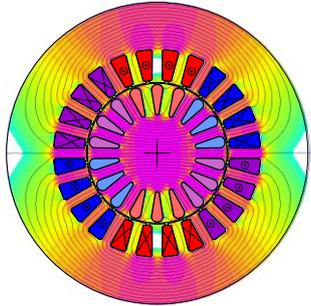


Rotor mit ausgeprägten
Polen bzw. Zähnen

Reluktanzmaschine

7.5 Maschinenvarianten

Gegenüberstellung der grundlegenden Maschinenvarianten



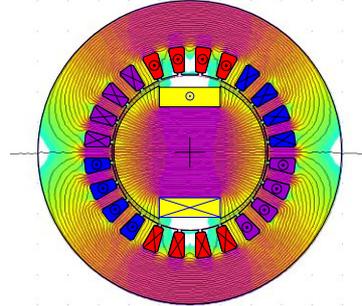
**Asynchronmaschine
(Induktionsmaschine)**
ASM

Varianten

- Käfig-/Kurzschlussläufer
- Schleifringläufer, heute "doppelt gespeiste ASM"

Einsatzgebiete

- Industrie-Standardantriebe
- Stromerzeugung
- Traktion Schienenfahrzeuge
- Elektrostraßenfahrzeuge



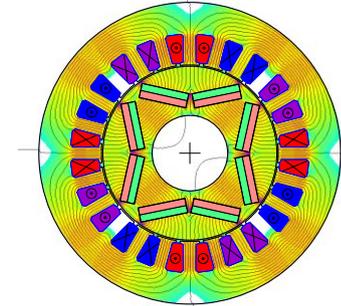
**Fremderregte
Synchronmaschine**
SM

Varianten

- Schenkelpollläufer (Bild)
- Vollpolläufer

Einsatzgebiete

- Stromerzeugung (Kraftwerksgeneratoren)
- Großmaschinen
- Renault ZOE



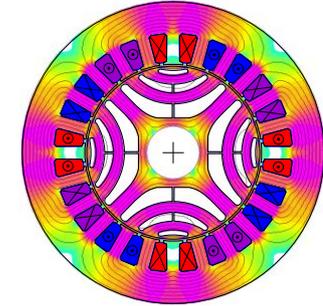
**Permanenterregte
Synchronmaschine**
PMSM

Varianten

- vergabene Magnete (Bild)
- Außenmagnete
- Einzelzahnwicklung, häufig mit Außenläufer

Einsatzgebiete

- Industrie-Servomotoren
- Elektrofahrzeuge
- als BLDC-Motoren



**Synchrone
Reluktanzmaschine**
SynRM

Varianten

- mit Flussbarrieren (Bild)
- SM mit Schenkelpolen
- nicht zu verwechseln mit der geschalteten RM

Einsatzgebiete

- Industrieantriebe

7.6 Raumzeiger

Flussdichteraumzeiger

Zeitfunktionen Strangströme:

$$I_U(t) = I_{S1} \cos(\omega \cdot t)$$

$$I_V(t) = I_{S1} \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$I_W(t) = I_{S1} \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Scheitelwert Flussdichte:

$$B_{S1} = c \cdot I_{S1} \quad \text{mit } c = \frac{2 \cdot N \cdot k_{w1}}{\pi \cdot d \cdot p}$$

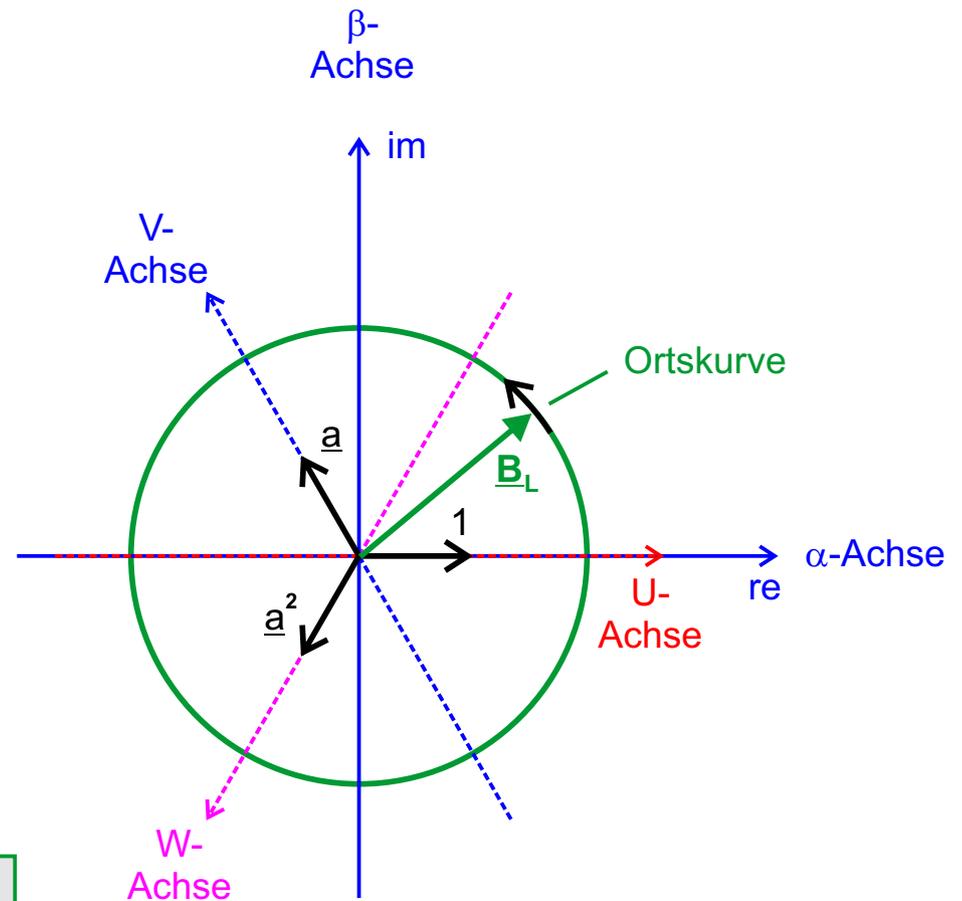
Ortsabhängigkeit: Drehoperatoren

$$\underline{a}^0 = 1, \quad \underline{a}^1 = e^{j \cdot 2\pi/3} \quad \text{und} \quad \underline{a}^2 = e^{j \cdot 4\pi/3}$$

Flussdichteraumzeiger

$$\underline{B}_L = \frac{2}{3} \cdot (c \cdot I_U(t) + \underline{a} \cdot c \cdot I_V(t) + \underline{a}^2 \cdot c \cdot I_W(t)) = c \cdot I_{S1} \cdot e^{j\omega \cdot t}$$

allgemeine Definition, im Gegensatz zu Abschnitt 7.2 (hier war $B_L = \frac{3}{2} B_1$):
 Normierung der Zeigerlänge auf den Scheitelwert von B_1 mit dem Faktor $\frac{2}{3}$



7.6 Raumzeiger

Zweiphasensystem

Umformung Ortskurve:

$$\underline{B}_L = c \cdot I_{1S} \cdot e^{j\omega \cdot t}$$
$$= c \cdot I_{1S} \cdot (\cos(\omega t) + j \cdot \sin(\omega t)) = c \cdot (I_\alpha(t) + j I_\beta(t))$$

Zeitfunktionen Strangströme:

$$I_\alpha(t) = I_{S1} \cos(\omega \cdot t)$$

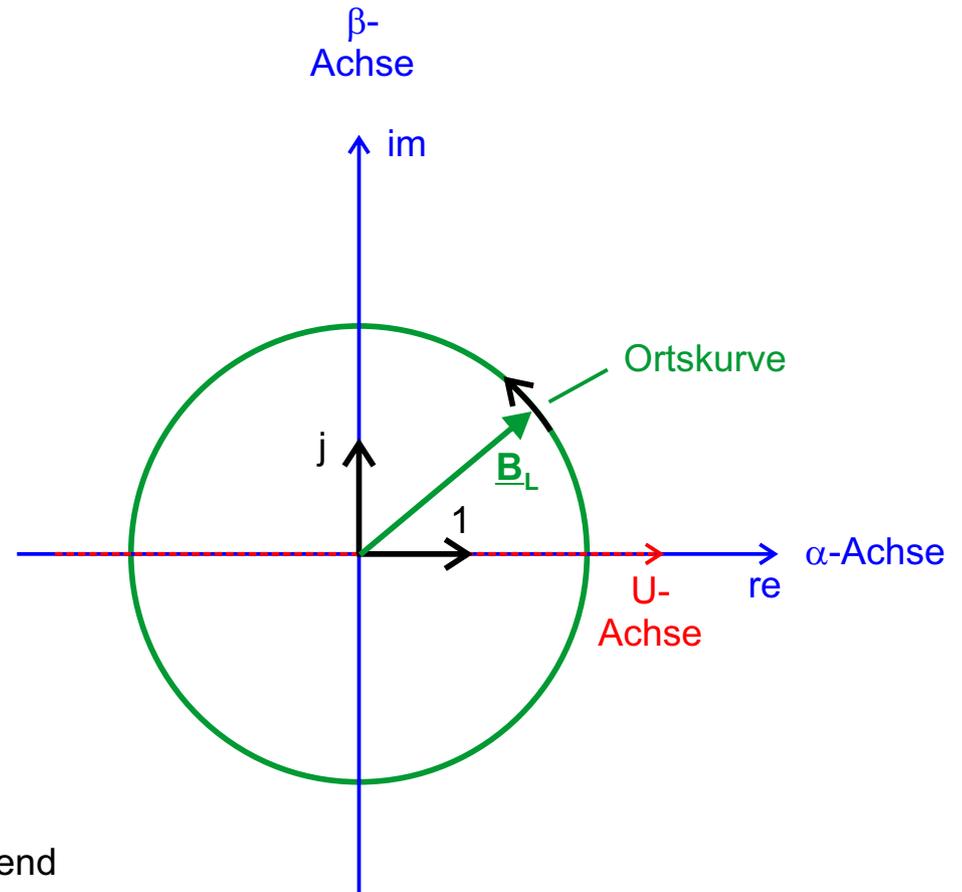
$$I_\beta(t) = I_{S1} \sin(\omega \cdot t)$$

Drehoperator:

$$\underline{a}^1 = e^{j \cdot \pi/2} = j \quad (\text{entspricht Wicklung mit } 90^\circ \text{ Versatz)}$$

Fazit:

man benötigt mindestens 2 Komponenten mit entsprechend zeitlichem & räumlichem Versatz, um ein Drehfeld erzeugen zu können. Technisch sind 3 Stränge günstiger, zu mathematischen Beschreibung hingegen ist das $\alpha\beta$ -System angenehmer. Mehr dazu in der Mastervorlesung.



7.6 Raumzeiger

Mit- und Gegensystem

Mitsystem:

$$\underline{B}_{L,M} = \frac{2}{3} \cdot (c \cdot I_U(t) + \underline{a} \cdot c \cdot I_V(t) + \underline{a}^2 \cdot c \cdot I_W(t))$$

- linksdrehend

Gegensystem:

$$\underline{B}_{L,G} = \frac{2}{3} \cdot (c \cdot I_U(t) + \underline{a} \cdot c \cdot I_W(t) + \underline{a}^2 \cdot c \cdot I_V(t))$$

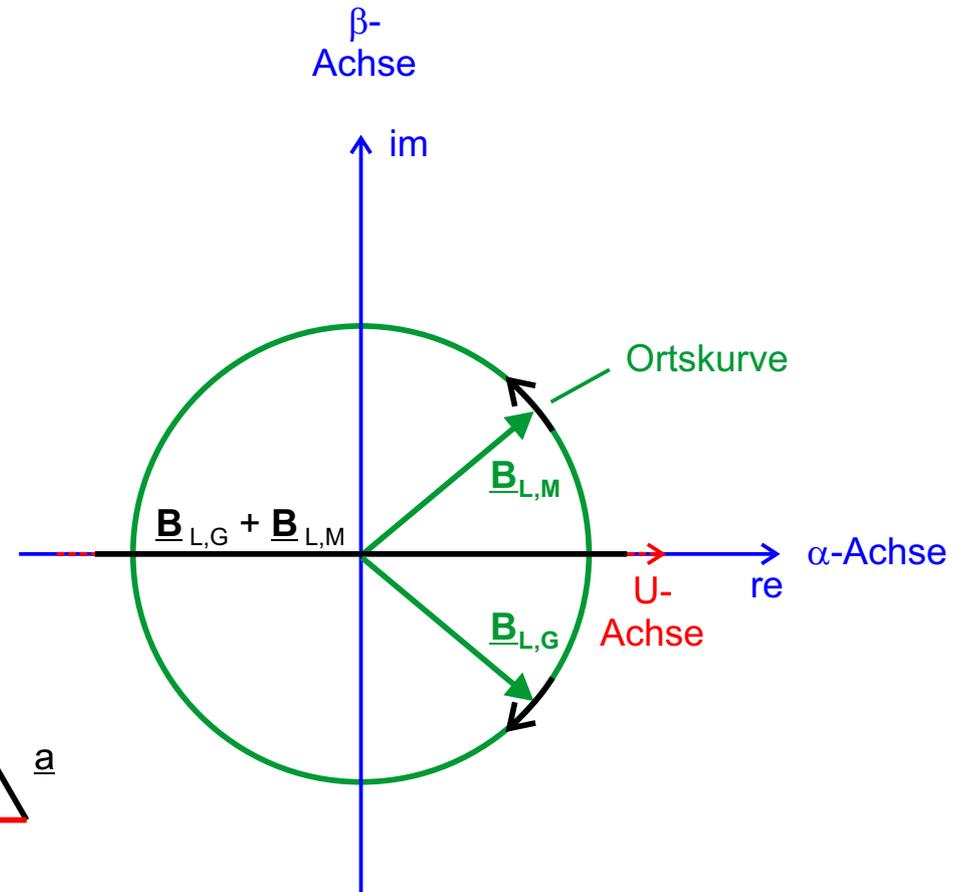
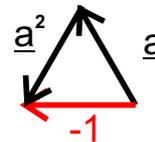
- Phasen V und W vertauscht
- rechtsdrehend

Überlagerung: $\underline{B}_{L,G} + \underline{B}_{L,M}$

= Geradenabschnitt auf der re-Achse

= reines Wechselfeld, weil $\underline{a} + \underline{a}^2 = -1$

= kein Drehfeld



Fazit:

Ein Wechselfeld (entsteht z.B. bei 1-Phasenbetrieb) kann als Überlagerung von Mit- und Gegensystem betrachtet werden

} Das kennen wir aus der Akustik: die Überlagerung von hin- und rücklaufender Welle ergibt eine stehende Welle

7.6 Raumzeiger

Maschine läuft nur auf 2 Phasen: entspricht 1-Phasenbetrieb

$$\underline{B}_L = \frac{2}{3} \cdot (c \cdot I_U(t) + \underline{a} \cdot c \cdot I_V(t) + \underline{a}^2 \cdot c \cdot I_W(t))$$

$$I_U(t) = -I_V(t) \quad I_W(t) = 0$$

entspricht 1-Phasenbetrieb, da zwischen I_U und I_V kein Phasenversatz ungleich 0 bzw. 180° existiert (180° kann allein durch Umpolen erreicht werden)

