

Grundlagen elektrische Antriebe

Kapitel 13: Ansteuerung und Systemverhalten BLDC-Motor

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



Elektrische Antriebe

Inhalt Kapitel 13: Ansteuerung und Systemverhalten BLDC-Motor

13.1 Zuordnung und Beispiele

13.2 Blockkommutierung

13.3 Ersatzschaltbild

13.4 Drehzahlsteuerung durch PWM

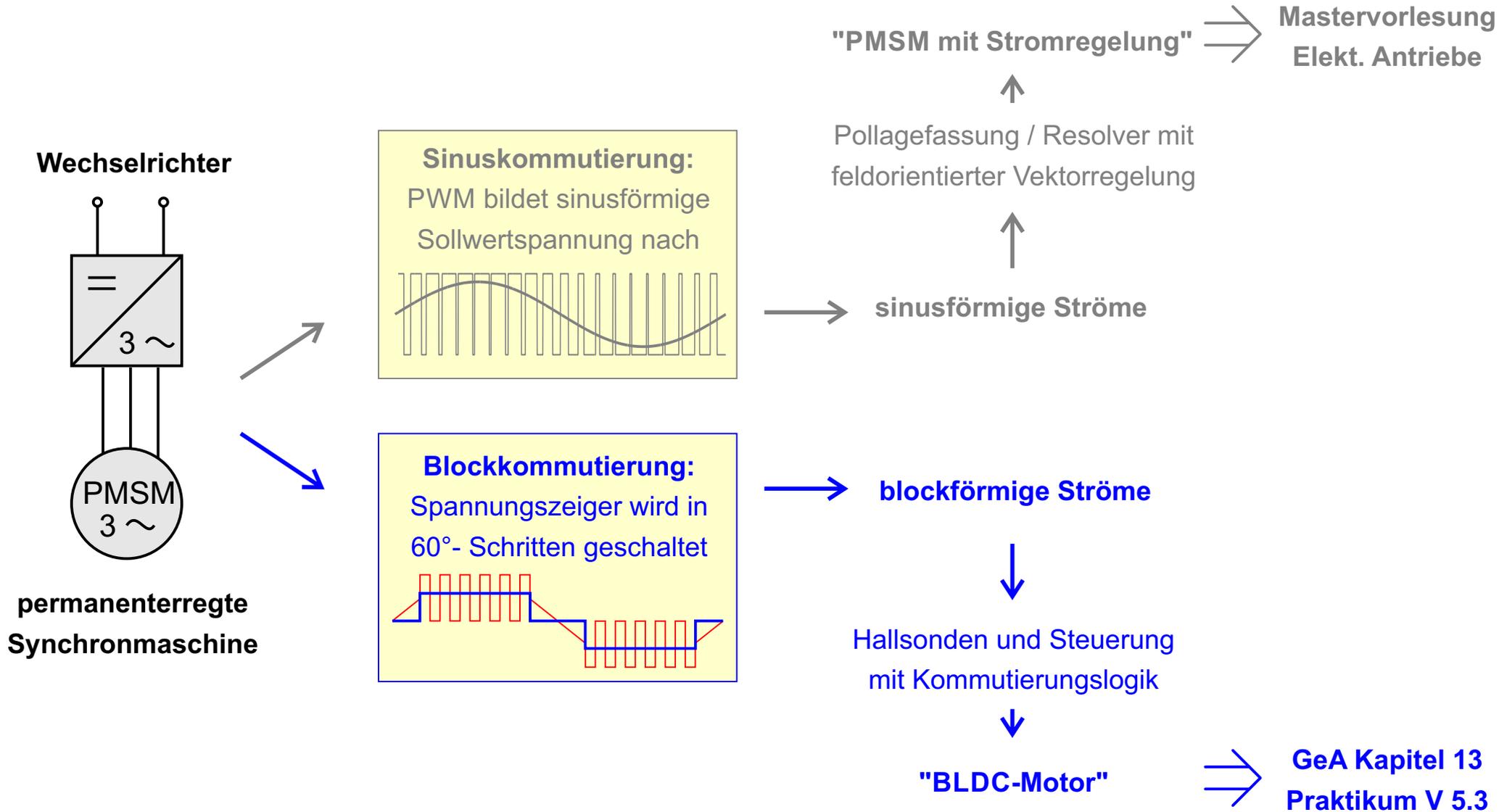
13.5 Systembetrachtung

Vorschau auf die Mastervorlesung:

13.6 Sinuskommutierung

13.1 Zuordnung und Beispiele

Steuer- und Regelverfahren



13.1 Zuordnung und Beispiele

Einsatzgebiete

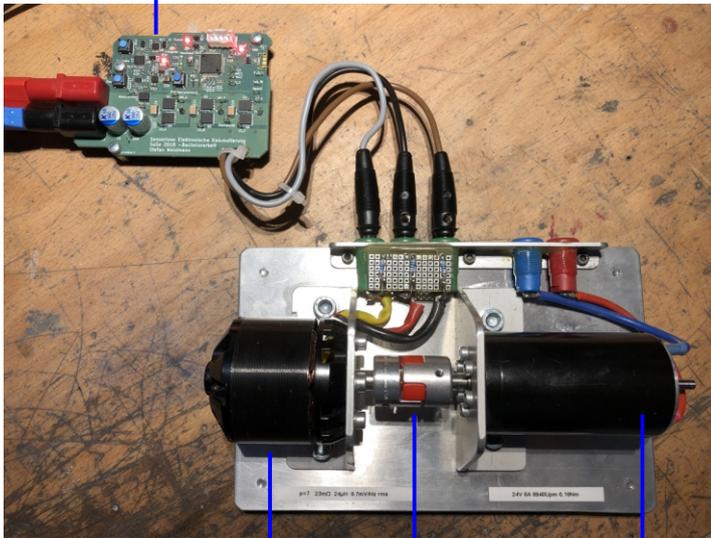
- Leistung: Kleinantriebe, typ. kleiner 2kW
Sonst: MDM oder PMSM mit feldorientierter Vektorregelung
- Allgemein: Lüfter, Gebläse, kleine Pumpen, teilw. auch schon Elektrowerkzeuge
- Modellbau: Drohnen, Elektroflieger, RC-Cars
- Luftfahrt: Drohnen, Multikopter, Elektroflieger
- Traktion: Pedelecs und E-Bikes mit Nabenantrieb (V/H) oder Mittelmotor (am Tretlager)
- System: MDM mit "Motorcontroller" und Hallgebern (Elektronische Kommutierung)
Alternativ auch ohne Hallgeber (EMK-basierte Winkelbestimmung) bei Propeller-/Lüfterantrieben
- Abgrenzung: - Schrittmotoren sind gesteuerte, sehr feinpolige Synchronmotoren
- Servomotoren sind PMSMs mit Vektorregelung und überlagertem Drehzahl- und Lageregelkreis

13.1 Zuordnung und Beispiele

BLDC-Motorprüfaufbau

Motorcontroller:

- Wechselrichter (B6-Brücke)
- μC mit Code für Elektronische Kommutierung



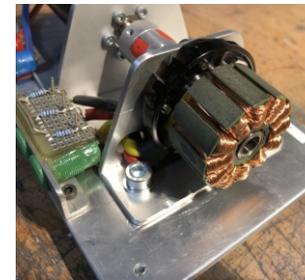
Kupplung Gegenmaschine (GM)

Klein-PMSM (Flug-Modellbau)

- Außenläufer
- Einzelzahnwicklung



Stator mit 12 Zähnen
(Kapitel 12)



Stator, Blechpaket



Rotor mit 14 Magneten
NdFeB, verkupfert

Bilder: A. Kleimaier / Platine: Bachelorarbeit S. Waldmann, HAW Landshut

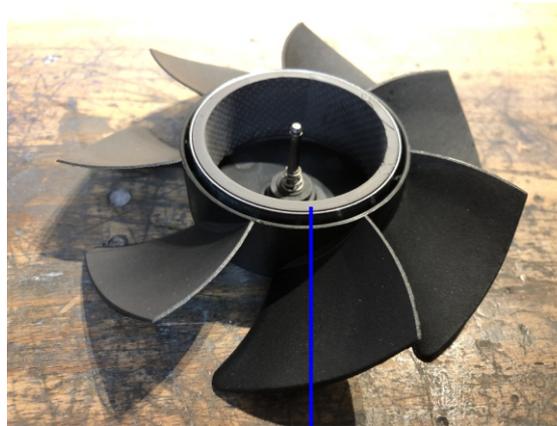
13.1 Zuordnung und Beispiele

Axiallüfter 12V 6W

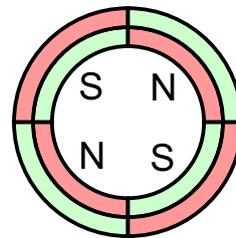
Lüfter
in unversehrtem Zustand



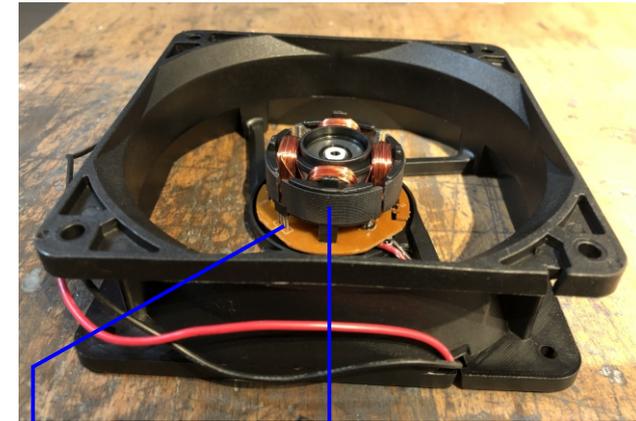
Lüfterrad
mit Außenläufer-Magnetring



kunststoffgebundener
Ferritmagnetring
(schwach, aber billig)
vierpolig magnetisiert:



Stator
mit Ansteuerplatine



Stator: einsträngige Maschine,
 $p = 2$. Unsymmetrie an der Zahn-
flanke gewährleistet Anlauf in
korrekter Drehrichtung

Platine: kommt nur mit wenigen
Bauelementen aus: Hallsonde,
2 Transistoren, Kondensator, etc.

Bilder: A. Kleimaier

13.2 Blockkommutierung

Die Maschine soll ein konstantes Drehmoment liefern und optimal ausgenutzt werden

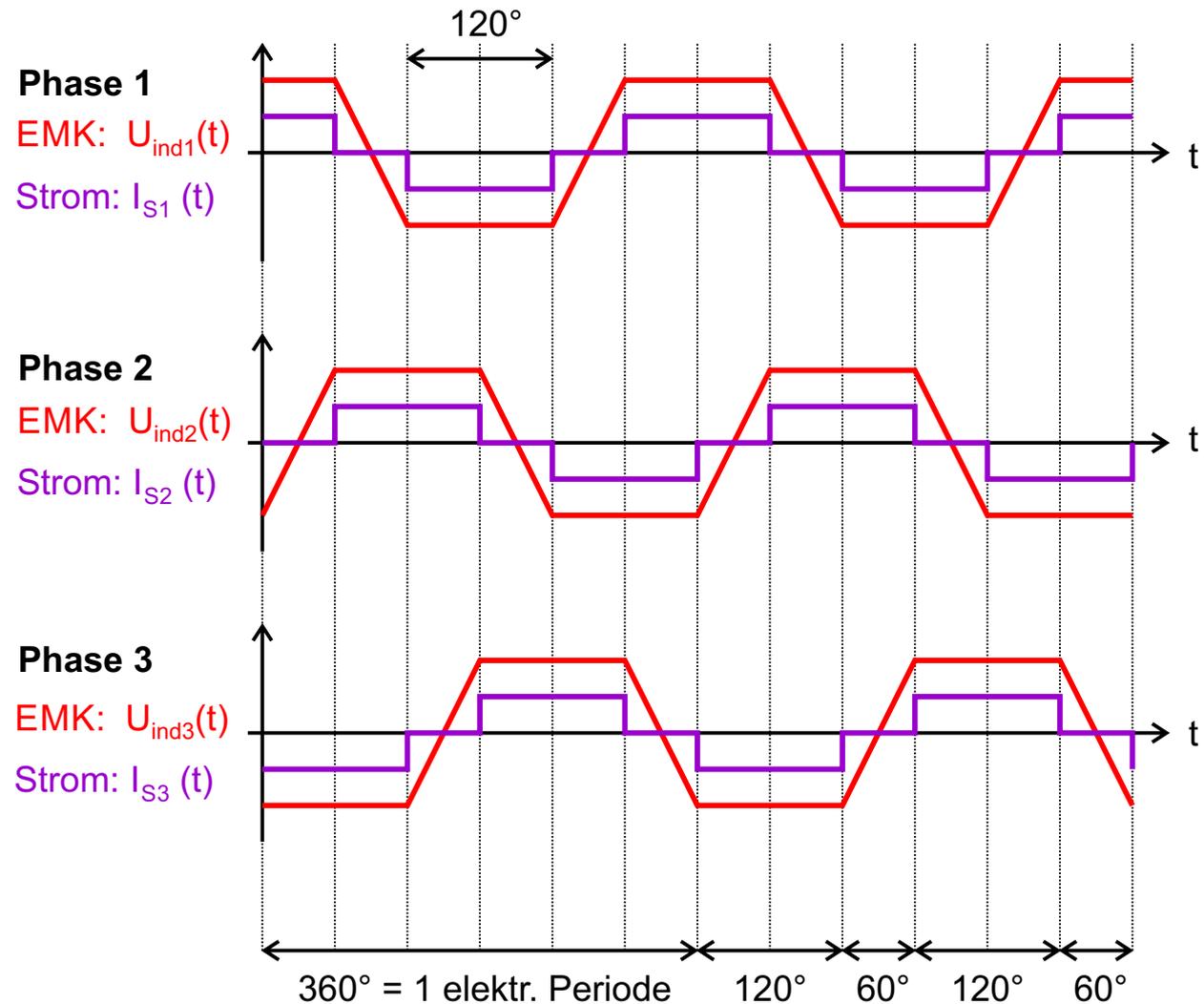
- Idealisierte Betrachtung: die EMK (Polradspannung) ist trapezförmig

⇒ Anforderungen an den Stromverlauf:

- in Phase mit der EMK
- ähnliche Kurvenform
- Stromsumme = 0

⇒ Blockförmige Ströme mit 120°-Blöcken und 60° Freilauf

EMK und Stromkurvenverlauf



13.2 Blockkommutierung

Zur Drehmomentbildung

Herleitung Drehmoment

Innere Leistung in Phase1 (120°-Block):

$$P_{i1} = M_{i1} \cdot \omega_{\text{mech}} = U_{\text{ind1}} \cdot I_{S1}$$

Inneres Drehmoment Phase1 (120°-Block):

$$M_{i1} = \frac{U_{\text{ind1}}}{\omega_{\text{mech}}} \cdot I_{S1} = p \cdot \frac{U_{\text{ind1}}}{\omega_{\text{el}}} \cdot I_{S1}$$

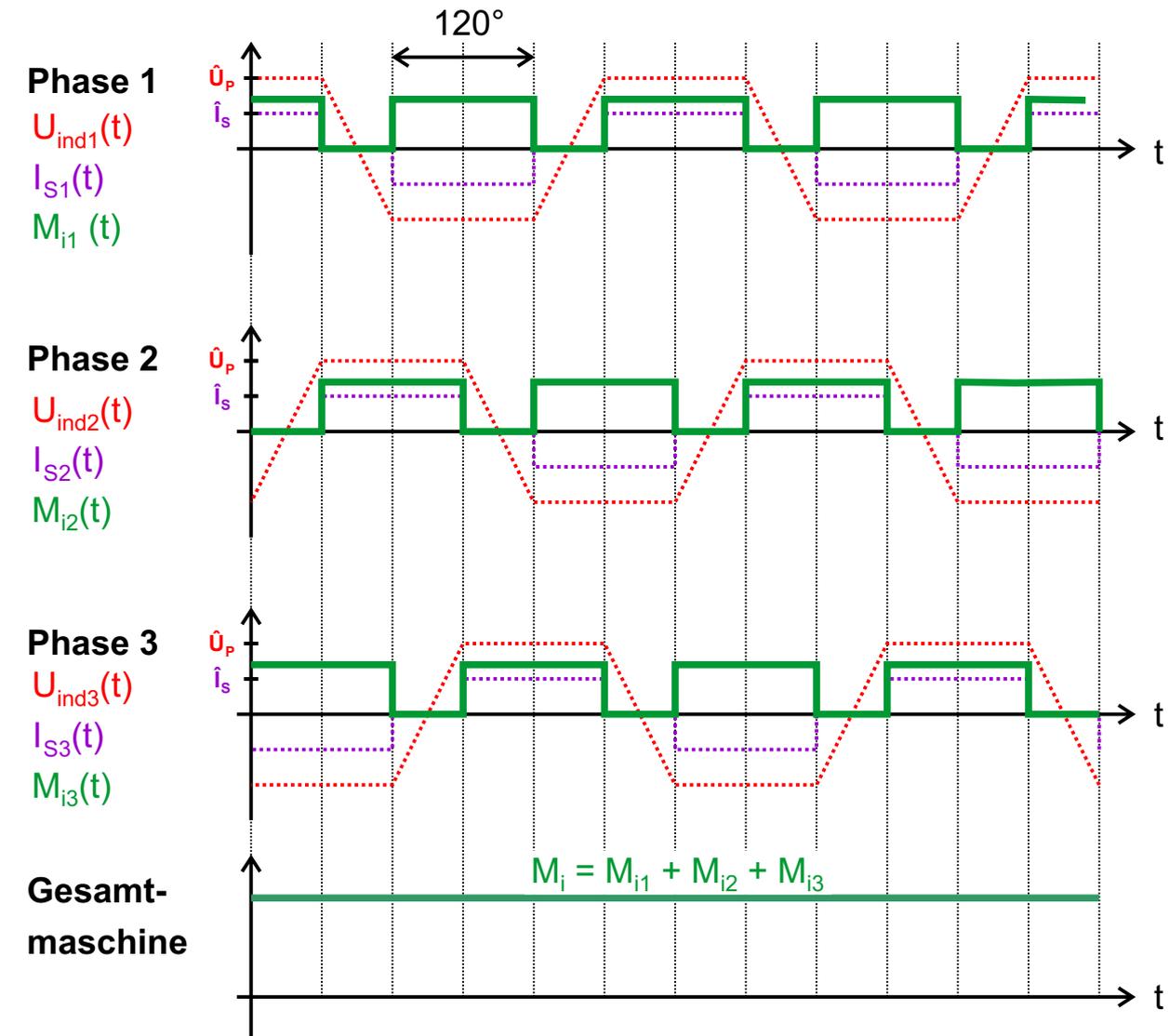
Drehmoment Gesamtmaschine:

$$M_i = M_{i1} + M_{i2} + M_{i3}$$

$$= 2 \cdot M_{i1}$$

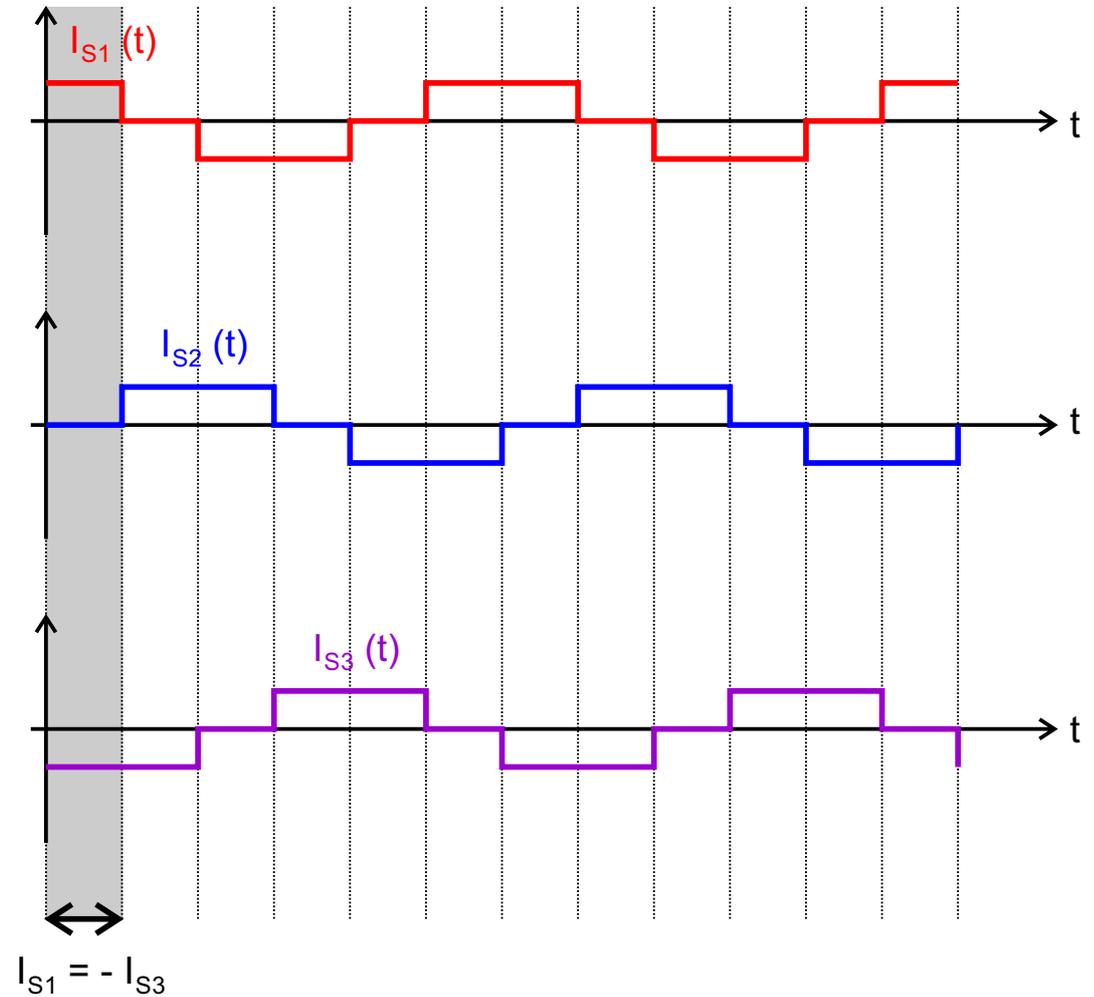
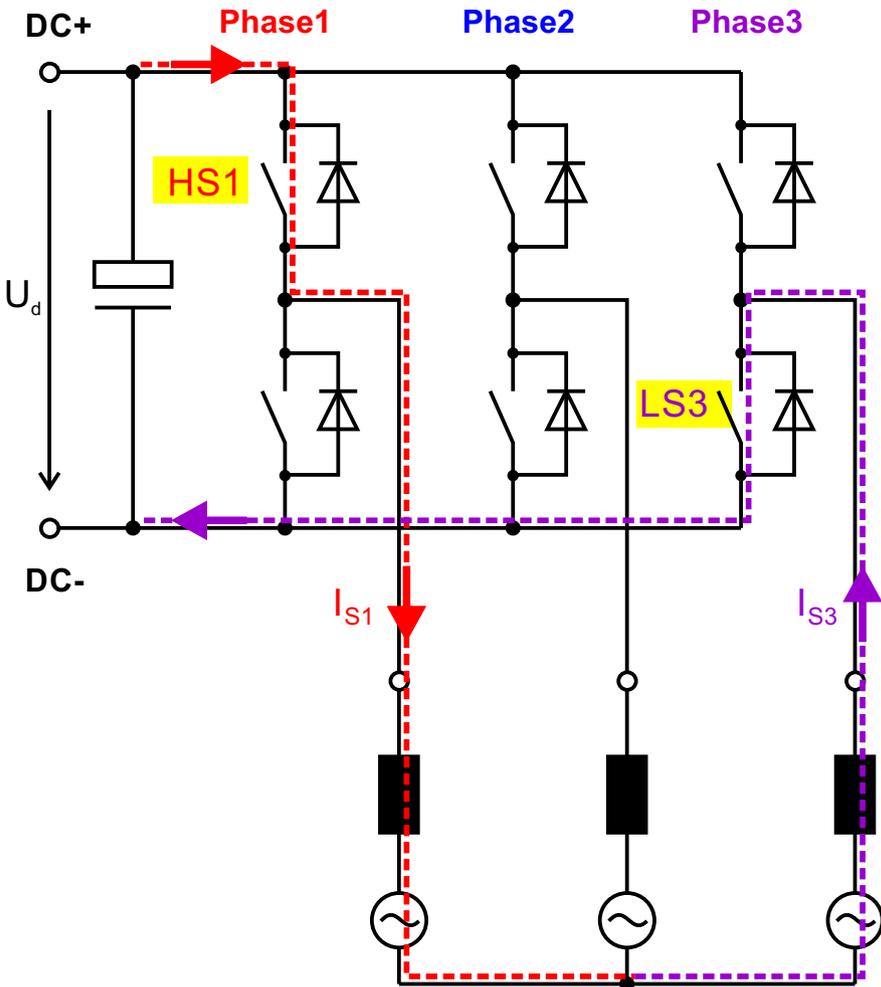
$$= 2 \cdot p \cdot \frac{\hat{U}_{\text{ind}}}{\omega_{\text{el}}} \cdot \hat{I}_{S1} = \frac{p}{\pi} \cdot \underbrace{\frac{\hat{U}_{\text{ind}}}{f_{\text{el}}}}_{\text{EMK-Konstante}} \cdot \hat{I}_{S1}$$

EMK-Konstante



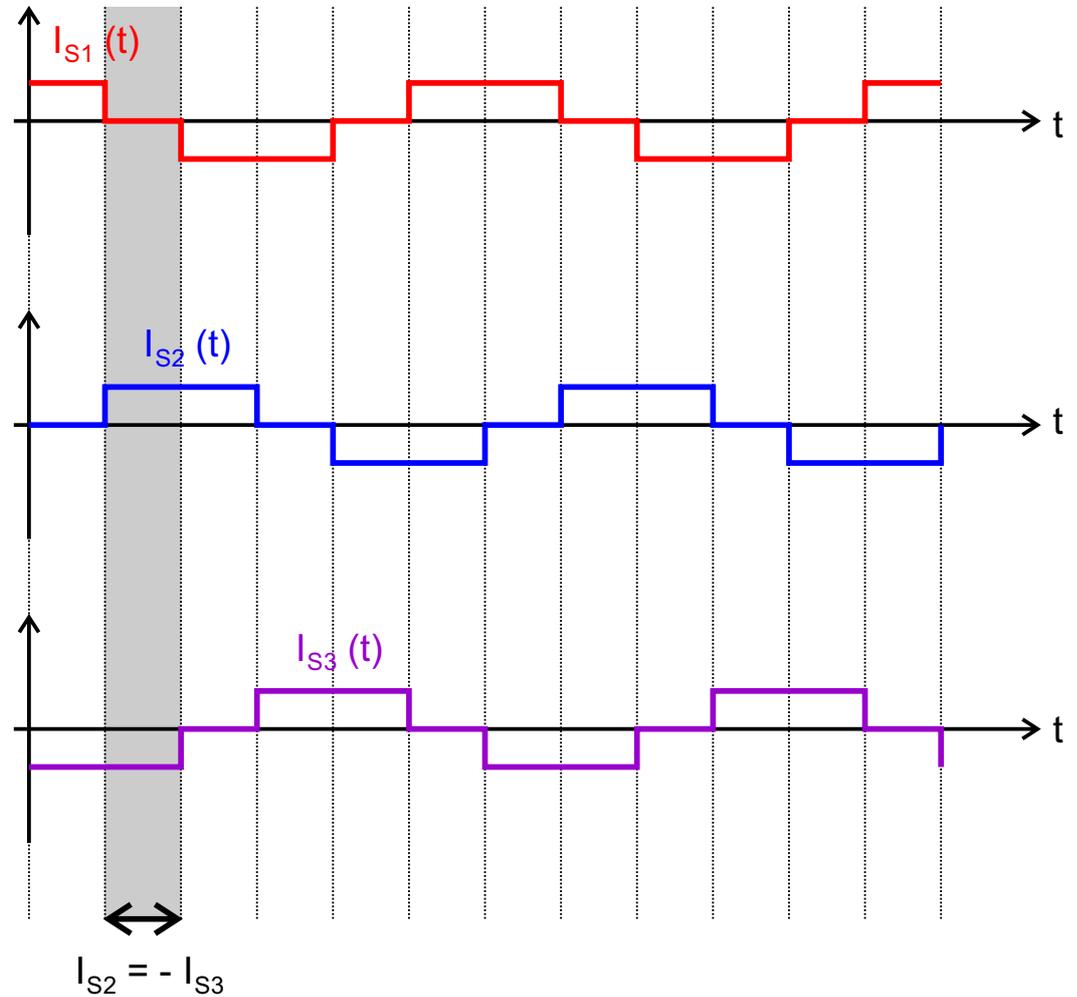
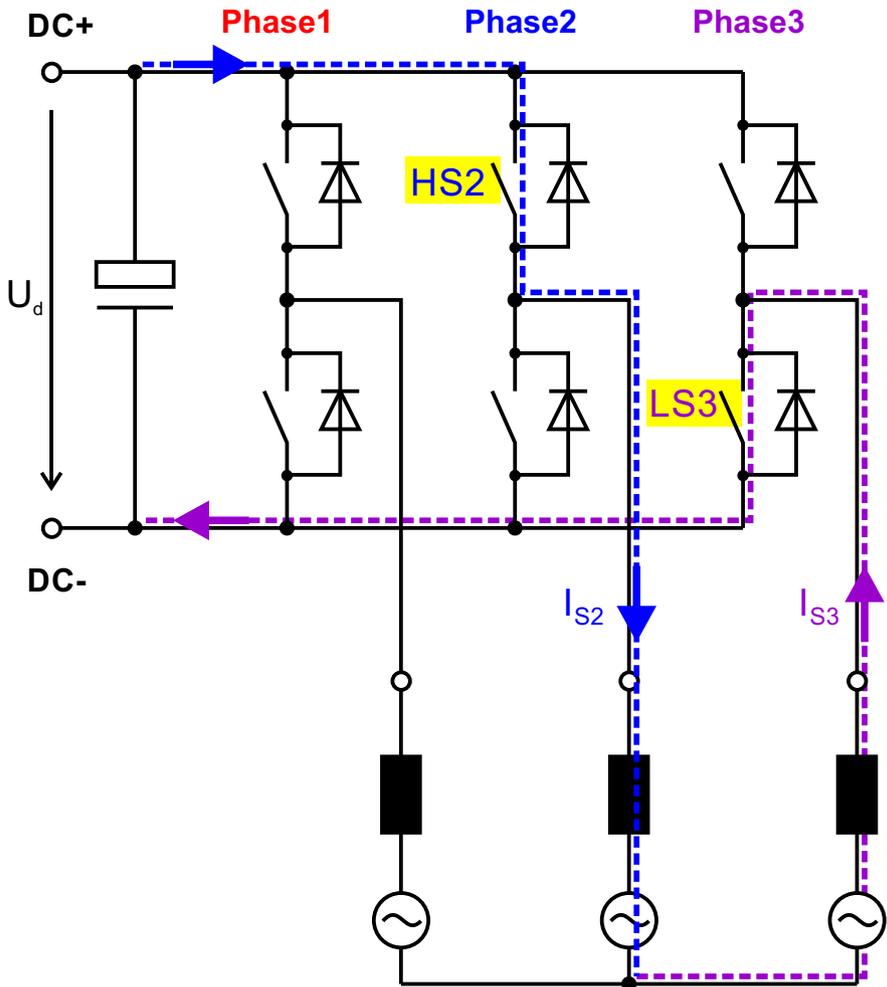
13.2 Blockkommutterung

Wechselrichter mit BLDC-Motor: Strompfade



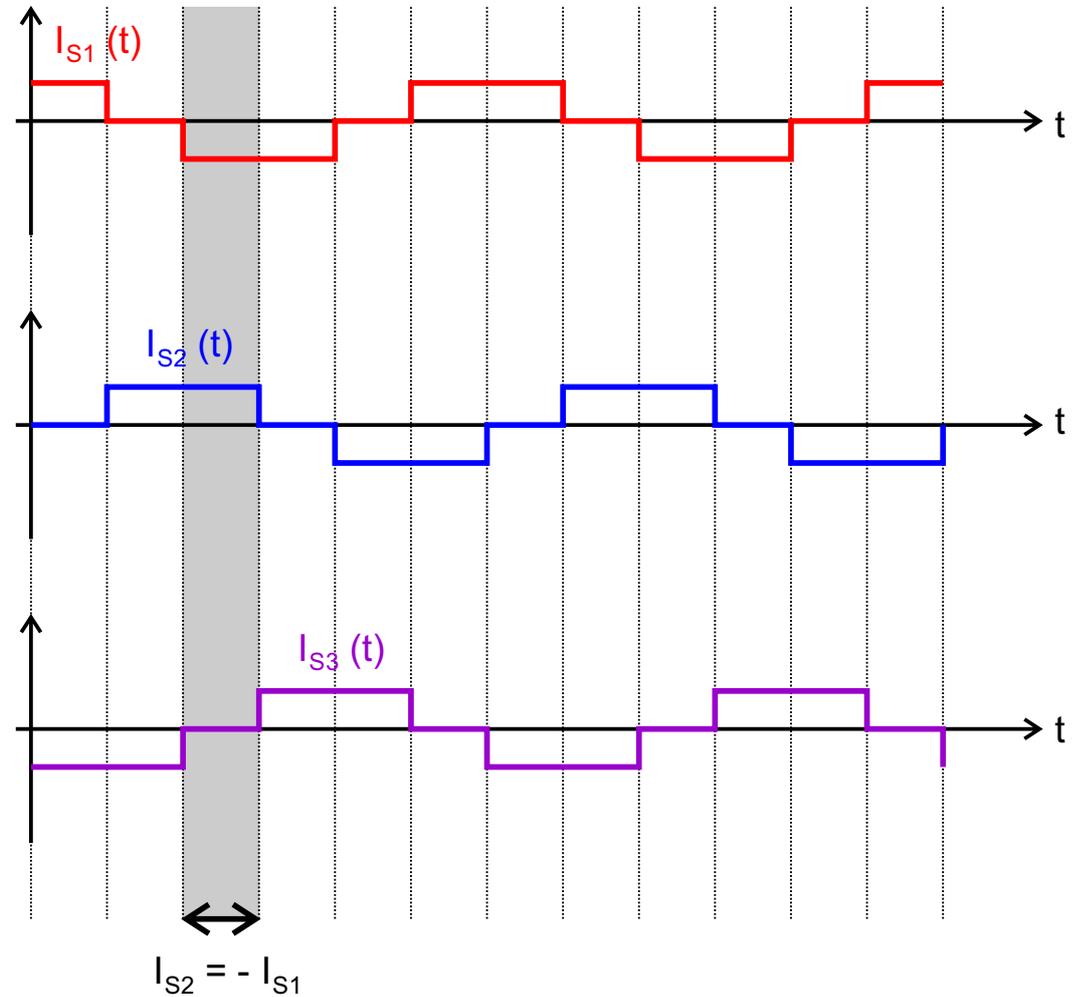
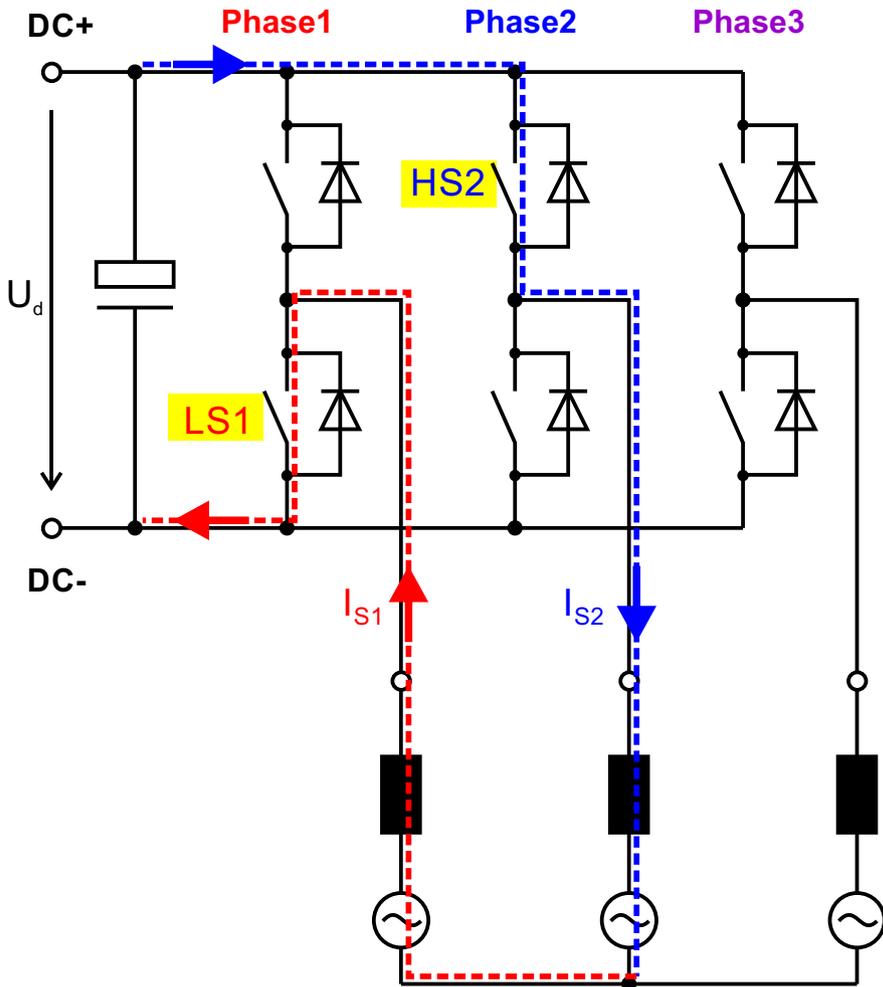
13.2 Blockkommutterung

Wechselrichter mit BLDC-Motor: Strompfade



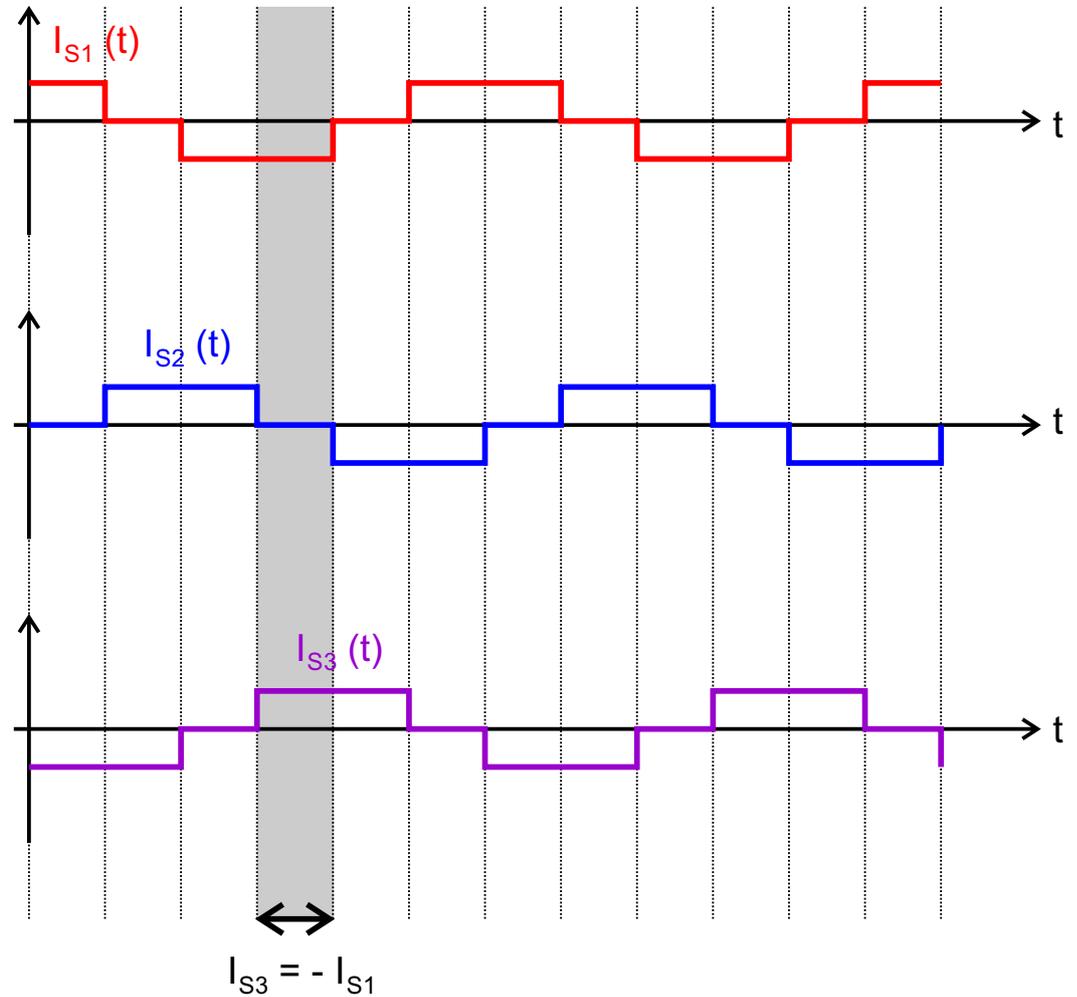
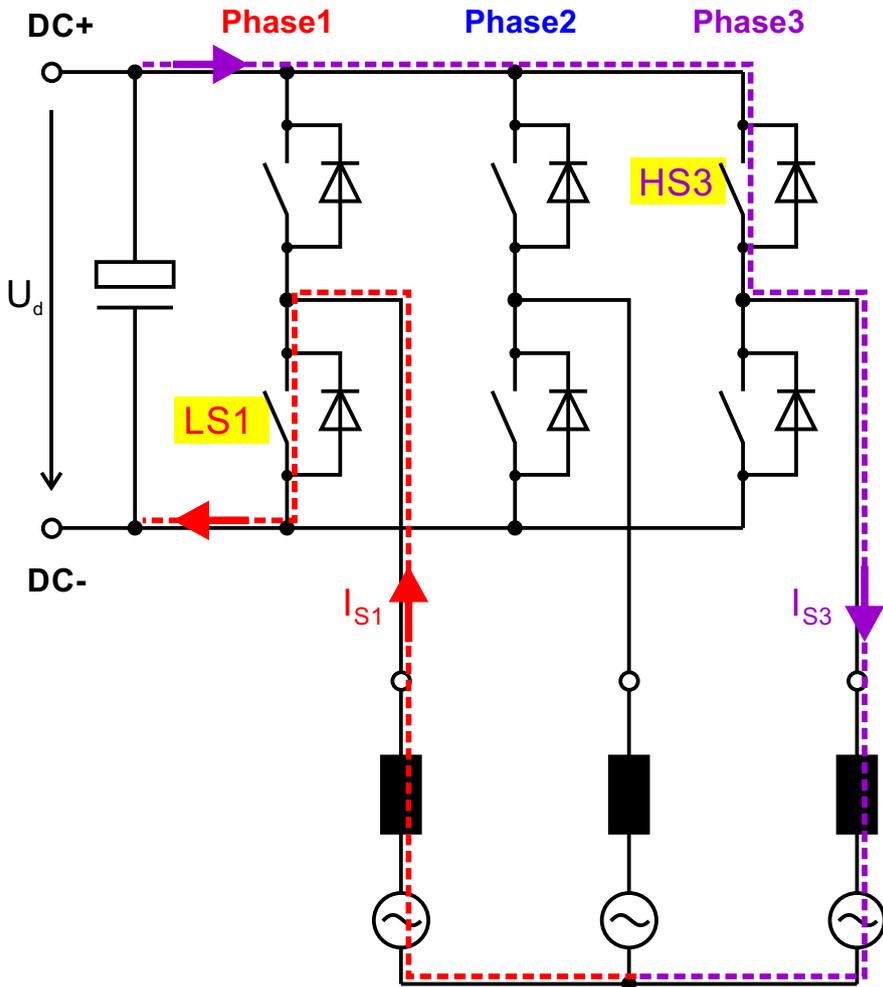
13.2 Blockkommutterung

Wechselrichter mit BLDC-Motor: Strompfade



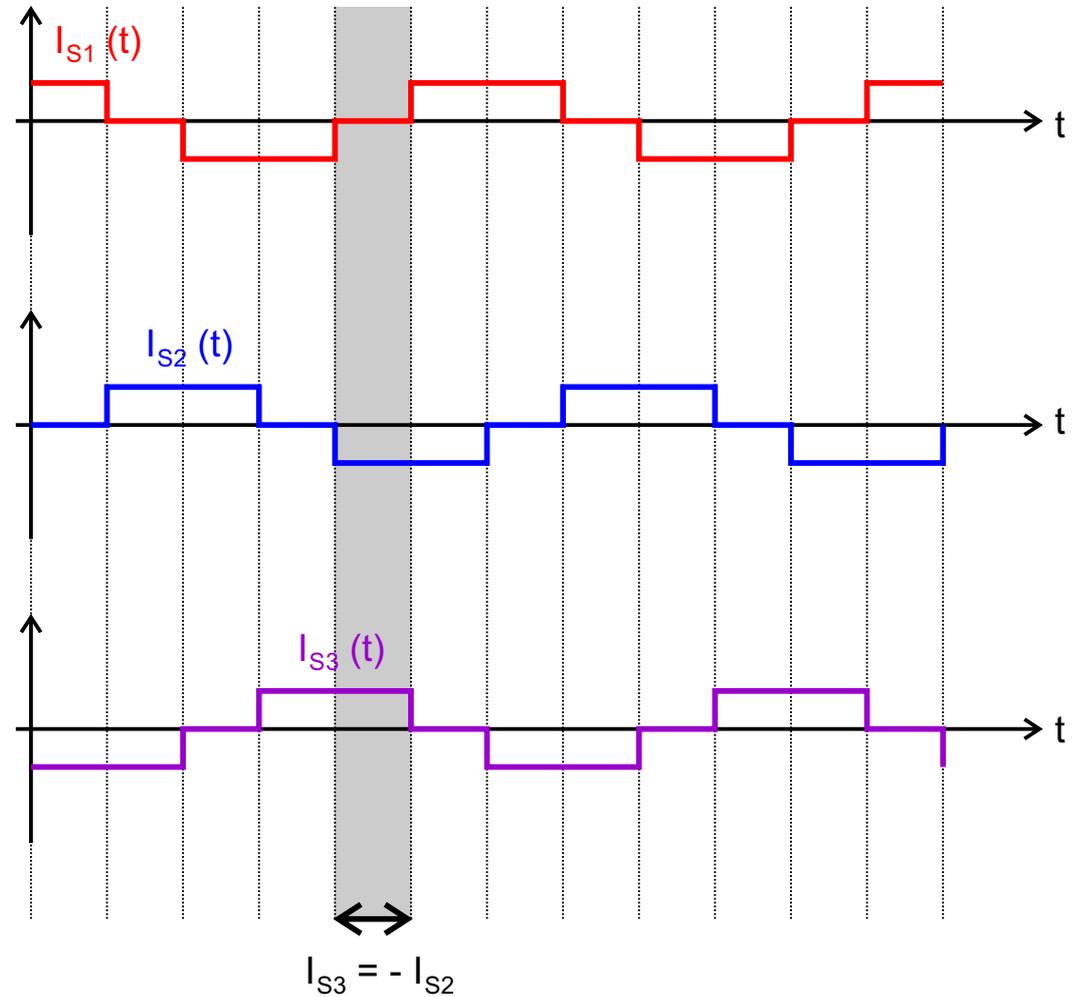
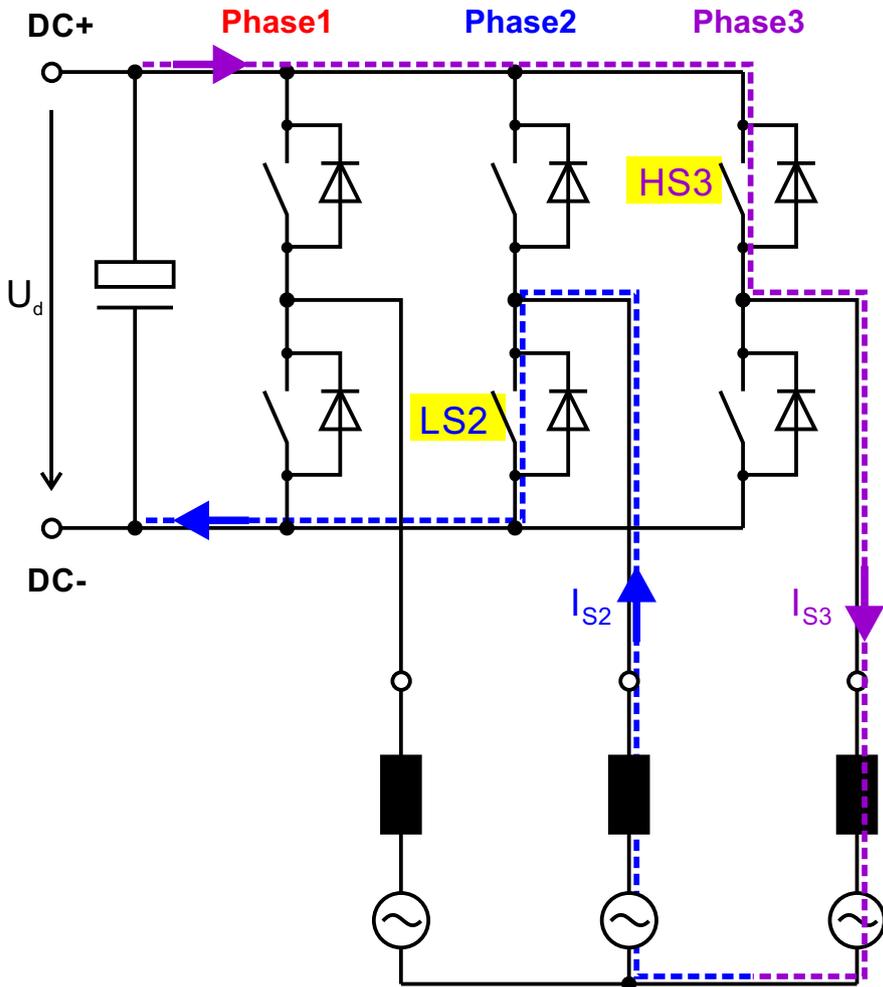
13.2 Blockkommutterung

Wechselrichter mit BLDC-Motor: Strompfade



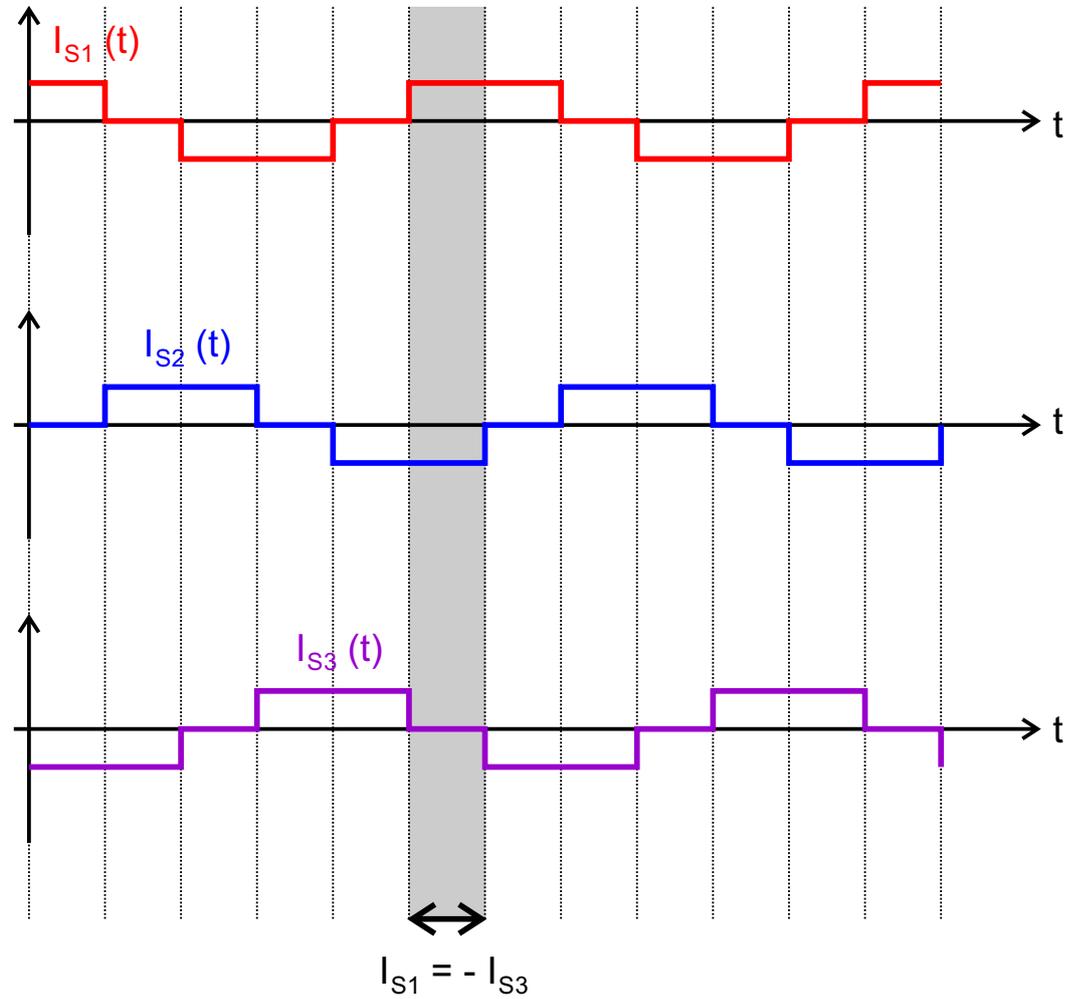
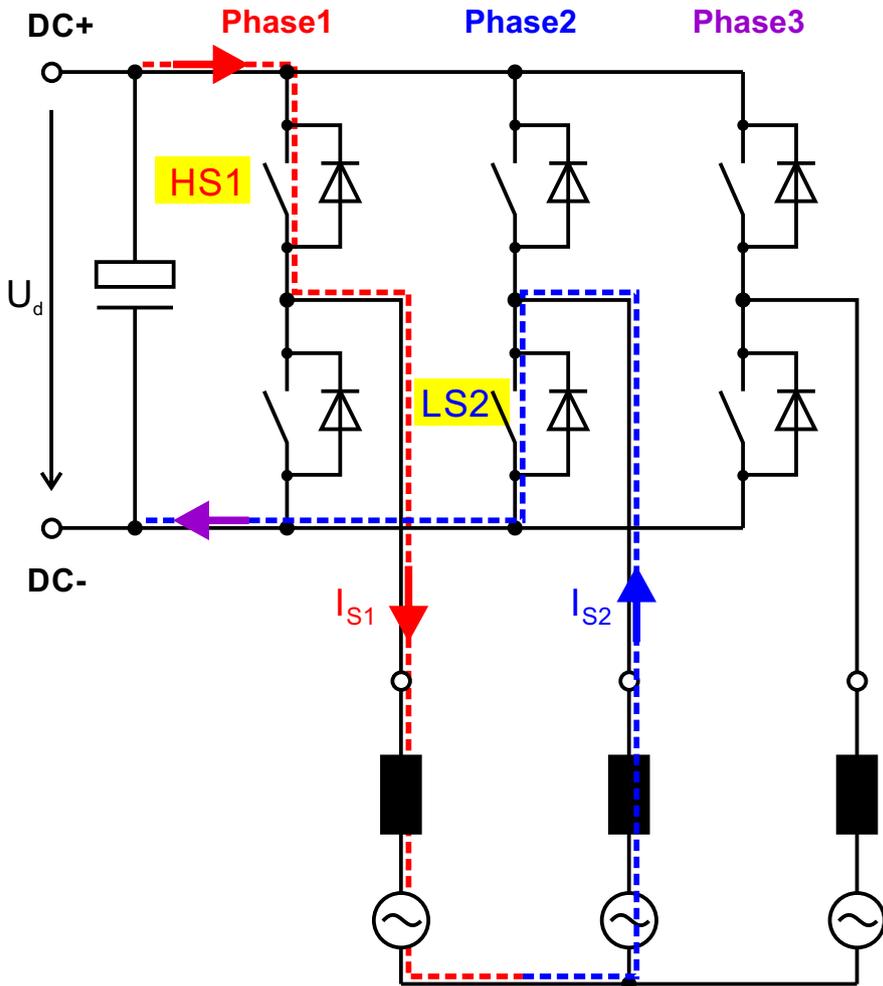
13.2 Blockkommutterung

Wechselrichter mit BLDC-Motor: Strompfade



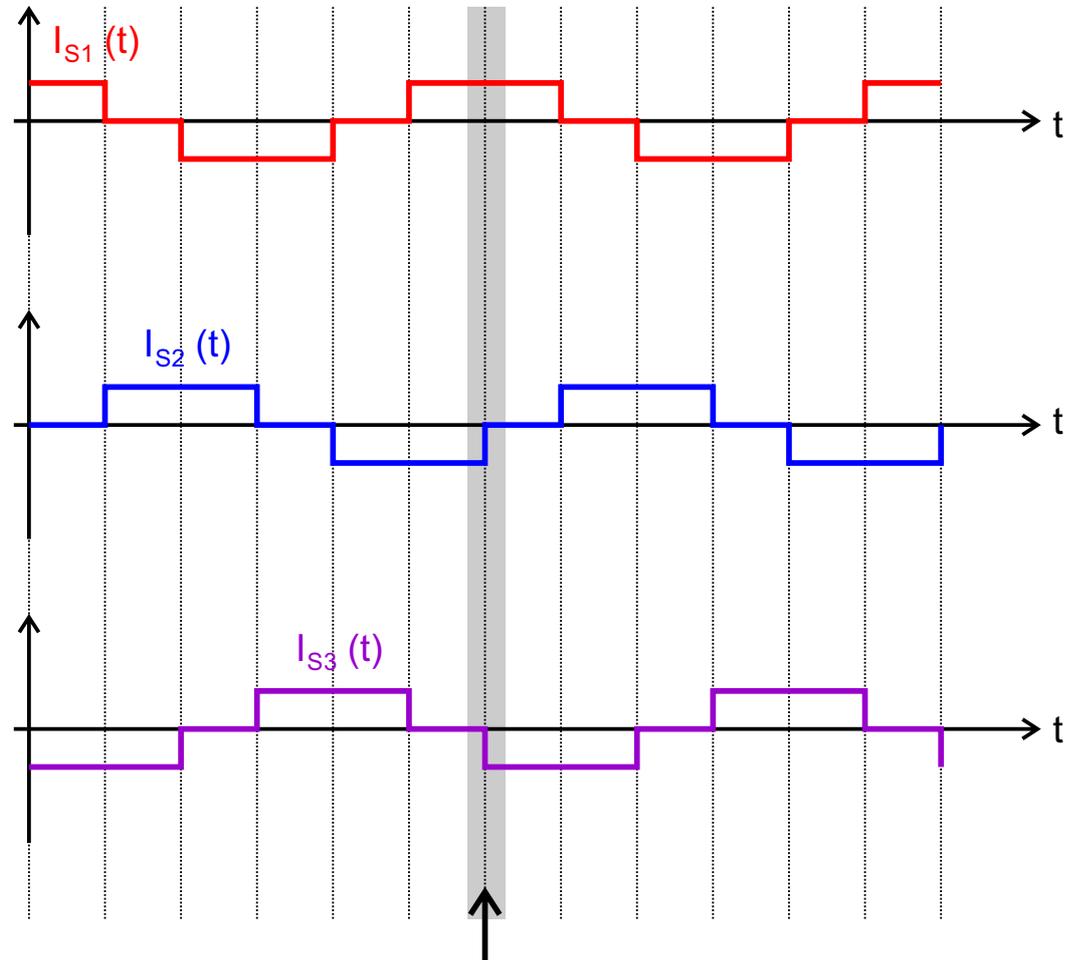
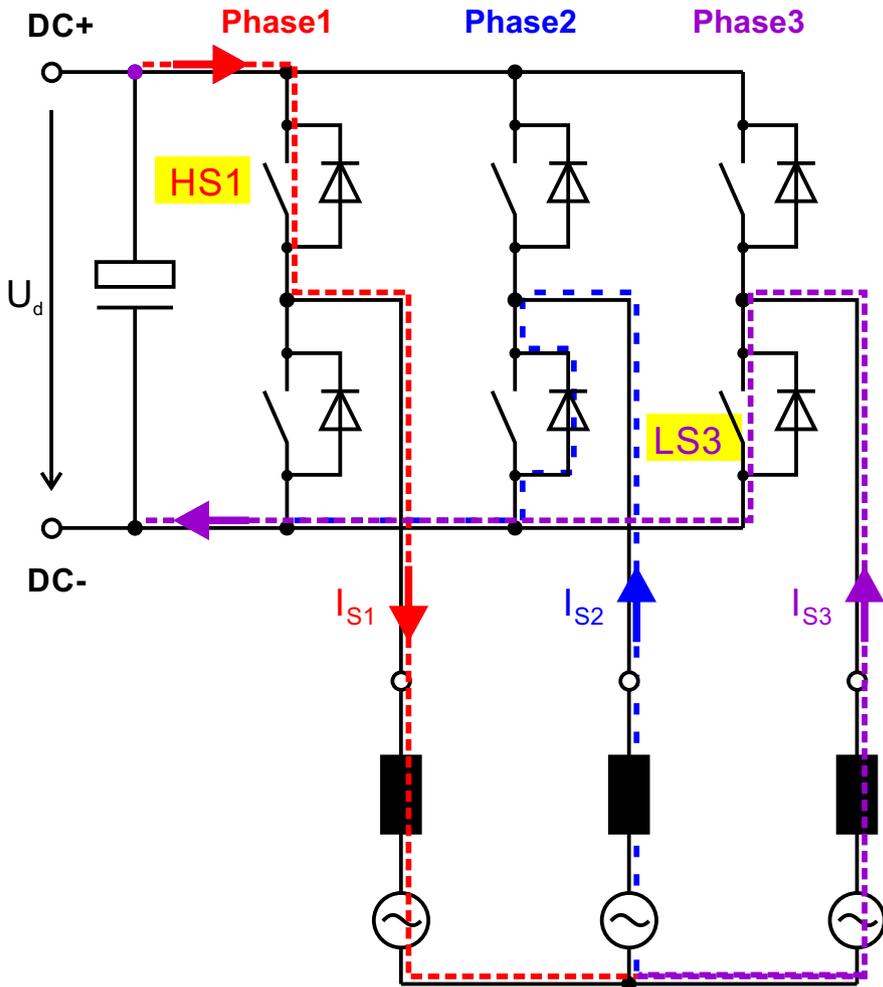
13.2 Blockkommutterung

Wechselrichter mit BLDC-Motor: Strompfade



13.2 Blockkommutterung

Wechselrichter mit BLDC-Motor: Kommutierungsvorgang

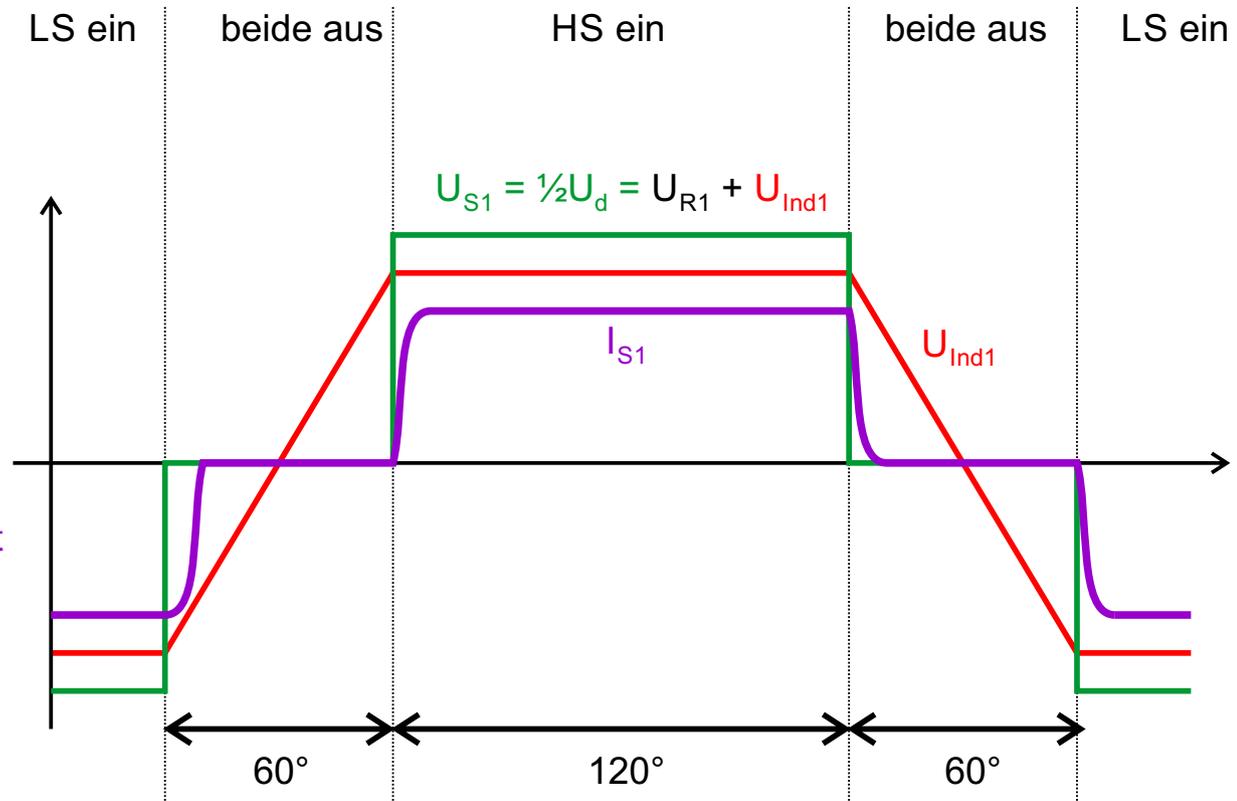
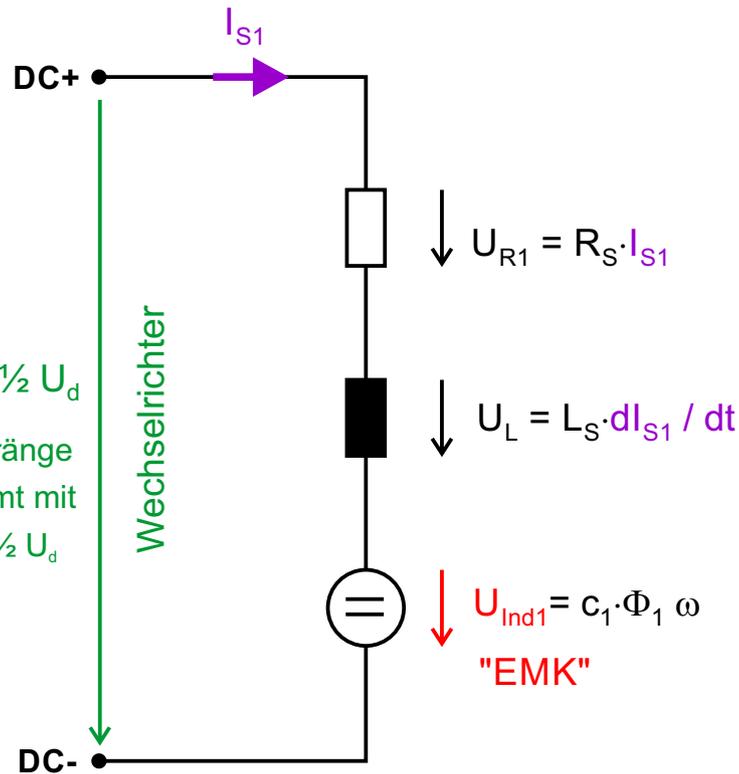


- LS2 ausschalten
 - LS3 einschalten
- } Strom kommutiert von Brücke 2 auf 3

13.3 Ersatzschaltbild

Genauere Analyse

Schalterstellung in Halbbrücke 1:



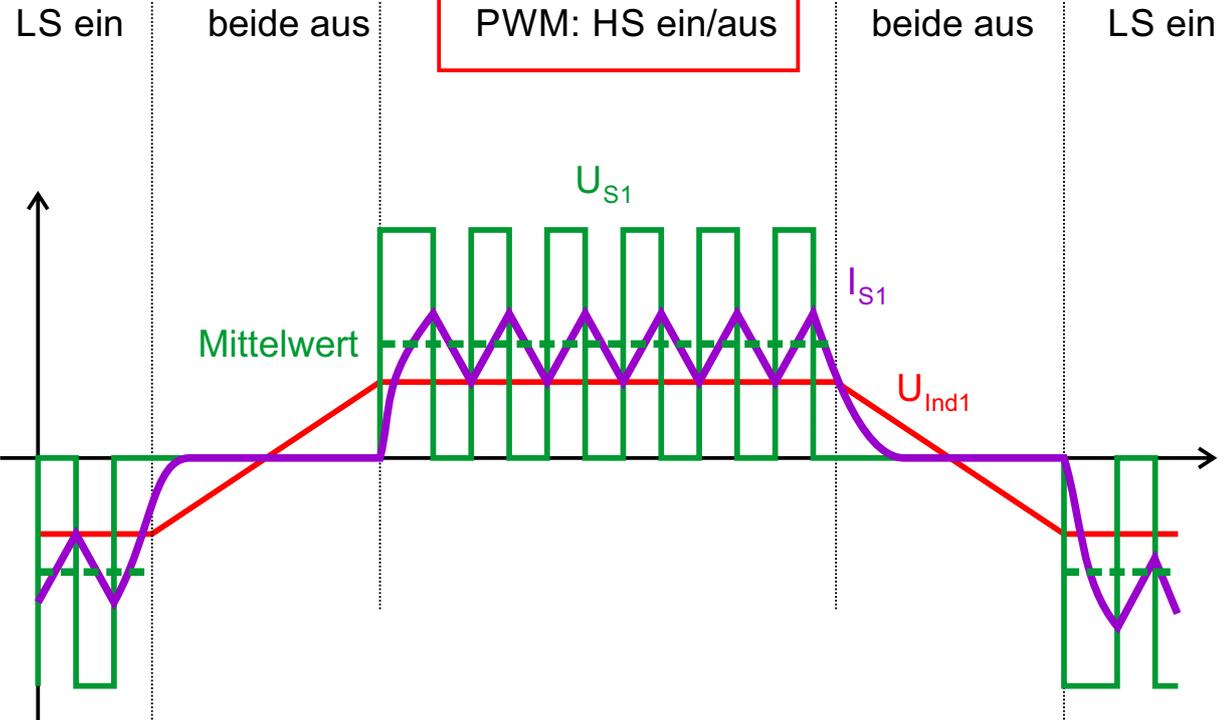
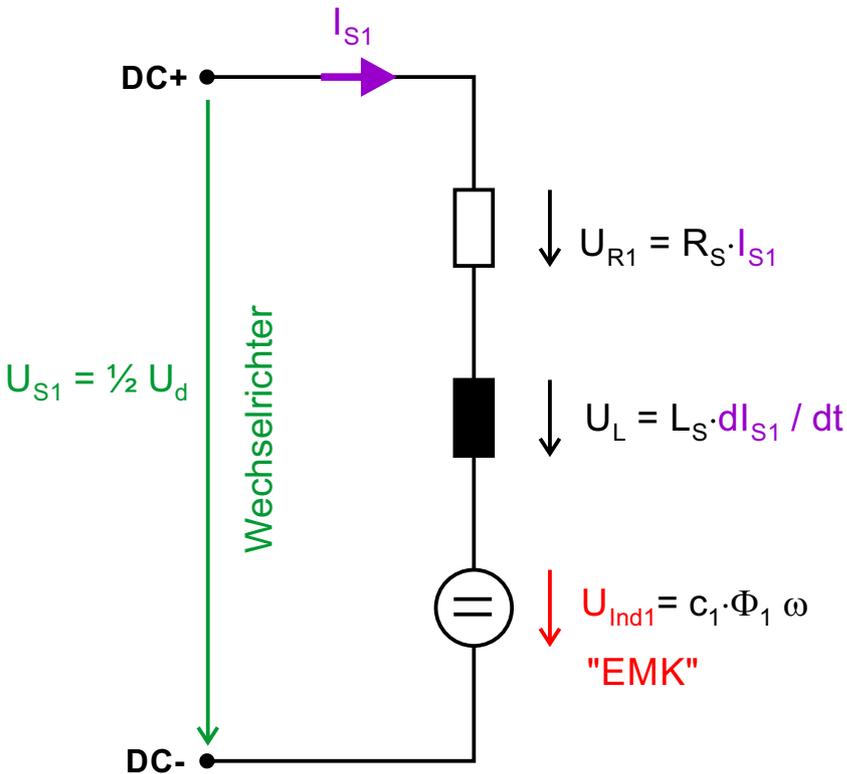
Fazit:

- im 120°-Stromblock: Verhalten entspricht Gleichstrommaschine
- Kommutierung nicht beliebig schnell: I_s weicht von der Idealkurve ab

13.4 Drehzahlsteuerung durch PWM

Drehzahlsteuerung

Schalterstellung in Halbbrücke 1:



Drehzahlsteuerung bzw. Stromregelung:

- Gleichstrommaschine: Tiefsetzsteller
- BLDC: Pulsen mit dem Wechselrichter

13.4 Drehzahlsteuerung durch PWM

Beispiel 1: Oszillogramm Kleinmotor

Spannungen gegen Zwischenkreismasse DC- gemessen

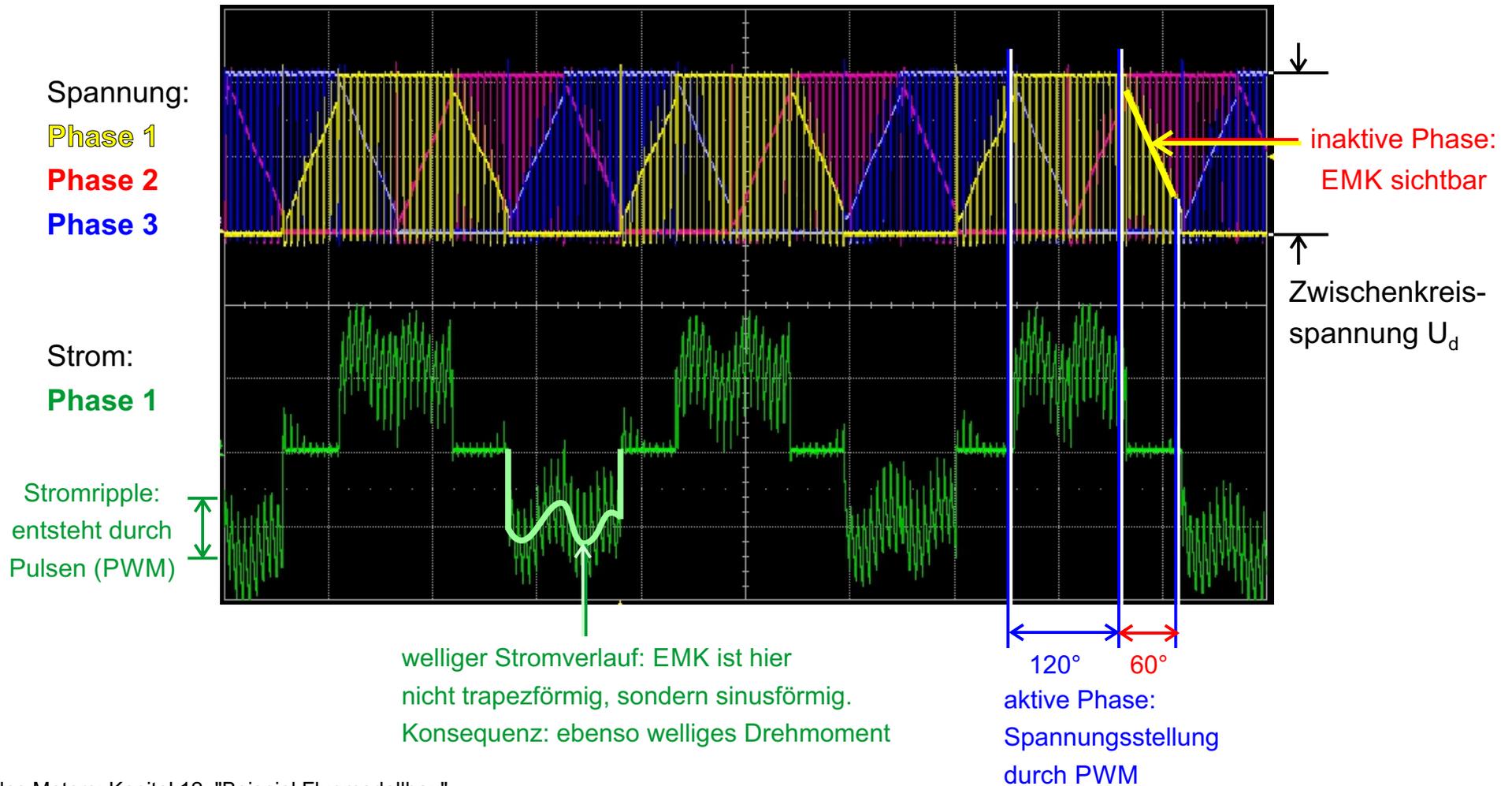


Bild des Motors: Kapitel 12, "Beispiel Flugmodellbau"

13.4 Drehzahlsteuerung durch PWM

Beispiel 2: Oszillogramme typischer Pulsmuster

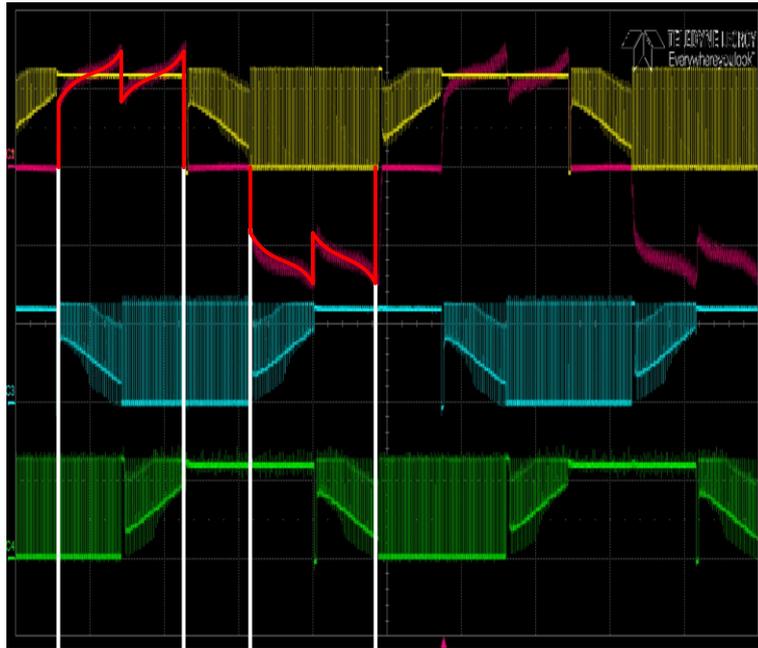
Mittlere Drehzahl:
Spannungsstellung durch Pulsen

Maximale Drehzahl:
Blocktakt (kein Pulsen), max. Spannung

Phase 1:
Spannung
Strom

Phase 2:
Spannung

Phase 3:
Spannung



Positiver Stromblock:
Phase 1 liegt auf DC+,
Phase 2 und 3 pulsen

negativer Stromblock von Phase 1:
Phase 1 pulst dauerhaft zwischen DC+ und DC-,
Phase 2 und 3 liegen jeweils für 60° auch DC+

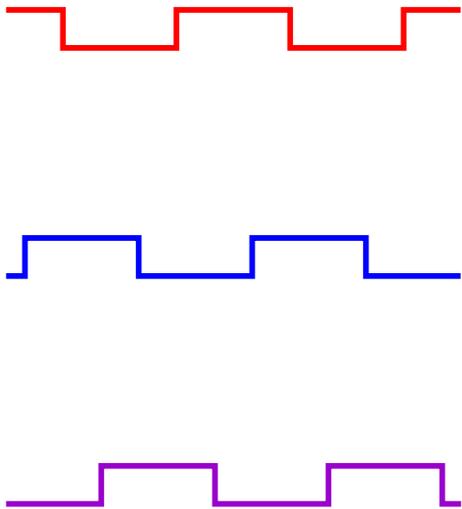


Kommutierungsvorgänge,
Stromfluss im Freilaufzweig
(Inversdioden HS- bzw. LS-Schalter)

13.5 Systembetrachtung

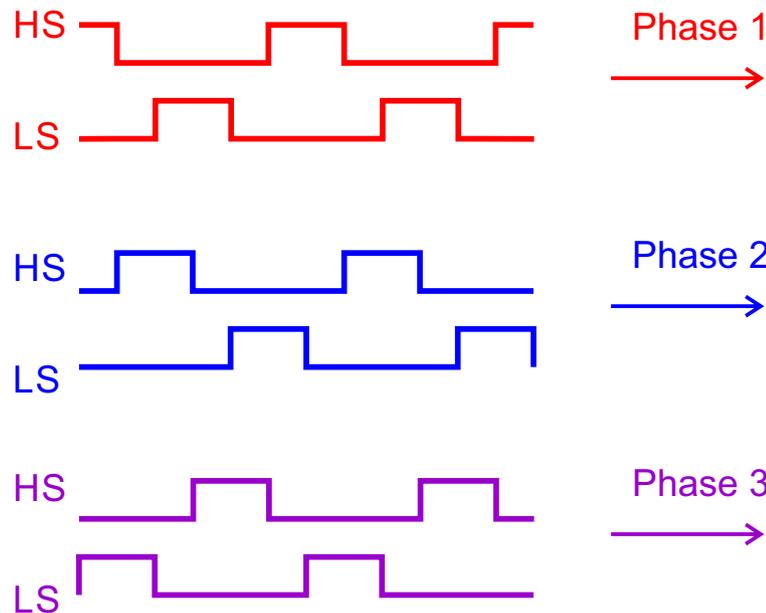
Ansteuerlogik

Sensorsignale Hallsonden



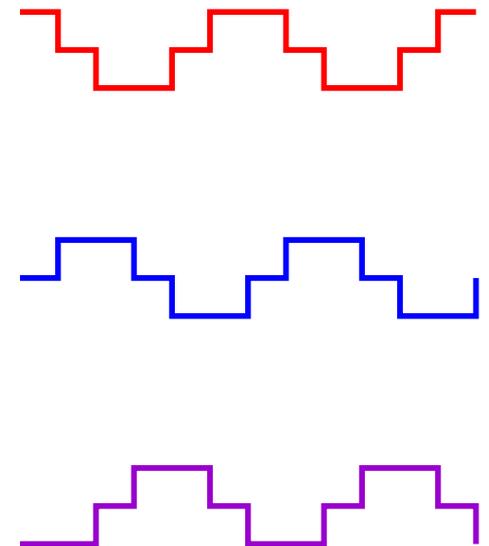
jeweils 120° Versatz

Ansteuersignale



Unterscheidung HS/LS-Schalter

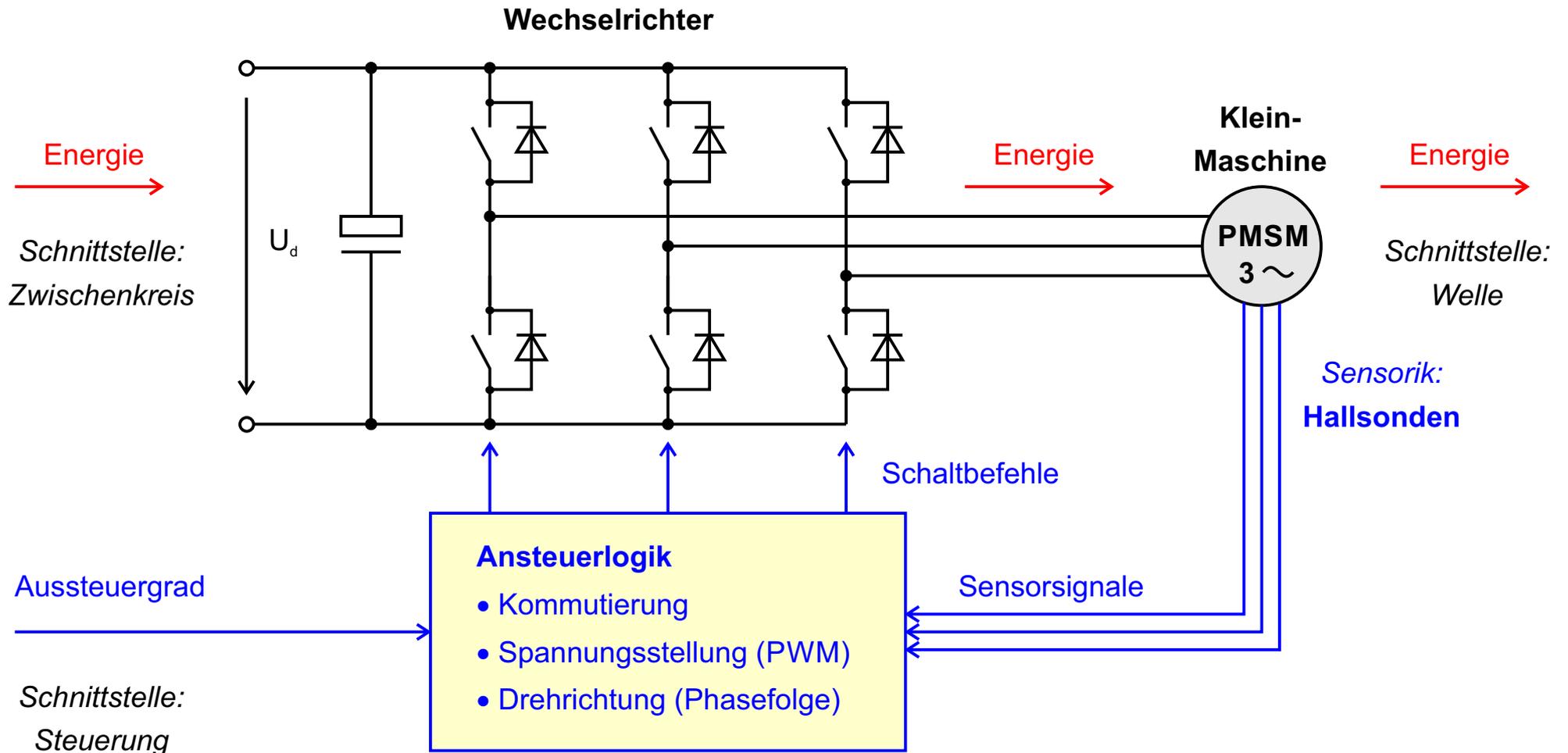
Geschaltete Spannungen



Idealzustand: Stromkurvenform

13.5 Systembetrachtung

Mechatronisches Gesamtsystem "BLDC-Motor"



13.6 Sinuskommutierung

Die Maschine soll ein konstantes Drehmoment liefern und optimal ausgenutzt werden

- Idealisierte Betrachtung: die EMK (Polradspannung) ist sinusförmig

⇒ Anforderungen an den Stromverlauf:

- in Phase mit der EMK
- ähnliche Kurvenform
- Stromsumme = 0

⇒ sinusförmige Ströme

EMK und Stromkurvenverlauf

Phase 1

EMK: $U_{\text{Ind}1}(t)$

Strom: $I_{S1}(t)$

Phase 2

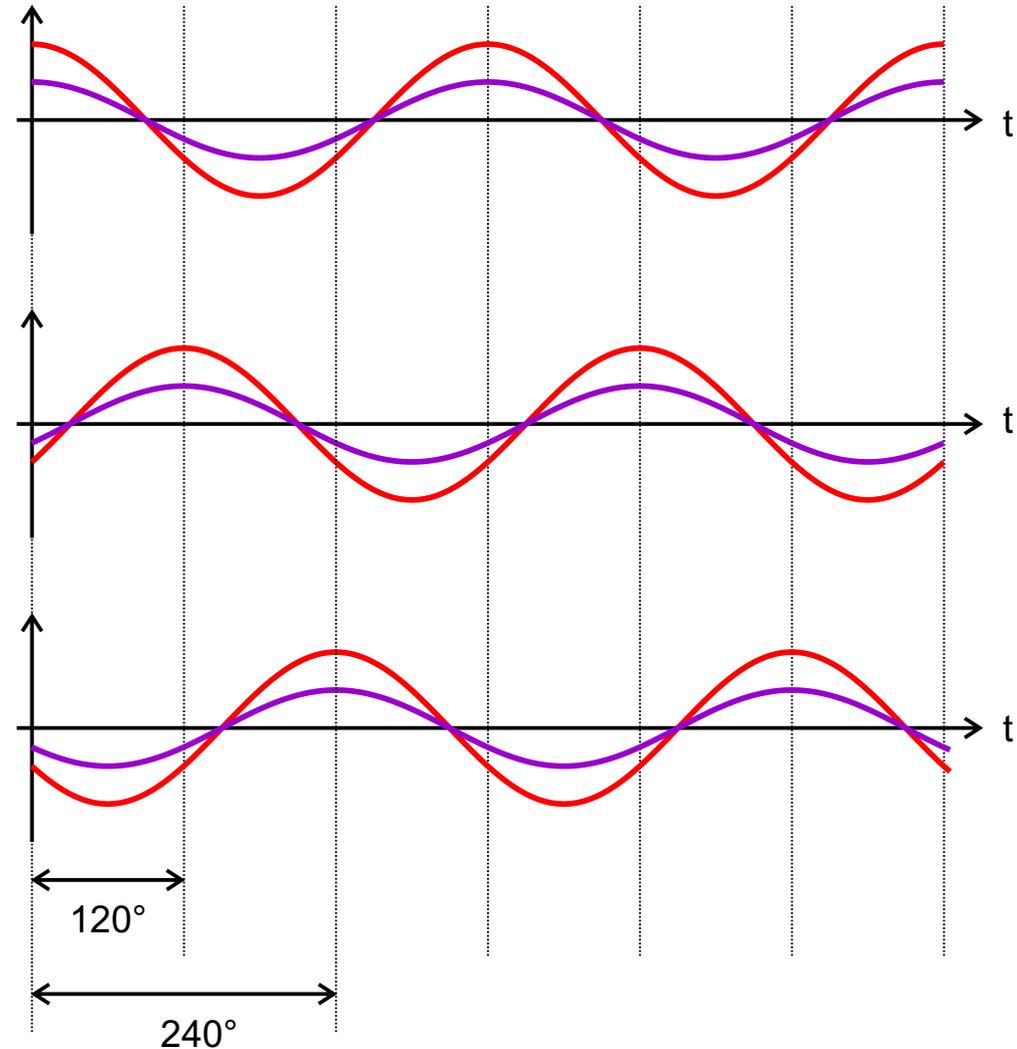
EMK: $U_{\text{Ind}2}(t)$

Strom: $I_{S2}(t)$

Phase 3

EMK: $U_{\text{Ind}3}(t)$

Strom: $I_{S3}(t)$



13.6 Sinuskommütierung

Zur Drehmomentbildung

Herleitung Drehmoment

Innere Leistung in Phase1:

$$P(t)_{i1} = M_{i1}(t) \cdot \omega_{\text{mech}} = U_{P1}(t) \cdot I_{S1}(t)$$

Inneres Drehmoment Phase1:

$$M_{i1}(t) = \frac{U_{P1}(t)}{\omega_{\text{mech}}} \cdot I_{S1}(t) = p \cdot \frac{U_{P1}(t)}{\omega_{\text{el}}} \cdot I_{S1}(t)$$

Mittelwert der \sin^2 -Funktion von $M_{i1}(t)$:

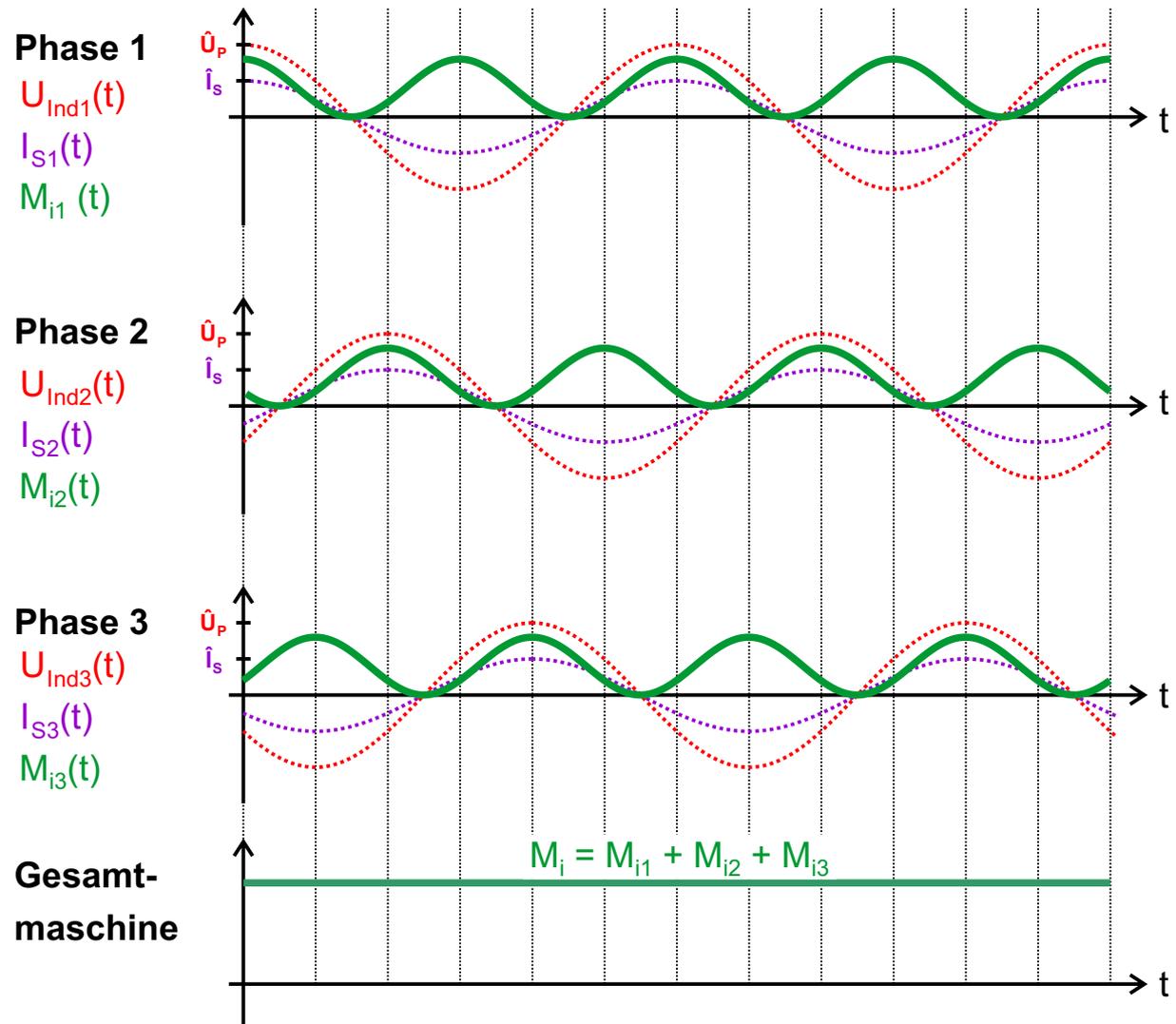
$$M_{i1} = \frac{p}{2} \cdot \frac{\hat{U}_P}{\omega_{\text{el}}} \cdot \hat{I}_S$$

Drehmoment Gesamtmaschine:

$$M_i = M_{i1} + M_{i2} + M_{i3} = 3 \cdot \frac{p}{2} \cdot \frac{\hat{U}_P}{\omega_{\text{el}}} \cdot \hat{I}_S$$

$$= \frac{3 \cdot p}{4\pi} \cdot \frac{\hat{U}_P}{f_{\text{el}}} \cdot \hat{I}_S = \underbrace{\frac{3 \cdot p}{2\pi} \cdot \frac{U_{P,\text{eff}}}{f_{\text{el}}}}_{\text{siehe Kapitel 12}} \cdot I_{S,\text{eff}}$$

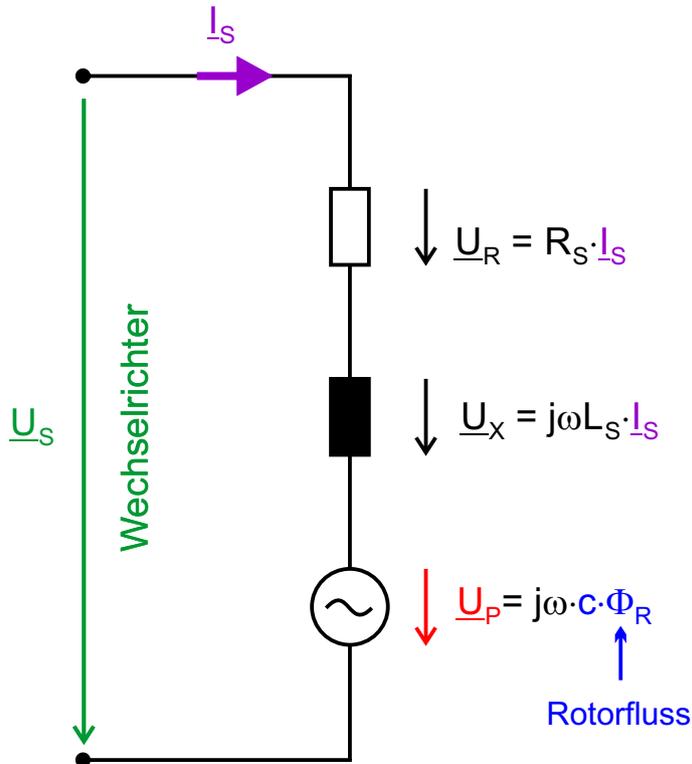
siehe Kapitel 12



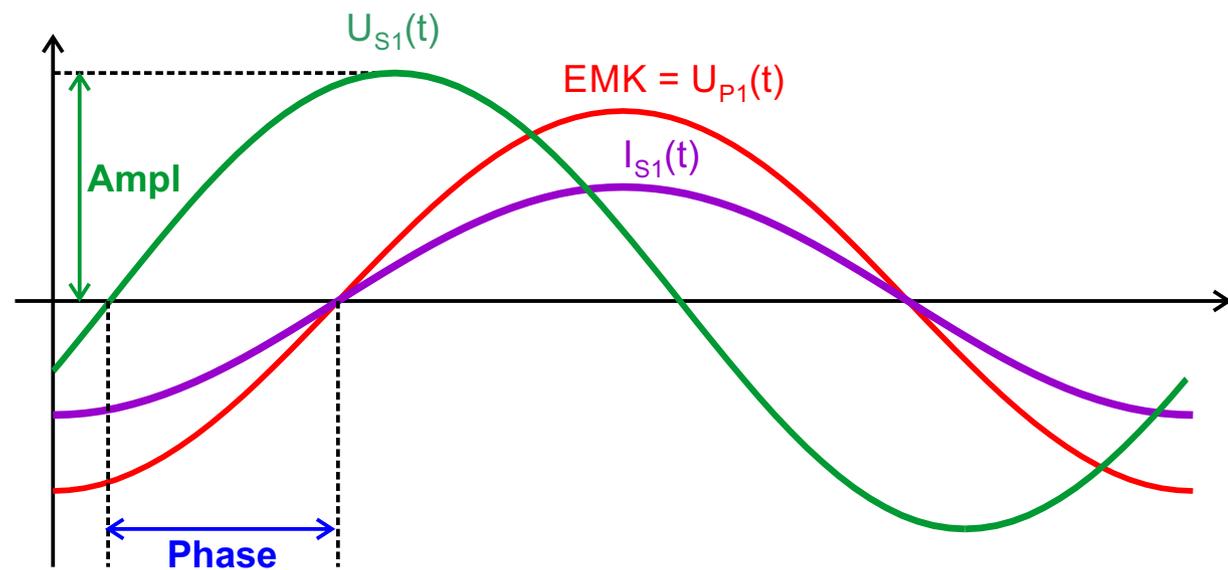
13.6 Sinuskommutierung

Was muss getan werden, damit die Maschine das gewünschte Drehmoment erzeugt?

Spannung mit dem Wechselrichter so einprägen, dass der **Strom** in Phase mit der **EMK** liegt



hier: \underline{U}_S und \underline{I}_S
sind Raumzeiger

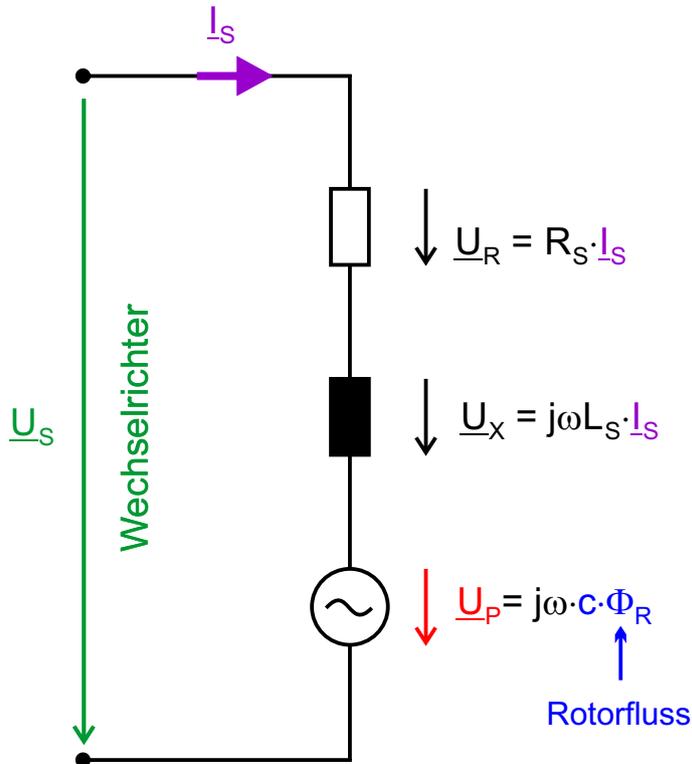


Fazit:

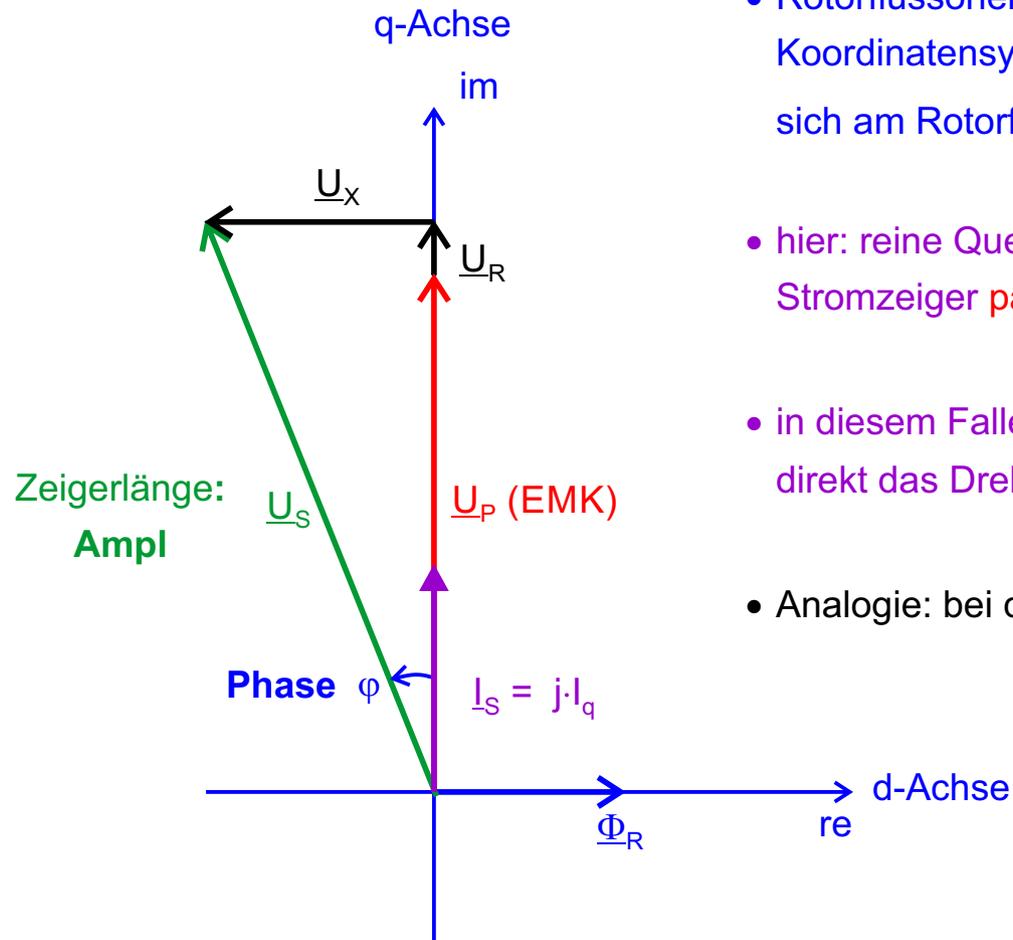
- **Amplitude** und **Phase** von \underline{U}_S müssen bestimmt werden
- dazu braucht man eine Feldorientierte Regelung (FOR)
- auch: "Vektorregelung", da die Information 2-dimensional ist

13.6 Sinuskommutierung

Andere Darstellung desselben Sachverhaltes: Zeigerdiagramm für die Zeitverläufe



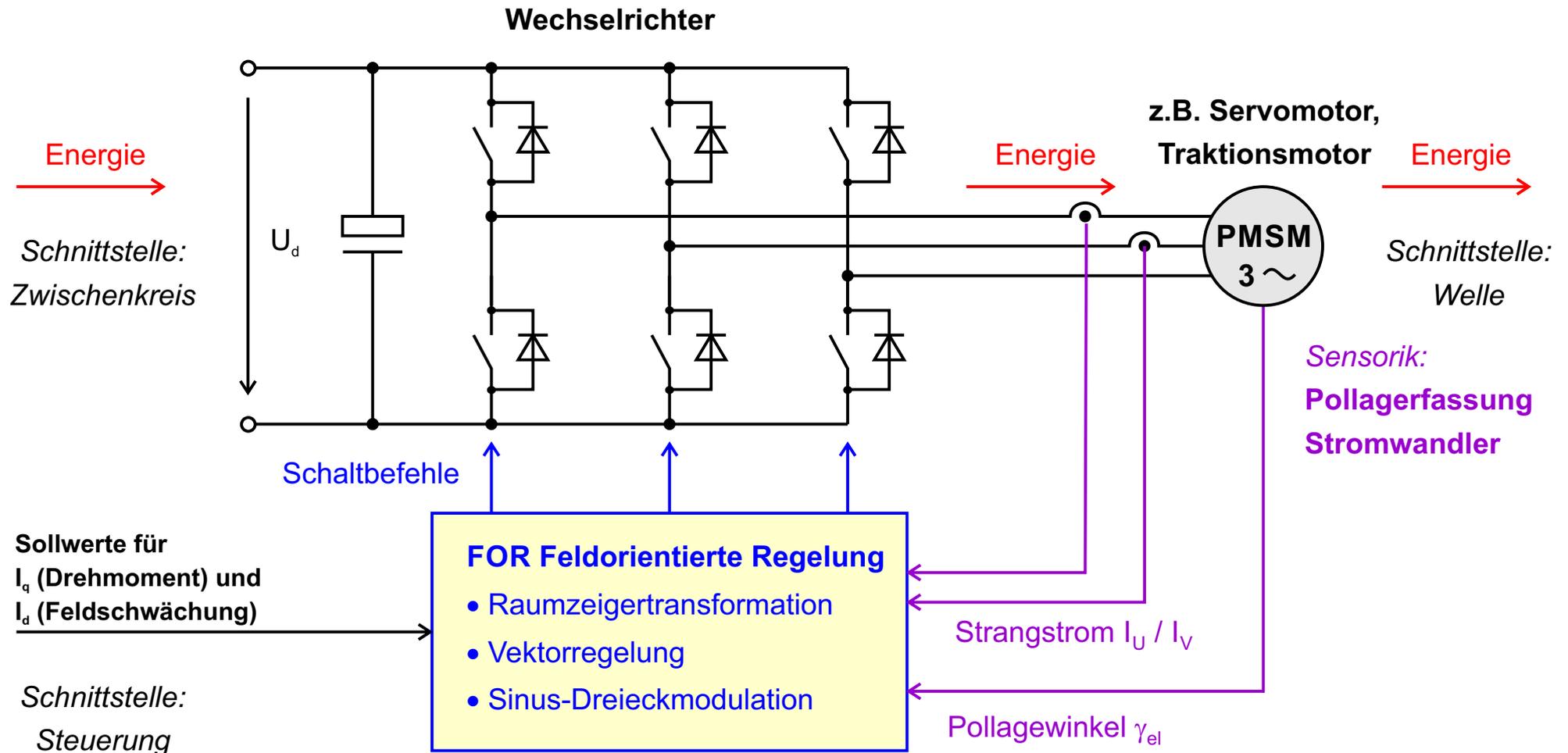
hier: \underline{U}_S und \underline{I}_S
sind Raumzeiger



- Rotorflussorientierung / Pollage: Koordinatensystem orientiert sich am Rotorfluss $\underline{\Phi}_R$ (d-Achse)
- hier: reine Querstromeinprägung, Stromzeiger **parallel** EMK-Zeiger
- in diesem Falle kann man mit I_q direkt das Drehmoment einstellen
- Analogie: bei der GM ist $M_i = k_i \cdot I_A$

13.6 Sinuskommutierung

Master Elektrische Antriebe: Mechatronisches Gesamtsystem "stromgeregelte PMSM"



13.6 Sinuskommutierung

Master Elektrische Antriebe: FOR (Feldorientierte) Vektorregelung

