

Grundlagen elektrische Antriebe

Kapitel 10a: Leistungselektronik für 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

Elektrische Antriebe

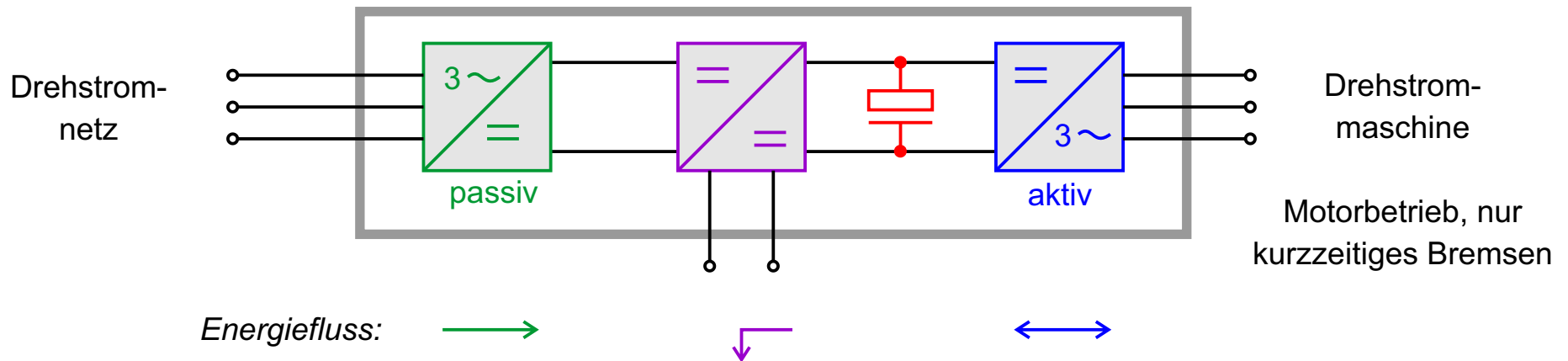
Inhalt Kapitel 10a Leistungselektronik für Drehfeldmaschinen

- 10a.1 Standard-Frequenzumrichter
- 10a.2 Topologie und Pulsmuster
- 10a.3 Wechselrichterscheinleistung
- 10a.4 Komponenten
- 10a.5 Ausführungsbeispiele

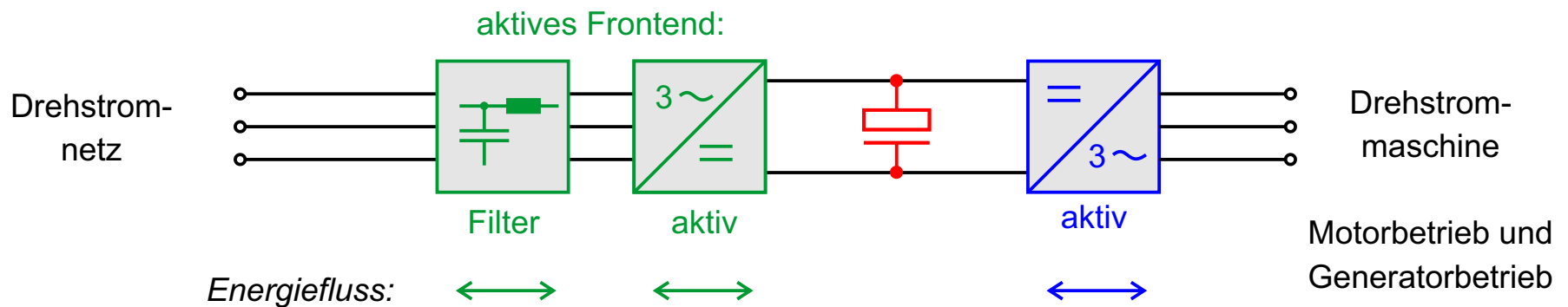
10a.1 Standard - Frequenzumrichter

Vergleich Blockschaltbilder

Standardfrequenzumrichter mit
Diodenbrücke, Bremschopper und Wechselrichter



Alternativ: mit Netzfilter und Wechselrichter für Netzzückspeisung



10a.1 Standard - Frequenzumrichter

Schaltbild Standardfrequenzumrichter

Gleichrichter

- passive Diodenbrücke
- ggf. Netzfilter

Zwischenkreis

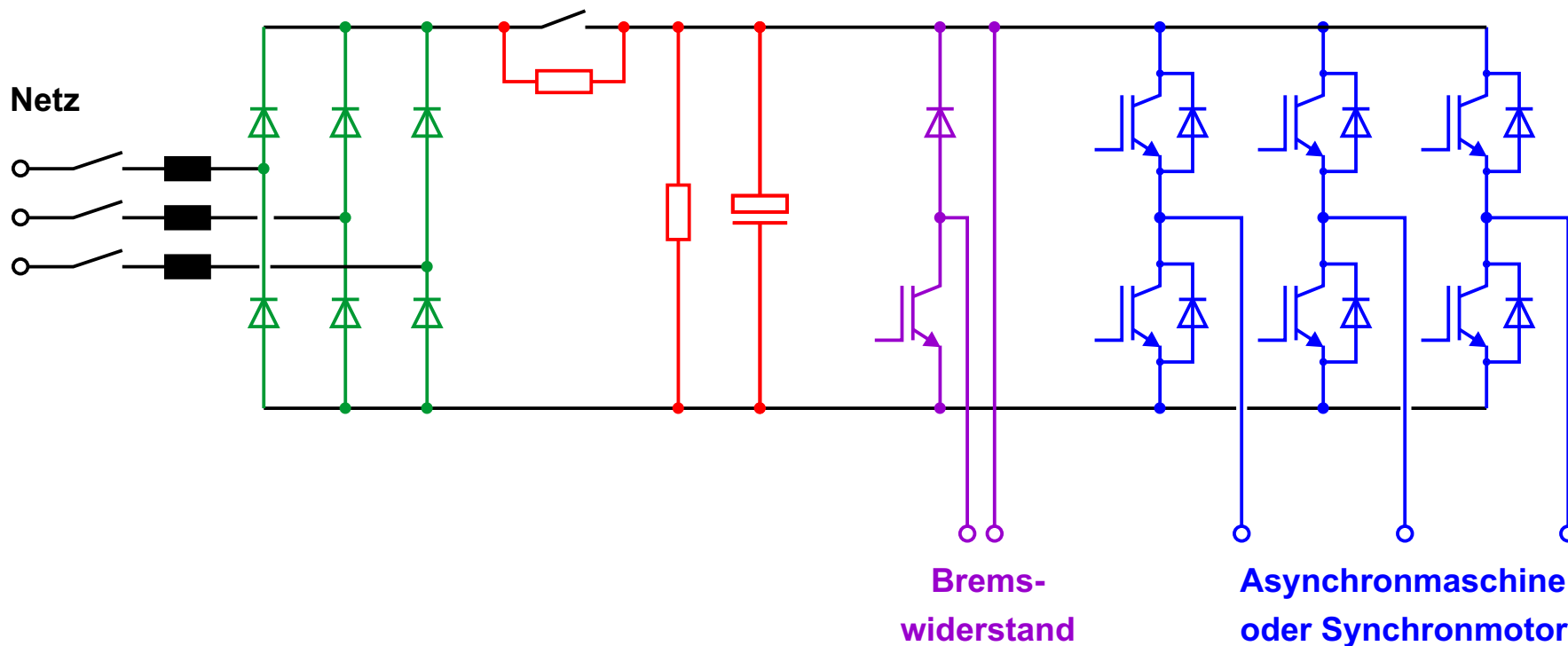
- Vorladewiderst.
- Kondensatoren

Bremschopper

- Tiefsetzsteller
- vermeidet
Überspannung

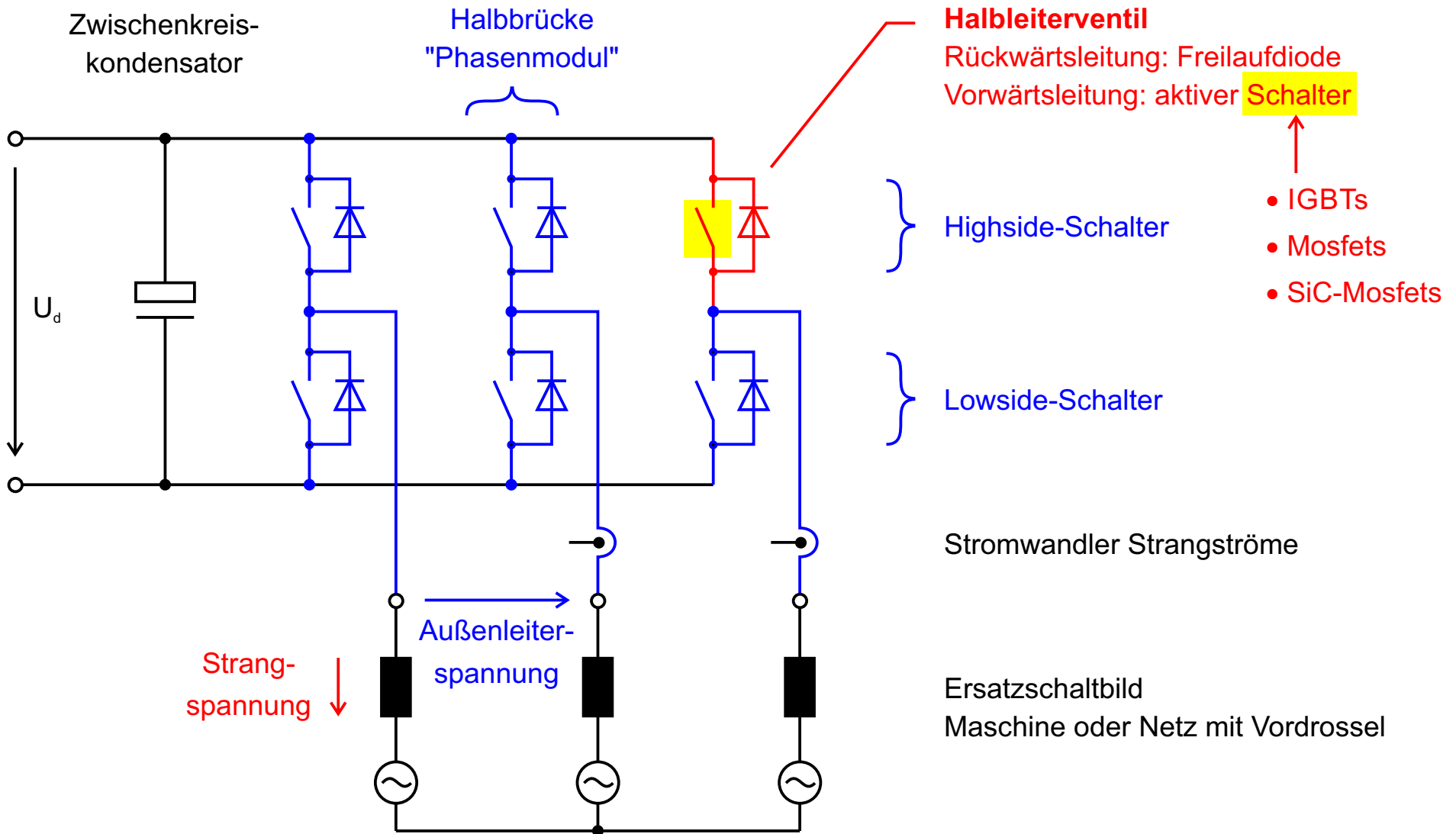
Drehstromwechselrichter

- 1 Halbbrücke: 2Q-Betrieb GM
 - 2 Halbbrücken: 4Q-Betrieb GM
 - 3 Halbbrücken: Drehstromwechselrichter (selbstgeführt, bidirektional, 4Q-Betrieb)
- } Kap. 4a



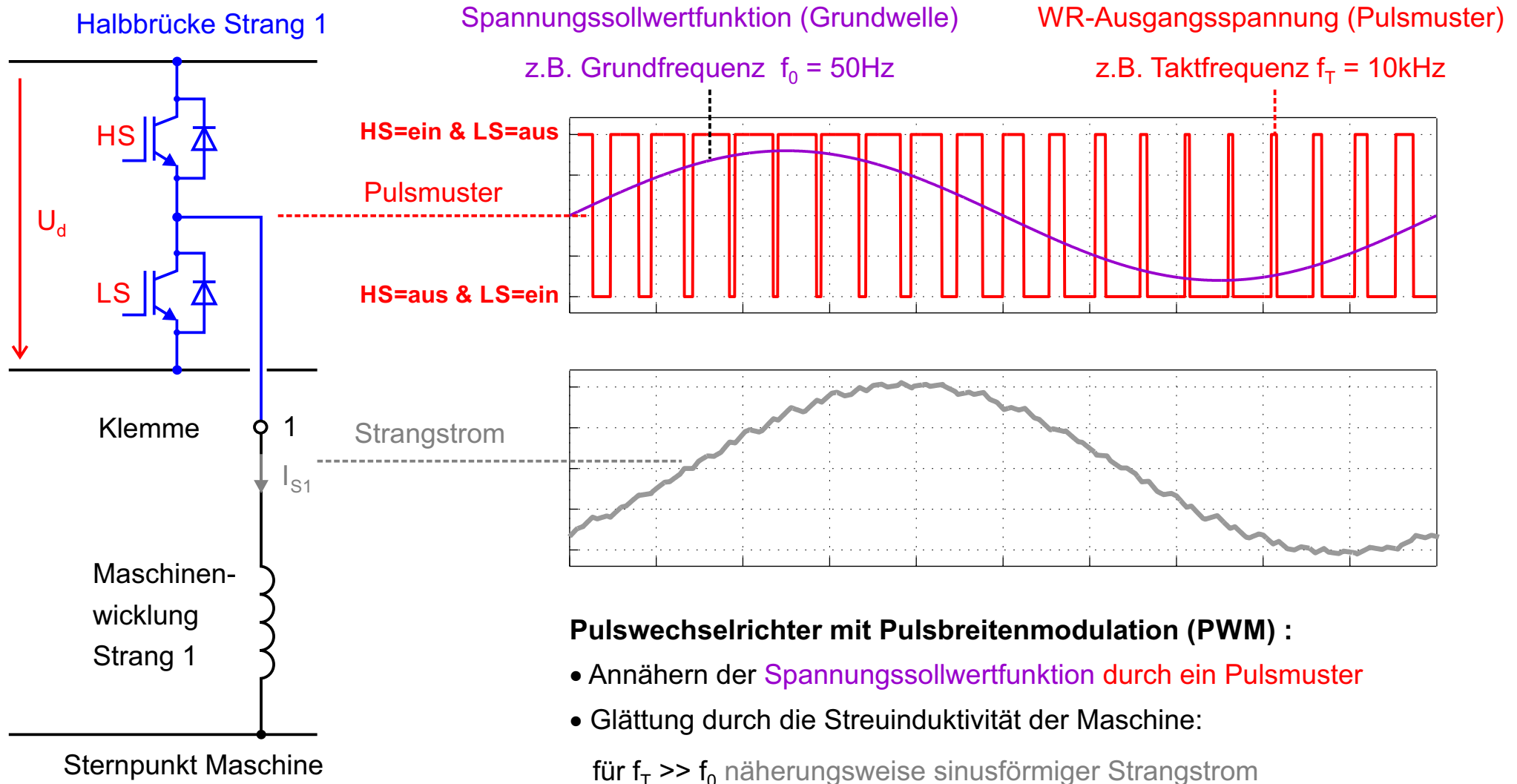
10a.2 Topologie und Pulsmuster

Drehstrom-Pulswechselrichter = 3 Halbbrücken



10a.2 Topologie und Pulsmuster

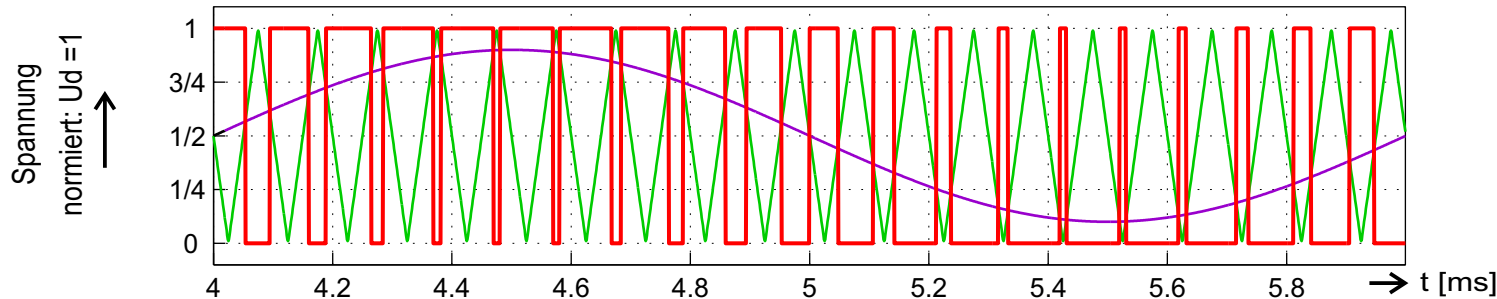
Spannungsstellung durch Pulsen



10a.2 Topologie und Pulsmuster

Sinus-Dreieckmodulation, linearer Aussteuerbereich

Modulation für Phase 1 PWM = 10kHz Aussteuerung = 80% Grundfrequenz = 500Hz

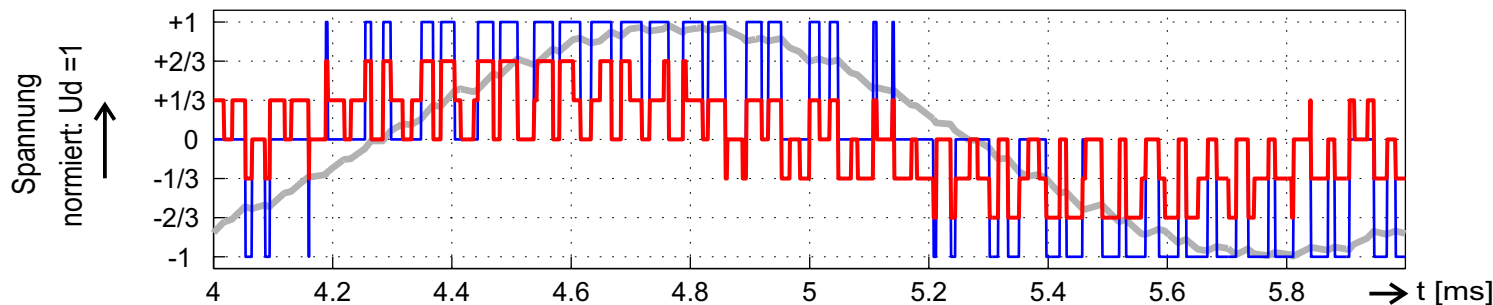


Aussteuerung: 80%

Sollwertkurve: $f_0 = 500\text{Hz}$

Dreieckfunktion $f_T = 10\text{kHz}$

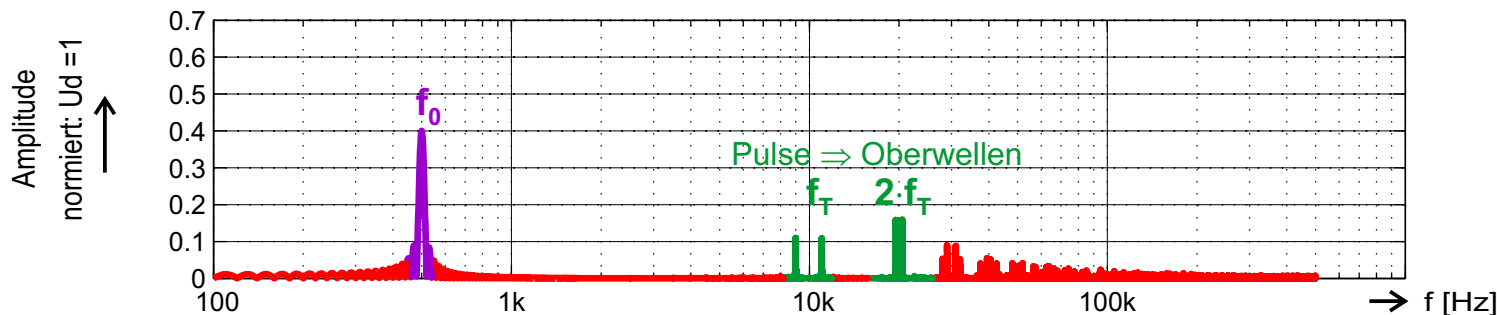
PWM-Signal



Außenleiterspannung

Strangspannung

Strangstrom



FFT der Strangspannung

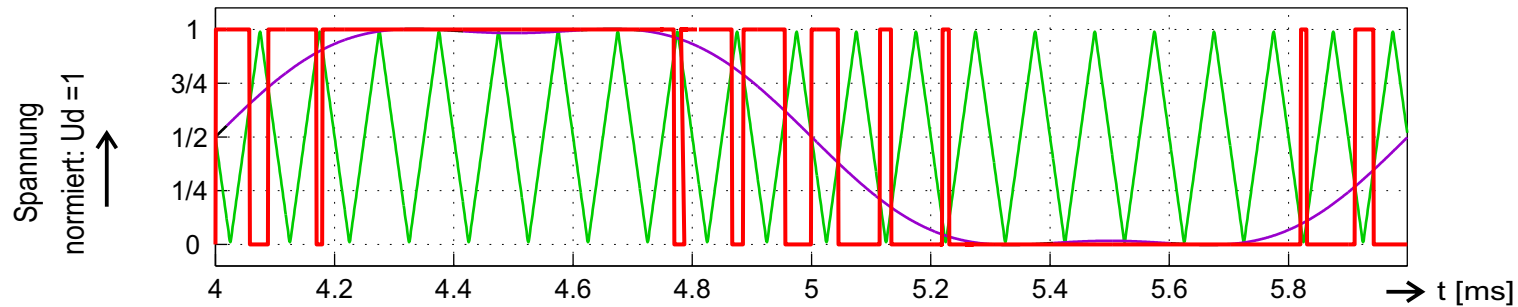
Linie der Grundwelle f_0 :

$$\hat{U}_{1s} = 0,40 \cdot U_d$$

10a.2 Topologie und Pulsmuster

Grenze des linearen Aussteuerbereiches

Modulation für Phase 1 PWM = 10kHz Aussteuerung = 116% Grundfrequenz = 500Hz

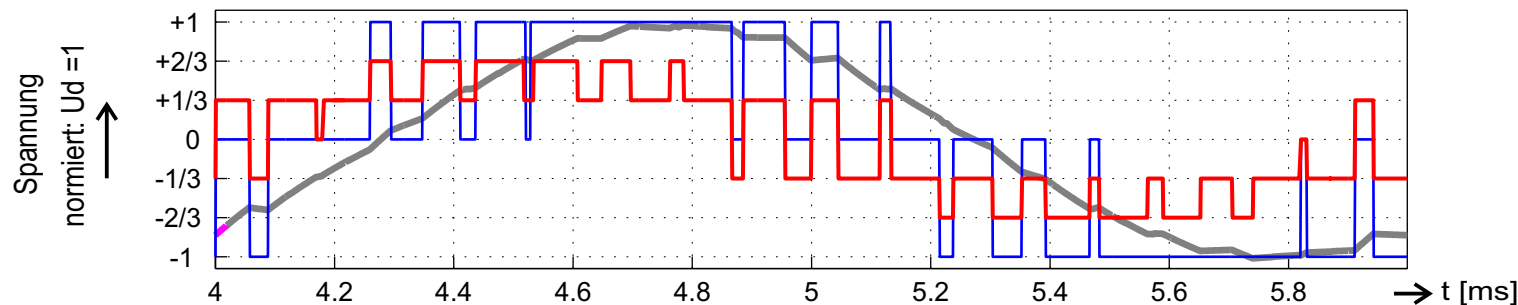


Aussteuerung: 116%

Sollwertkurve: $f_0 = 500\text{Hz}$

Dreieckfunktion $f_T = 10\text{kHz}$

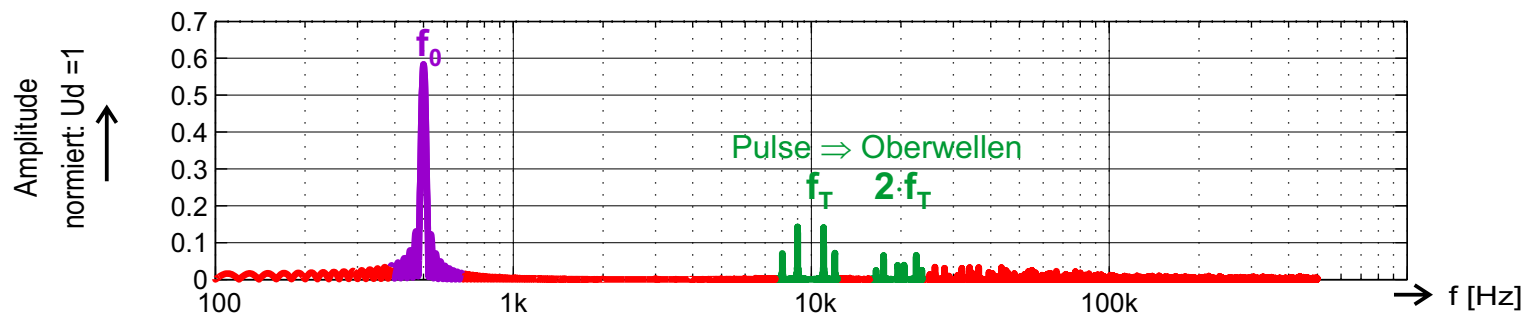
PWM-Signal



Außenleiterspannung

Strangspannung

Strangstrom



FFT der Strangspannung

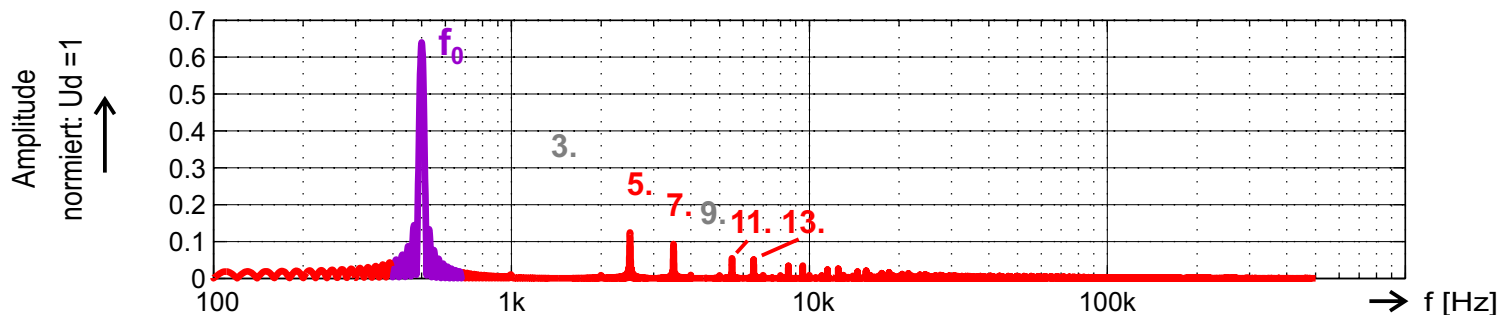
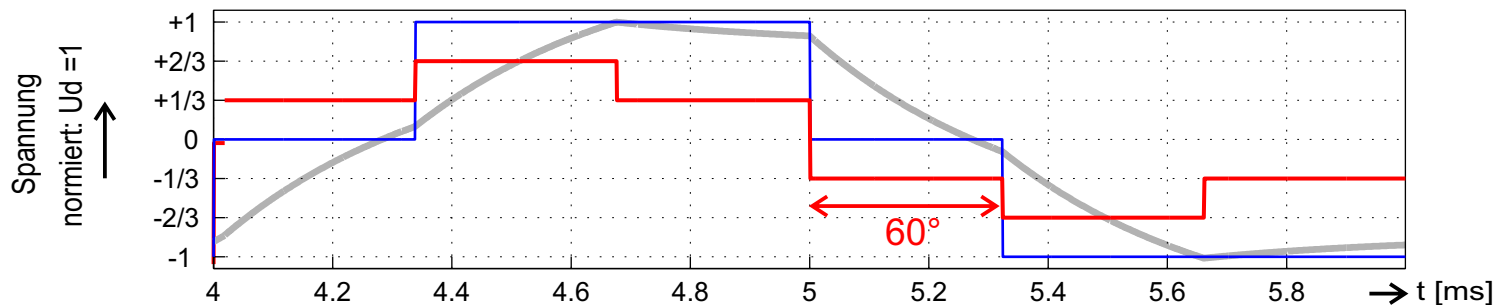
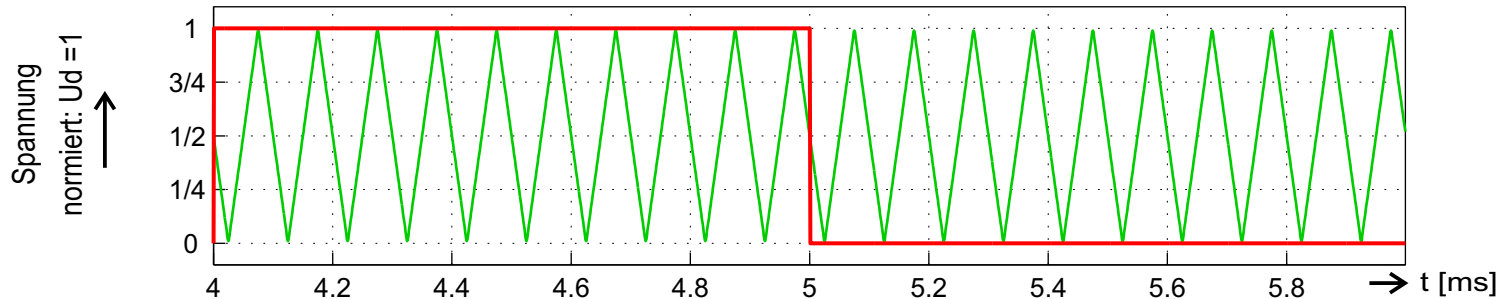
Linie der Grundwelle f_0 :

$$\hat{U}_{1s} = 0,58 \cdot U_d$$

10a.2 Topologie und Pulsmuster

Grundfrequenztaktung (Blocktakt)

Modulation für Phase 1 PWM = 10kHz Aussteuerung = 128% Grundfrequenz = 500Hz



Aussteuerung: 128%

Sollwertkurve: $f_0 = 500\text{Hz}$

Dreieckfunktion $f_T = 10\text{kHz}$

PWM-Signal

Außenleiterspannung

Strangspannung

Strangstrom

FFT der Strangspannung

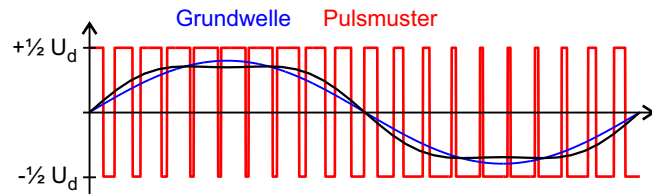
Linie der Grundwelle f_0 :

$$\hat{U}_{1s} = 0,64 \cdot U_d$$

10a.3 Wechselrichterscheinleistung

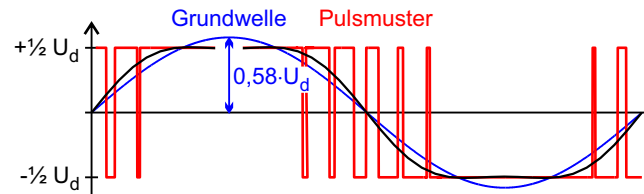
Erklärung Pulswechselrichter und PWM-Stellgrenzen

Betrieb innerhalb des Stellbereichs



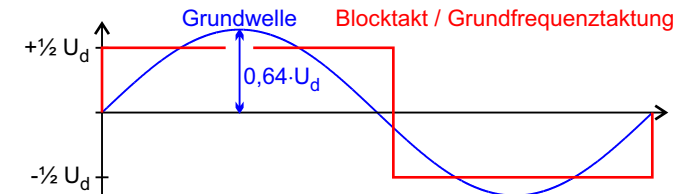
Sollwert für PWM: Grundwelle mit 3. Harmonischer

Grenze der linearen PWM



Sollwert für PWM: Grundwelle mit 3. Harmonischer

Wechselrichterstellgrenze



keine PWM, Übermodulation, Strom ggf. nicht sinusförmig

Beim Pulswechselrichter wird die zur Energiewandlung in der Maschine relevante Grundwelle der Strangspannung (blau) durch Pulsbreitenmodulation (PWM) in Pulsmustern "verpackt" (rot). Mit diesen Pulsmustern werden die 3 Halbbrücken des Wechselrichters angesteuert, wobei die Grundwellen jeweils 120° Phasenversatz haben. Durch Pulsen mit den Highside- und Lowsideschaltern der 3 Halbbrücken des Wechselrichters, also durch Hin- und Herschalten zwischen 0 und U_d (bzw. $-\frac{1}{2}U_d$ und $+\frac{1}{2}U_d$, wenn man den Gleichanteil herausrechnet) kann so ein Drehspannungssystem variabler Frequenz und Amplitude erzeugt werden, das man zum drehzahlvariablen Betrieb einer Drehfeldmaschine benötigt.

Anmerkung: Hier ist mit dem Pulsmuster nicht der 5-stufige Zeitverlauf der Strangspannungen (Seite 8, mittleres Diagramm) geplottet, sondern die Brückenausgangsspannungen, wie man sie gegen DC-Minus messen würde. Die enthaltene Grundwelle bleibt jedoch unverändert und entspricht der Strangspannungsamplitude $\hat{U}_{1S}$.

10a.3 Wechselrichterscheinleistung

Wieviel Scheinleistung kann ein WR am Ausgang bereit stellen?

Scheinleistung am Umrichterausgang:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{1A,eff} \cdot I_{S,eff} = 3 \cdot U_{1S,eff} \cdot I_{S,eff} = \frac{3}{2} \hat{U}_{1S} \cdot \hat{I}_S$$

Aussteuergrenze = max. mögliche Grundswingungsamplitude

Grenze lineare PWM:

$$\hat{U}_{1S} = \underbrace{\frac{1}{\sqrt{3}}}_{0.58} U_d$$

Grundfrequenztaktung (Blocktakt, Übermodulation):

$$\hat{U}_{1S} = \underbrace{\frac{2}{\pi}}_{0.64} U_d$$

$$S = \frac{3}{2} \cdot \hat{U}_{1S} \cdot \hat{I}_S = \underbrace{\frac{\sqrt{3}}{2}}_{0.87} \cdot U_d \cdot \hat{I}_S$$

$$S = \frac{3}{2} \cdot \hat{U}_{1S} \cdot \hat{I}_S = \underbrace{\frac{3}{\pi}}_{0.96} \cdot U_d \cdot \hat{I}_S$$



PWM: Zwischenpulse, Strom sinusförmig

Last: ASM, PMSM, Netz mit Filter

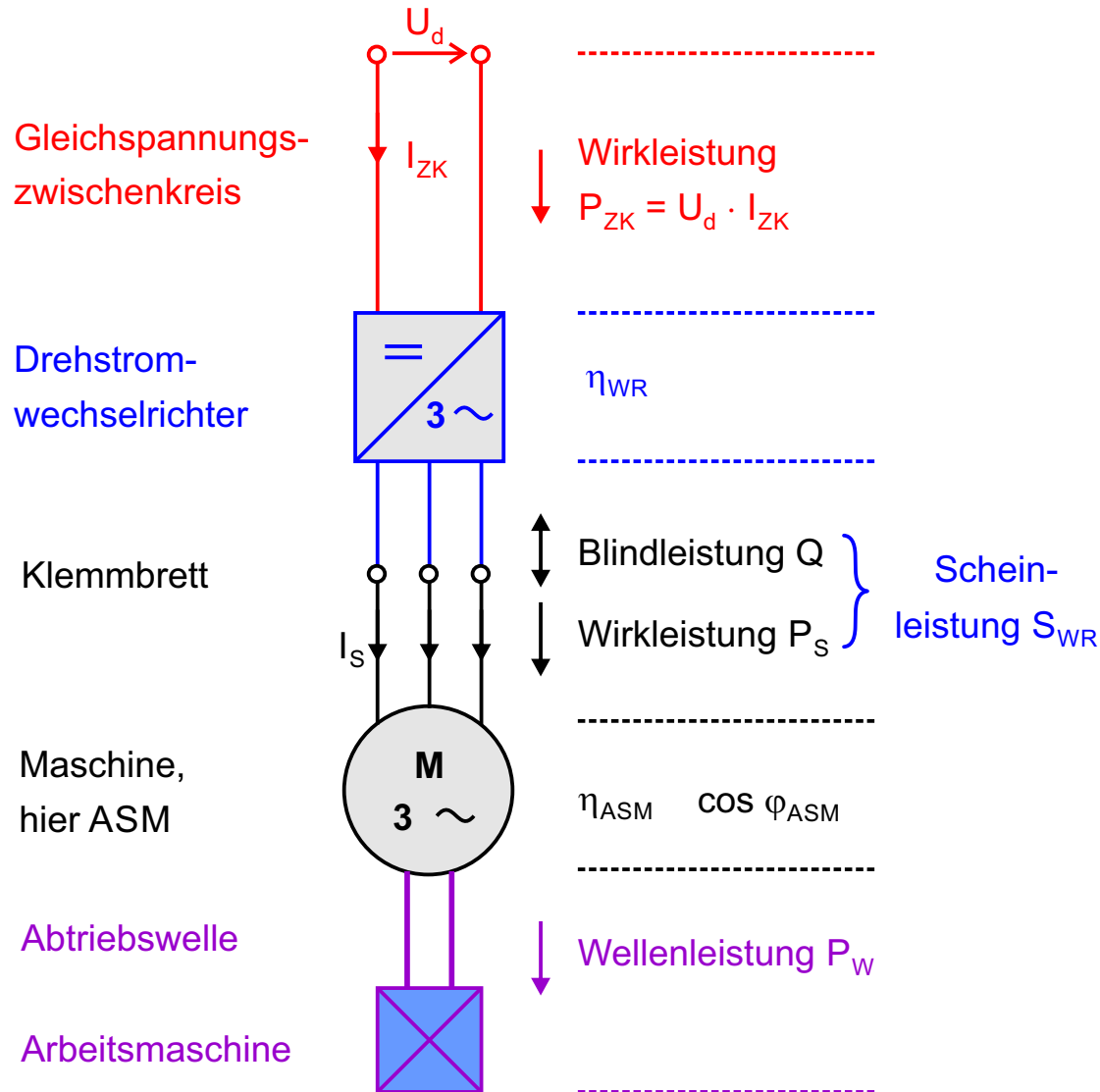


PWM: keine Zwischenpulse, Strom ggf. nicht sinusförmig

Last: i.d.R. nur PMSM

10a.3 Wechselrichterscheinleistung

Schein-, Blind- und Wirkleistungsbilanz



Wirkleistungsbilanz im Motorbetrieb:

$$P_s = P_W / \eta_{ASM} \text{ und } P_{ZK} = P_s / \eta_{WR}$$

$$\Rightarrow I_{ZK} = \dots$$

Scheinleistungsbedarf der Maschine:

$$S_{WR} = S_{ASM} = P_s / \cos \varphi_{ASM}$$

Scheinleistung am Wechselrichterausgang

$\hat{I}_s$: Scheitelwert des Strangstromes

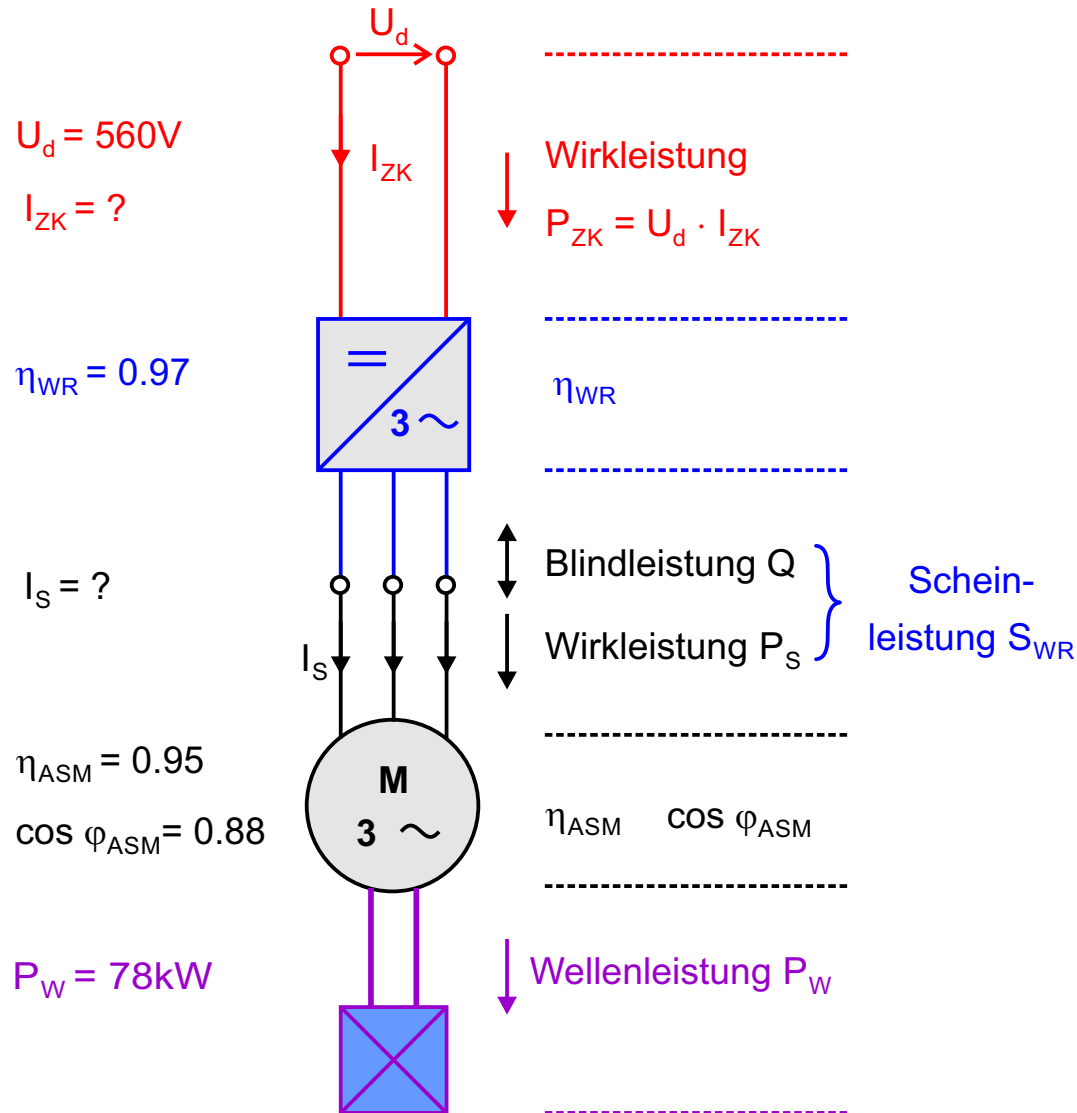
U_d : Zwischenkreisspannung

Aussteuergrenze PWM: $S_{WR,max} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_d \cdot \hat{I}_s$
 $\Rightarrow \hat{I}_s = \dots$

Grundfrequenztaktung: $S_{WR,max} = \frac{3}{\pi} \cdot U_d \cdot \hat{I}_s$
 $\Rightarrow \hat{I}_s = \dots$

10a.3 Wechselrichterscheinleistung

Beispiel



Wirkleistungsbilanz im Motorbetrieb:

$$P_S = P_W / \eta_{ASM} = 82.11kW$$

$$P_{ZK} = P_S / \eta_{WR} = 84.64kW \Rightarrow I_{ZK} = 151.1A$$

Scheinleistung Wechselrichter/ Maschine:

$$S_{WR} = S_{ASM} = P_S / \cos \varphi_{ASM} = 93.30kVA$$

Betrieb der ASM bis Aussteuergrenze PWM:

$$S_{max} = S_{WR} = 0.87 \cdot U_d \cdot \hat{I}_S \Rightarrow \hat{I}_S = 191.5A$$

$$\text{bzw. } I_{S,eff.} = 135.4A$$

Y-Strangspannung der ASM bei S_{max} :

$$S_{WR} = 3/2 \cdot \hat{U}_{1S} \cdot \hat{I}_S \Rightarrow \hat{U}_{1S} = 325V$$

$$\text{bzw. } U_{S,eff.} = 230V$$

$$\text{alternativ: } \hat{U}_{1Smax} = 0.58 \cdot U_d = 325V$$

10a.4 Komponenten

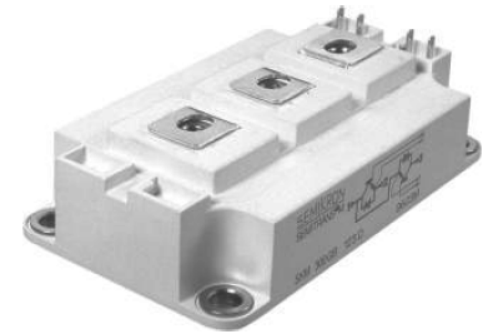
Bilder

Frequenzumrichterkomponenten – vgl. Seite 4 unten

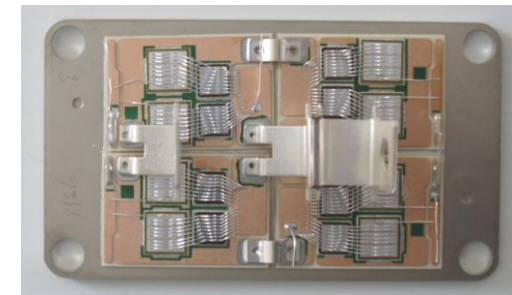
Netzfilter
Rückspeiseeinheit 120kW
Wechselrichter 100kVA
Steuereinheit



IGBT-Halbbrückenmodul
im Standardgehäuse



IGBT-Halbbrückenmodul geöffnet



Stichwort:

"Aufbau- und Verbindungstechnik"

Bilder: A. Kleimaier, HS Landshut

10a.5 Ausführungsbeispiele

Beispiel: rückspeisefähiger 78kW-Antrieb für Prüfstand

Leistungsteil

- Reglereinheit
- maschinenseitiger WR
- netzseitiger WR
- Netzfilter
- Lüfter

*hier zu Demozwecken
offen, wird typ. im
Schaltschrank verbaut*



Schaltschrank 1

- SPS (Steuerung)
- Netzschütz
- Sicherungen
- Stromwandler
- Prüfstands-
steuerung
- Klemmenleisten
1.5mm² (16A)

Schaltschrank 2

- Netzanschluss
- Klemmenleisten 50mm² (160A)

Netzeinspeisung:

$$\sqrt{3} \cdot 400V \cdot 160A = 110.8kVA$$

Bilder: A. Kleimaier, HS Landshut

10a.5 Ausführungsbeispiele

HS Landshut, Eigenbau: Drehstromwechselrichter 600V DC 35A

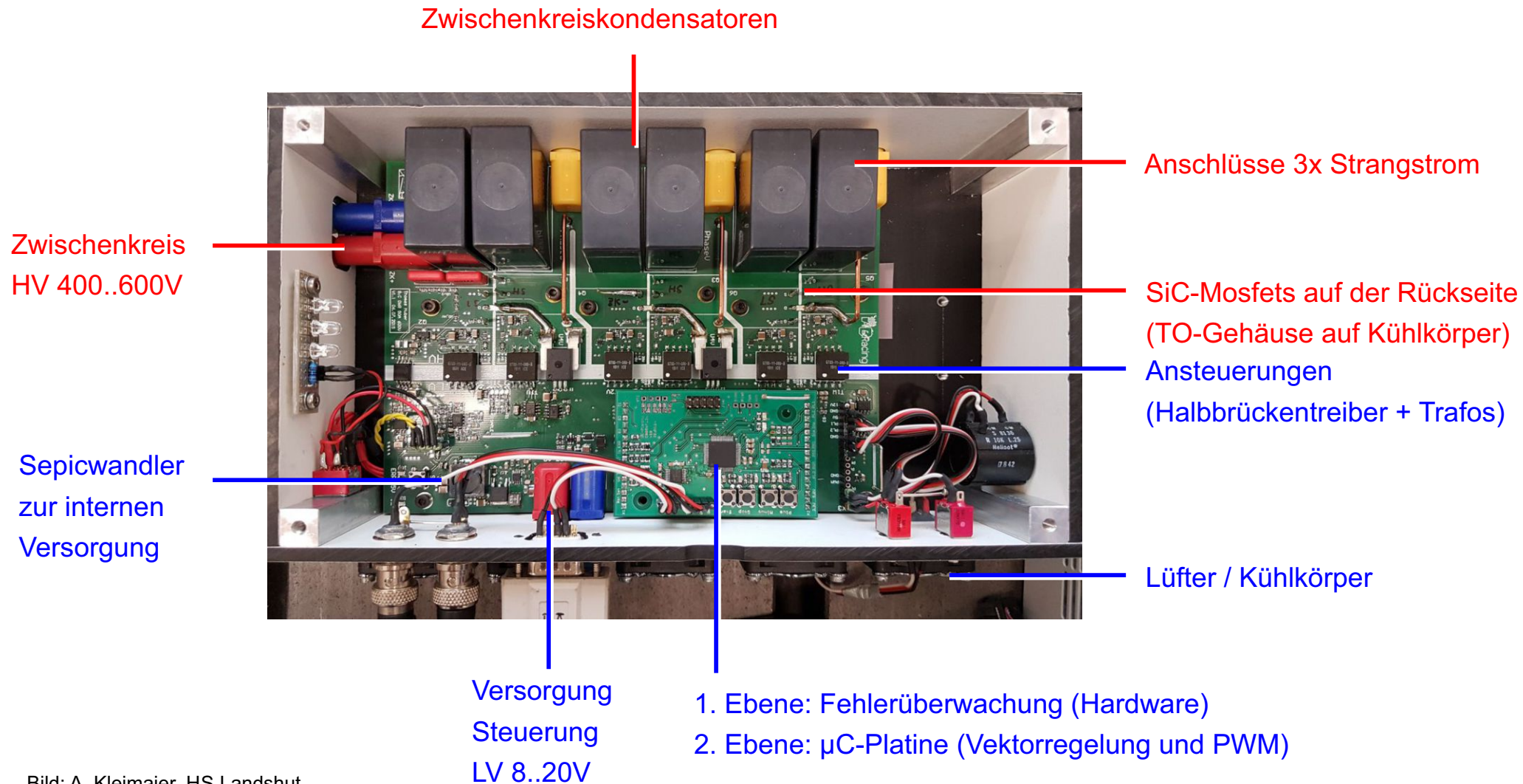


Bild: A. Kleimaier, HS Landshut

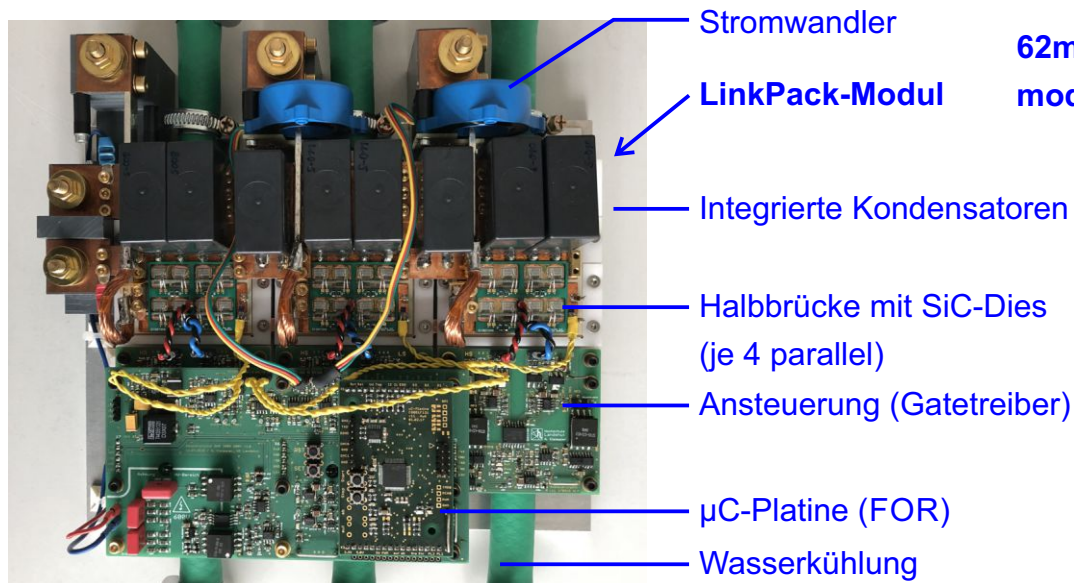
10a.5 Ausführungsbeispiele

HS Landshut, Forschungsprojekt LinkPack: Drehstromwechselrichter 600V DC 140A

- Seit den 1990er Jahren werden IGBTs als Halbleiterventile in Hochvolt-Wechselrichtern verwendet.
- Die neuen Wide-Bandgap-Halbleiter (SiC-Mosfets, GaN-HEMTs) ermöglichen jedoch höhere Taktfrequenzen bei gleichzeitig sehr viel geringeren Schaltverlusten. Ggf. steht hier ein Umbruch in der Leistungselektronik bevor.
- aber: man benötigt eine sehr niederinduktive Aufbautechnik, um diese guten Eigenschaften nutzen zu können

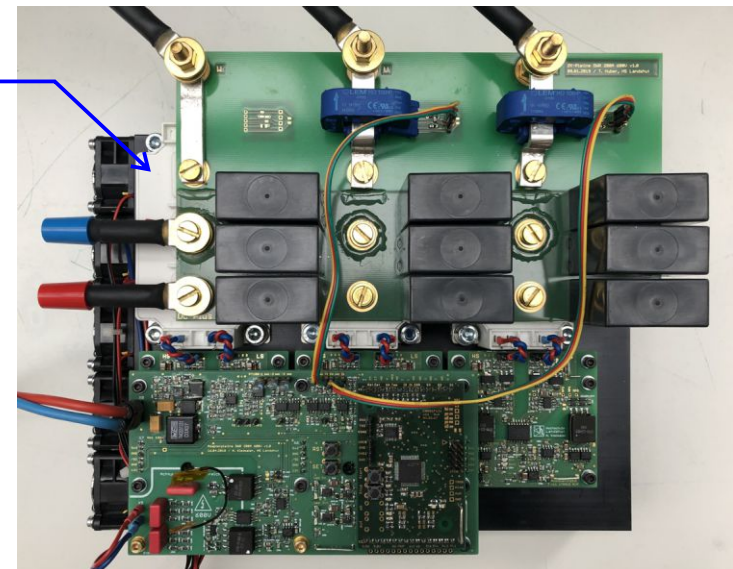
Variante 1

- selbstentwickelte SiC-Leistungsmodule mit integrierten Zwischenkreiskondensatoren
- Kommutierungskreisinduktivität nur 1,2 nH
- Schaltfrequenz bis 100 kHz



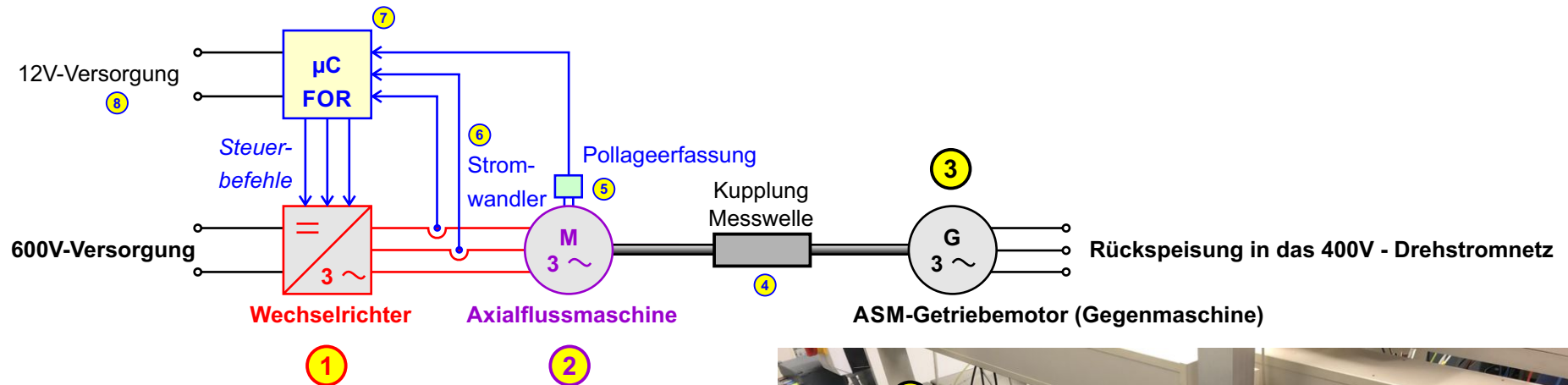
Variante 2

- SiC-Standardmodule der Fa. Wolfspeed mit aufgeschraubter Zwischenkreisplatte
- Referenzmessungen für LinkPack-Module
- Wechselrichter für unsere Axialflussmaschinen



10a.5 Ausführungsbeispiele

HS Landshut, Prüfstand Axialflussmaschine



SiC-Wechselrichter (Variante 2) im Einsatz am Prüfstand in F025.

- komplettes Drehstromantriebssystem
- Betrieb und Vermessung der Axialflussmaschine (Bild ohne Sicherheits-Abdeckungen)
- Forschungsprojekt: Ines Selma

Bild: A. Kleimaier, HS Landshut

