

Vorlesung Elektrische Maschinen und Stromrichter

SS2018

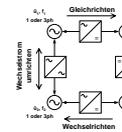
Elektrotechnisches Institut (ETI) – Leistungselektronische Systeme



www.kit.edu

Vorlesungsinhalte

- Kapitel 1 Vorbemerkung
- Kapitel 2: Einleitung
- Kapitel 3: Magnetische Kräfte und Induktion
- Kapitel 4: Gleichstrommaschine
- Kapitel 5: Schrittmotor
- Kapitel 6: Drehstromsynchronmaschine
- Kapitel 7: Asynchronmaschine
- Kapitel 8: Transformator
- Kapitel 9: Leistungshalbleiter**
- Kapitel 10: Stromrichter
- Kapitel 11: Netzgeführte Stromrichter
- Kapitel 12: Selbstgeführte Stromrichter
- Kapitel 13: Elektrische Antriebe



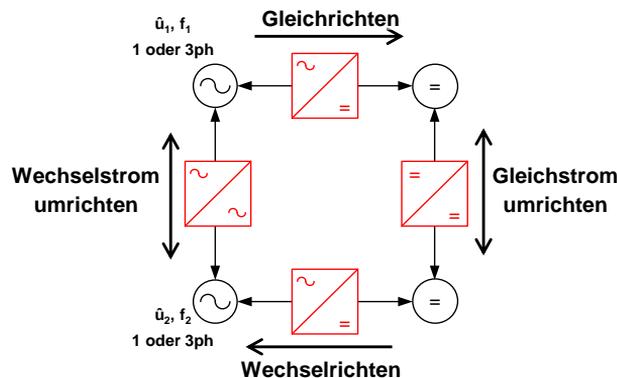
9. Leistungshalbleiter – Definition Leistungselektronik

Leistungselektronik ist das Teilgebiet der Elektrotechnik, das sich mit dem **Steuern** und **Umformen elektrischer Energie** mit Hilfe von **elektronischen Ventilen (Schaltern)** beschäftigt.



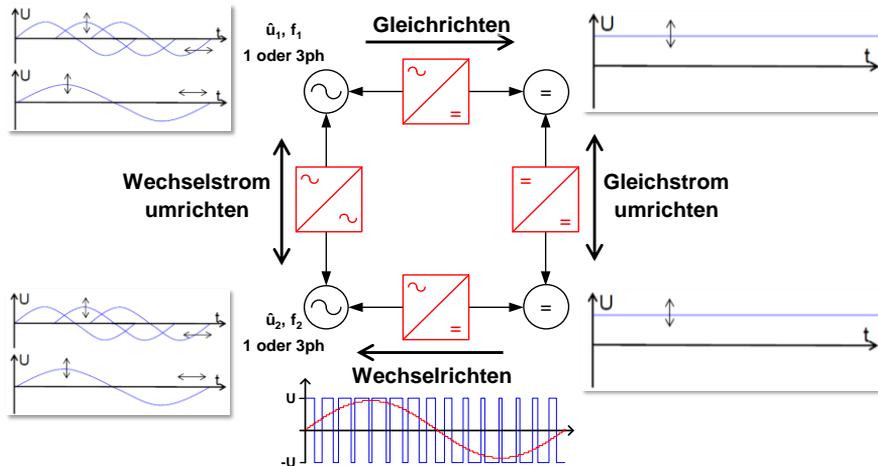
9. Leistungshalbleiter – Definition Leistungselektronik

Leistungselektronik ist das Teilgebiet der Elektrotechnik, das sich mit dem **Steuern** und **Umformen elektrischer Energie** mit Hilfe von **elektronischen Ventilen (Schaltern)** beschäftigt.



9. Leistungshalbleiter – Definition Leistungselektronik

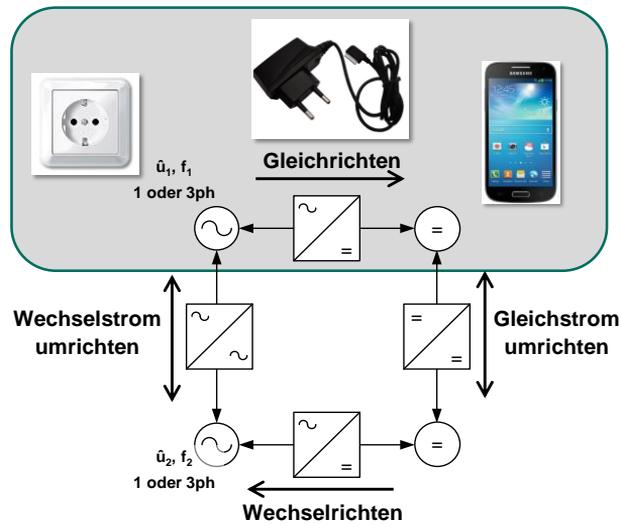
Leistungselektronik ist das Teilgebiet der Elektrotechnik, das sich mit dem **Steuern und Umformen elektrischer Energie** mit Hilfe von **elektronischen Ventilen (Schaltern)** beschäftigt.



9. Leistungshalbleiter – Definition Leistungselektronik

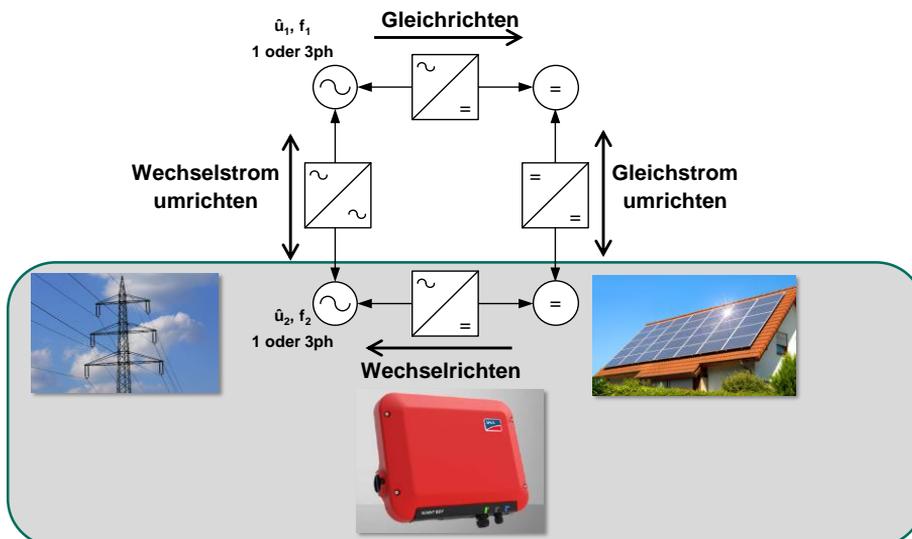
- **Leistungselektronik** ist eine **Basistechnologie der Energie – und Automatisierungstechnik** die sich permanent **neue Applikationen** erschließt
- **Deutschland** ist speziell auf dem Gebiet der **Leistungselektronik** im mittleren und hohen Leistungsbereich führend.

9. Leistungshalbleiter – Anwendungen Leistungselektronik



Quelle: Samsung

9. Leistungshalbleiter – Anwendungen Leistungselektronik



Quelle: SMA

9. Leistungshalbleiter – Leistungsbereiche in der Leistungselektronik

- 1W: Netzteil LED
- 10W: Netzteil Smartphone
- 100W: Netzteil Notebook
- 1.000W: kleines Induktionskochfeld (9W/cm²)
- 10.000W: Solar-Wechselrichter für 80-100 m² Dachfläche
- 100.000W: Antrieb eines Elektrofahrzeugs (136PS)
- 1.000.000W: gesamte Antriebsleistung einer S-Bahn
- 10.000.000W: gesamte Antriebsleistung eines ICE oder Offshore-Windenergieanlage
- 100.000.000W: elektrisch angetriebene Kompressoren für die Erdgasverflüssigung (LNG)
- 1.000.000.000W: Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ)
- 10.000.000.000W: HGÜ in China
- 100.000.000.000W: *installierte Leistung des gesamten konventionellen Kraftwerkparks in Deutschland*



9. Leistungshalbleiter – Anwendungen Leistungselektronik

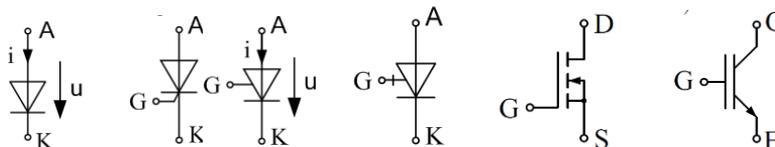
- Elektrische Antriebe
 - Industrieantriebe
 - Traktion (Elektrofahrzeuge, Bahnen)
- Einspeisung verteilter und regenerativer Energiequellen
 - Windenergie, Photovoltaik
 - Brennstoffzellen (z.B. P=1kW-500kW)
- Energieverteilung
 - Hochspannungsgleichstromübertragung HGÜ, Netzkupplungen
 - Power Quality (Blindleistungskompensation, Aktive Filter)
- Stromversorgungen (AC/AC – AC/DC – DC/DC – Wandler), z.B.
 - Netzteile, Vorschaltgeräte
 - Bordnetze, Hilfsbetriebe (z.B. Bahntechnik, Automobiltechnik)
 - USV
- Kopplung von Energiespeichern mit dem Netz
 - Batterien, Doppelschichtkondensatoren („Supercaps“)
 - Schwungradspeicher
 - H₂ - Speicher



9. Leistungshalbleiter – Überblick



A: Anode
 K: Kathode (C)
 G: Gate
 D: Drain
 S: Source
 E: Emitter



9. Leistungshalbleiter – Idealisierung der Leistungshalbleiterbauelemente

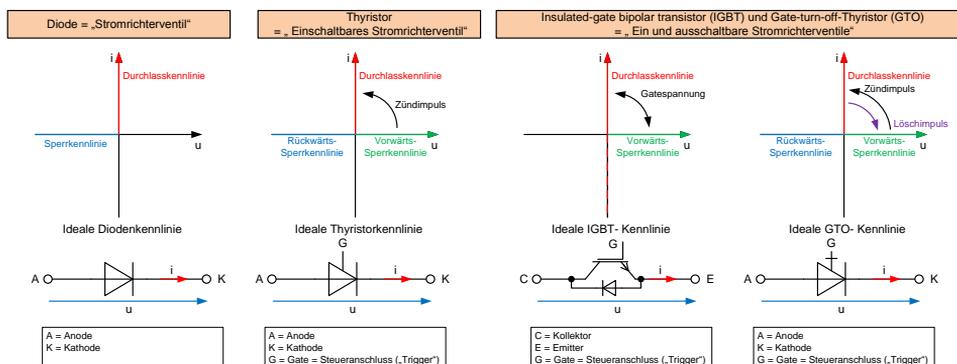
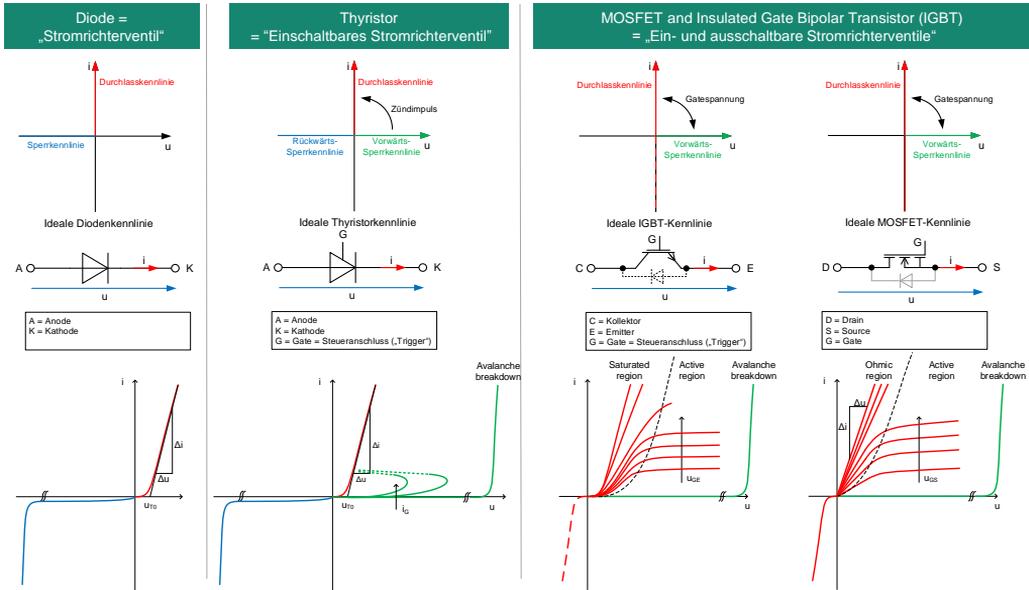


Abbildung 3: Ideale Kennlinien der Diode, des Thyristors, des IGBT-Transistors und des GTO-Thyristors (bzw. IGCT)

9. Leistungshalbleiter – Idealisierung der Leistungshalbleiterbauelemente



9. Leistungshalbleiter – Überblick

Kategorie	Eigenschaften			
Gehäusebauform	Nicht isoliertes, diskretes Gehäuse	Isoliertes, diskretes Gehäuse	Modul (i.d.R. isoliert)	Press Pack (nicht isoliert)
Schalteigenschaften	Nicht schaltbar	Nur einschaltbar	Ein- und abschaltbar	
Einstellung der Schaltgeschwindigkeit	Durch externen Stromkreis vorgegeben	Nicht steuerbar	Steuerbar	
Gate-Eingriff	Stromgesteuertes Bauelement	Spannungsgesteuertes Bauelement		
Mögliche Polaritäten von Strom und Spannung am Bauelement	Vorwärts blockierfähig, Strom unidirektional	Vorwärts blockierfähig, Strom bidirektional	Vorwärts blockier- und rückwärts sperrfähig, Strom unidirektional	Vorwärts blockier- und rückwärts sperrfähig, Strom bidirektional
Ladungsträger	Unipolar	Bipolar		

Auch wichtig: Belastung der Leistungshalbleiter

Verluste	Durchlassverluste	Schaltverluste (f_s)	Sperrverluste	
Blockier-/Sperrspannung	Dauerhaft anliegende Sperrspannung (U_d i.d.R. 50-60% der max. Sperrspg. V_{CES})	Spannungstransienten während der Schalthandlung (i.d.R. max. 80-90% der max. Sperrspg. V_{CES})		
Spannungstransienten	(Über)spannung	Geschalteter Strom (z.B. bei GTO, IGCT, IGBT, MOSFET)	Spannungsteilheit du/dt (z.B. bei GTO)	Stromteilheit di/dt (z.B. bei Thyristor, IGCT, Reverse Recovery bei Dioden)
Umgebungsbedingungen	Maximale Chip-Temperatur	Mechanische Belastung	Feuchtigkeit	

9. Leistungshalbleiter – Überblick (engl.)

Category	Properties			
Package	non isolated discrete package	isolated discrete package	Module (isolated)	Press Pack (non isolated)
Switching properties	non switching	only turn on capability	turn on/off capability	
Control of transient switching speed	given by external circuit	not controllable	Controllable	
Gate control characteristic	current controlled device	voltage controlled device		
Possible polarity of voltage and current	Forward blocking, Current unidirectional	Forward blocking, Current bidirectional	Forward and reverse blocking, Current unidirectional	Forward and reverse blocking, Current bidirectional
Charge carriers	Unipolar	Bipolar		

Also to be considered: stress limits

Losses	On-state (conduction) losses	Switching losses (f_s)	Blocking losses	
Blocking voltage	Continuous blocking voltage (V_d usually 50-60% of max. blocking volt. V_{CES})	Voltage transients during switching (usually max. 80-90% of max. blocking volt. V_{CES})		
Switching transients	(Over)voltage	Switching current (e.g. for bei GTO, IGBT, IGBT, MOSFET)	Voltage slope dv/dt (e.g. for GTO)	Current slope di/dt (e.g. for Thyristor, IGCT, Reverse Recovery for Diodes)
Ambient conditions	Maximum junction temperature	Mechanical stress	Humidity	

9. Leistungshalbleiter – Reale Bauelemente – IGCT



85mm (4.5 kV, 5kA) IGCT (ABB)

RC-IGCT (ABB)

Asymmetrische IGCTs

- U_{DRM} : 4.5 kV, 5.5 kV, 6.5 kV / SS: 3 – 27 MVA
- 68mm 10 kV Muster / SS: 7 MVA

Symmetrische IGCTs: 6.5 kV / S_G : 2.5 – 10 MVA

Hauptanwendungen

- MV-Stromrichter mittlerer/großer Leistung (5-40MW) (z.B. 3L-(A)NPC, CSI)
- MV-Industrieantriebe, Bahnnetzgekuppungen

Eigenschaften

1. Benötigt Clamp- und di/dt -Einschaltentlastung
 2. Hohe Ausnutzung der Si-Fläche bei kleinen Schaltfrequenzen f_s
 3. Hohe Leistung der Ansteuerung (max. 100W)
 4. Zuverlässigkeit durch Ansteuerung begrenzt
 5. Serien- und Parallelschaltung aufwändig
 6. Press Pack:
 - Kurzschluss bei Fehler
- Hohe Belastung für Motor, Welle und Getriebe
- Keine Explosion des Gehäuses
 - Aufwändiger Spannverband für Kontaktierung und Kühlung
 - Hohe Lastwechselfestigkeit
7. Nur ein Hersteller weltweit: ABB

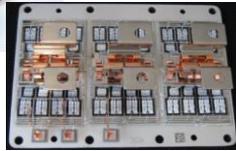
Perspektive

- Eingeführte Technologie, begrenztes Potenzial
- Trends: Erhöhung der Sperrschichttemperatur auf 150°C, Verbesserung der Rückwärtsleitenden RC-IGCTs

9. Leistungshalbleiter – Reale Bauelemente – IGBT-Modul



(6.5 kV, 400 A)
IGBT Module
(Infineon)



(3.3 kV, 1500 A) IGBT
Module (Infineon)

- U_{CE} : 1.2kV, 1.7kV, 3.3 kV, 4.5 kV, 6.5 kV
- S_S : 1.5 MVA – 11 MVA

Hauptanwendungen

- Stromrichter in allen Leistungsbereichen (z.B. 2L-VSC, 3L-NPC-VSC, ML-VSC)
- Industrie, Traktion, Netzanwendungen (z.B. HGÜ)

Eigenschaften

1. Produkte von vielen Herstellern verfügbar
2. In Einzelschaltung ist keine Beschaltung notwendig
3. Stetig steigende Ausnutzung der Si-Fläche bei kleinen Schaltfrequenzen f_s /
Hohe Ausnutzung bei großen Schaltfrequenzen f_s
3. Kleine Leistung der Ansteuerung (max. 5W)
4. Zuverlässigkeit durch den mechanischen Aufbau beschränkt
5. Einfache Serien- und Parallelschaltung
6. Modulbauform:
 - Explosion des Gehäuses in (seltenen) Fehlerfällen
 - Einfacher Aufbau auf Kühlplatte
 - Beschränkte Lastwechselfestigkeit (angepasst an die Applikation)

Perspektiven

- Stetige Weiterentwicklung der Chips (Verlustreduzierung, Erhöhung der Stromdichte), sowie der Aufbau- und Verbindungstechnik (höhere Sperrschichttemperaturen, verbesserte Lastwechselfestigkeit)
- Großer Marktanteil → "Market pull"

9. Leistungshalbleiter – Reale Bauelemente – Press Pack-IGBT



85mm (4.5 kV,
1.2 kA) PP
IGBT
(Westcode)



- U_{CE} : 2.5 kV, 4.5 kV
- S_S : 0.5 MVA – 21.5 MVA

Hauptanwendungen

- MV-Stromrichter mittlerer/großer Leistung (5-40MW) (z.B. 2L-VSC, 3L-NPC)
- MV-Industrieantriebe, Bahnnetzakupplungen und HGÜ-Anwendungen

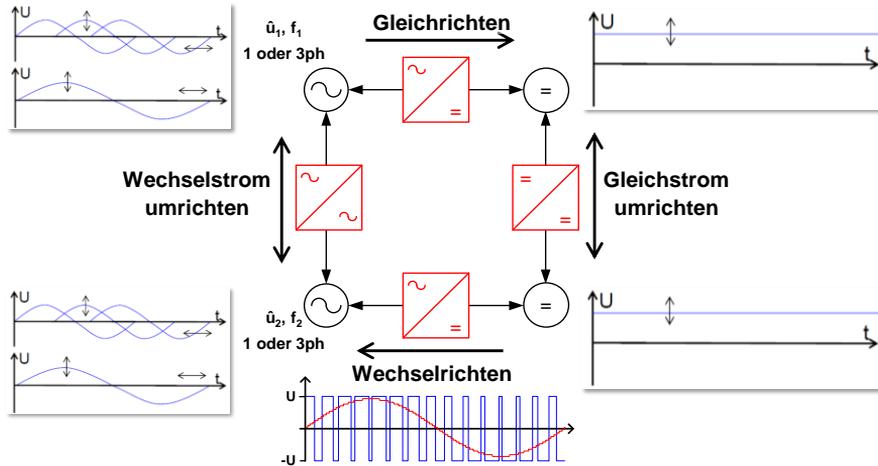
Eigenschaften

1. Produkte nur von wenigen Herstellern verfügbar (Toshiba, ABB)
2. In Einzelschaltung ist keine Beschaltung notwendig
3. Stetig steigende Ausnutzung der Si-Fläche bei kleinen Schaltfrequenzen f_s /
Hohe Ausnutzung bei großen Schaltfrequenzen f_s
3. Kleine Leistung der Ansteuerung (max. 5W)
4. Zuverlässigkeit durch den mechanischen Aufbau beschränkt
5. Einfache Serien- und Parallelschaltung im Vergleich zu IGBTs
6. Press pack:
 - Kurzschluss bei Fehler (gut für Reihenschaltung)
 - Meist keine Explosion des Gehäuses
 - Aufwändiger Spannverband für Kontaktierung und Kühlung
 - Hohe Lastwechselfestigkeit

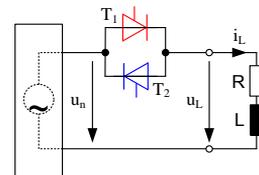
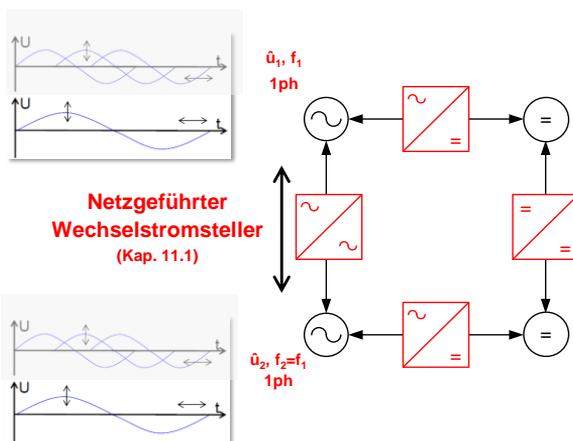
Perspektiven

- Stetige Weiterentwicklung der Chips (Verlustreduzierung, Erhöhung der Stromdichte)
- Verbesserung des Gehäuses möglich, aber teuer
- Spezialanwendungen → Begrenzter "Market pull"

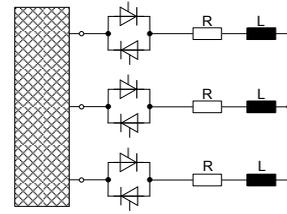
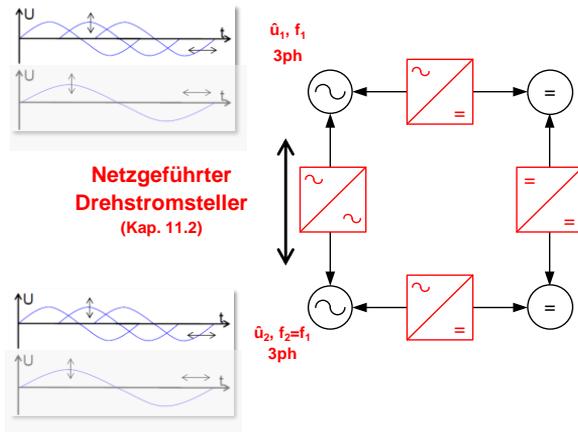
10. Stromrichter



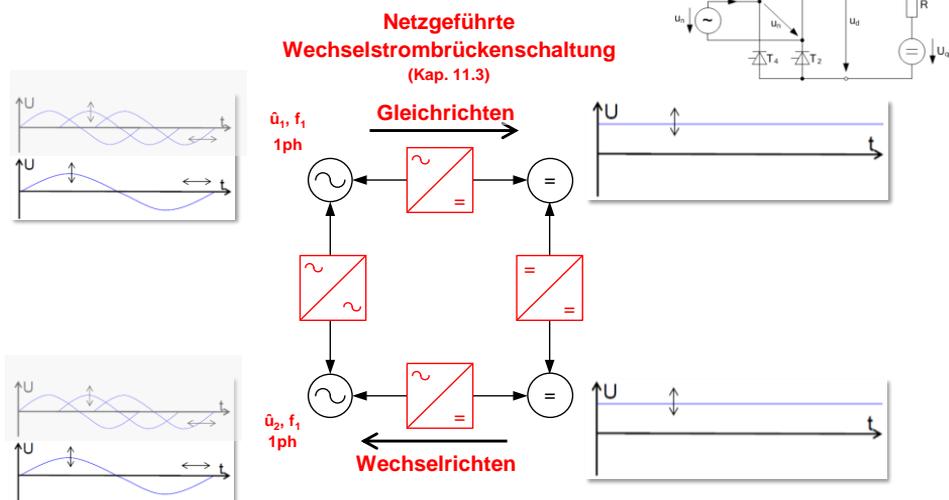
10. Stromrichter – Netzgeführte Stromrichter I



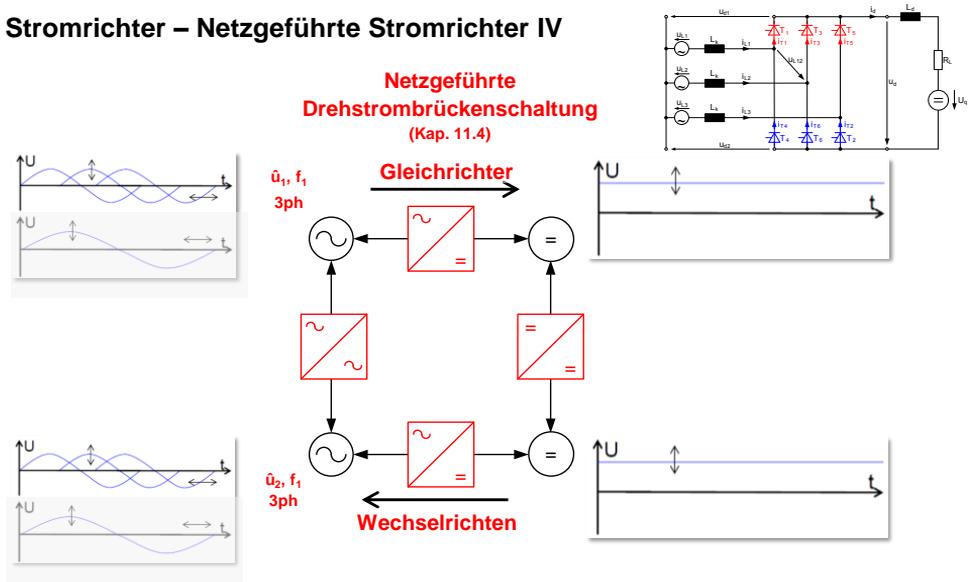
10. Stromrichter – Netzgeführte Stromrichter II



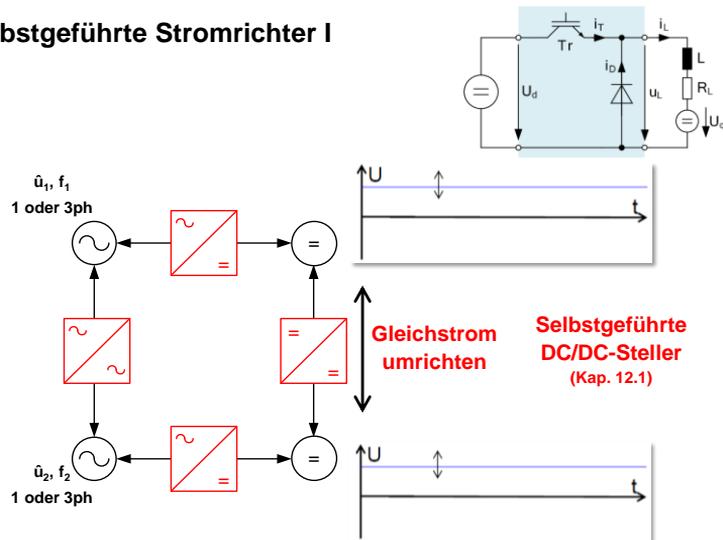
10. Stromrichter – Netzgeführte Stromrichter III



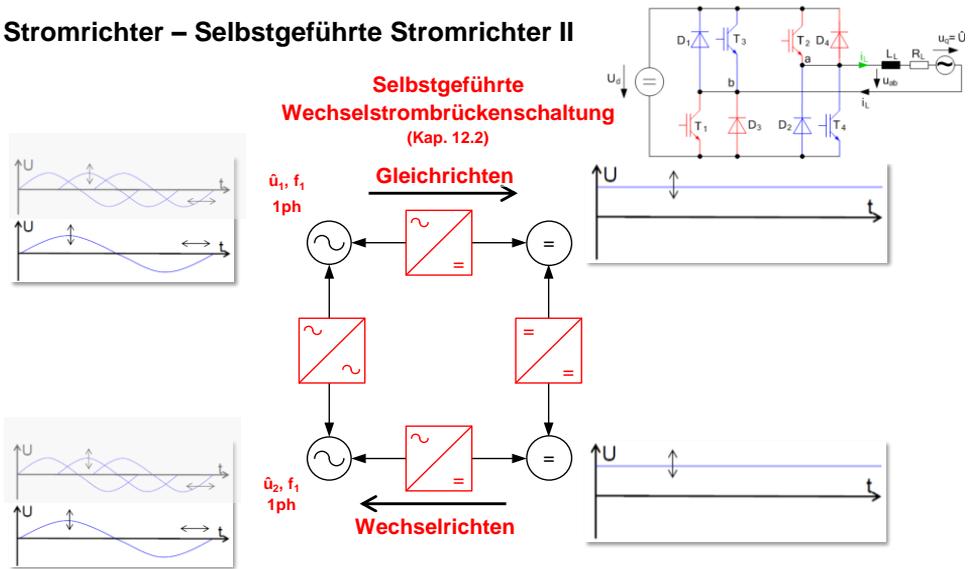
10. Stromrichter – Netzgeführte Stromrichter IV



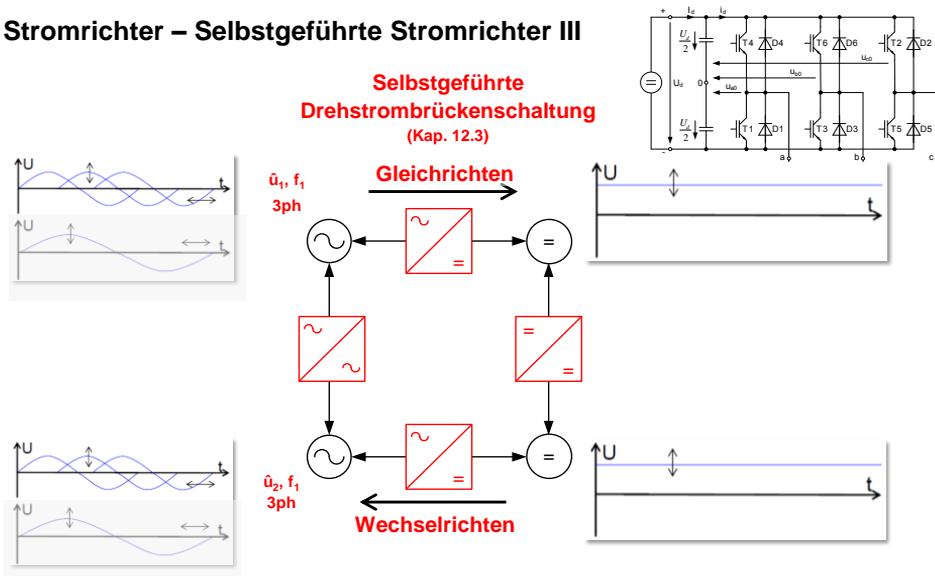
10. Stromrichter – Selbstgeführte Stromrichter I



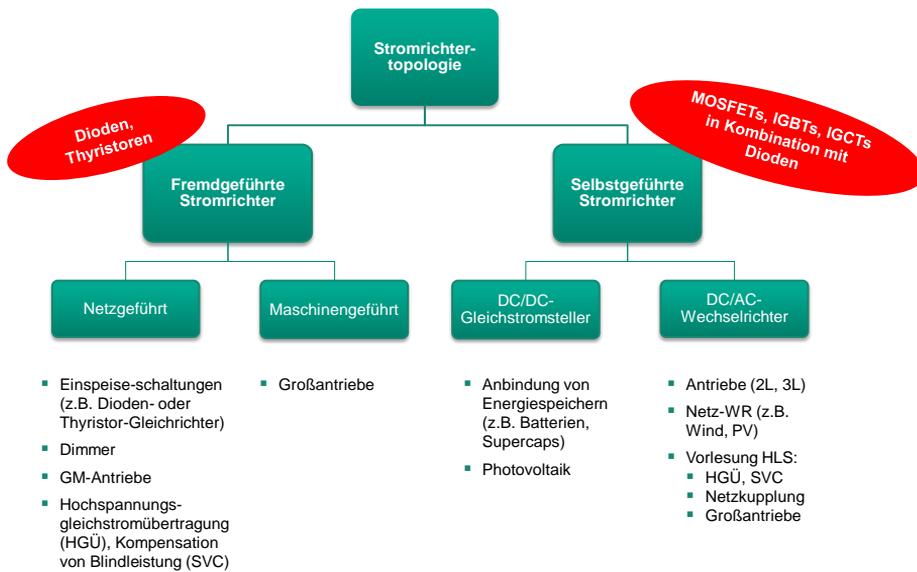
10. Stromrichter – Selbstgeführte Stromrichter II



10. Stromrichter – Selbstgeführte Stromrichter III



10. Stromrichter – Übersicht



10. Stromrichter – Zusammenfassung

Fremdgeführte Stromrichter

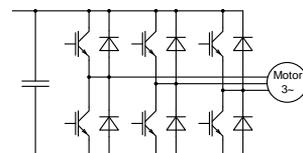
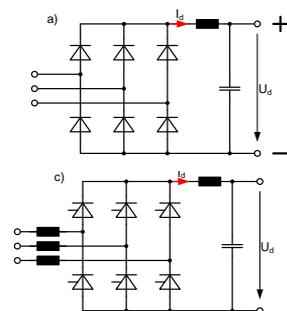
- Stromrichter, die nur passive Kommutierungen ermöglichen,
 - sind auf Wechselfspannung in der Quelle angewiesen,
 - kommen mit **nicht schaltbaren Leistungshalbleitern** aus.
-
- Stromrichter, die nur induktive Kommutierungen ermöglichen,
 - sind auf Wechselfspannung in der Quelle (oder der Last) angewiesen,
 - kommen mit **Leistungshalbleitern aus, die nur einschaltbar sind**.

theoretisch auch (praktisch jedoch irrelevant):

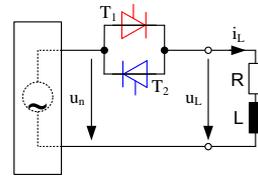
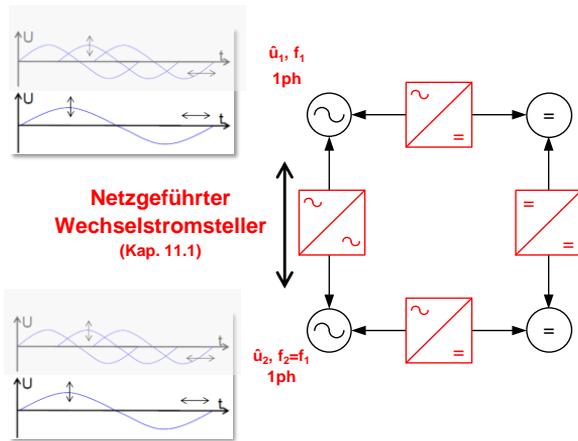
- Stromrichter, die nur kapazitive Kommutierungen ermöglichen
- sind auf Wechselstrom in der Quelle oder der Last angewiesen
- kommen mit Leistungshalbleitern aus, die nur abschaltbar sind

Selbstgeführte Stromrichter

- Stromrichter, die induktive und kapazitive Kommutierungen ermöglichen,
- Ein- und abschaltbare Leistungshalbleiter** erforderlich.



11.1 Wechselstromsteller 1AC – 1AC



11.1 Wechselstromsteller 1AC – 1AC

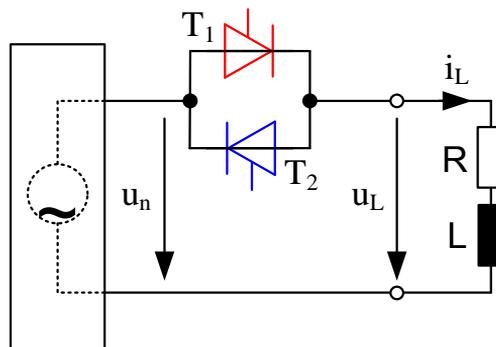


Abbildung 74a)

11.1 Wechselstromsteller 1AC – 1AC

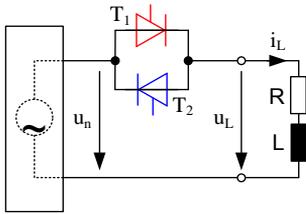


Abbildung 74a)

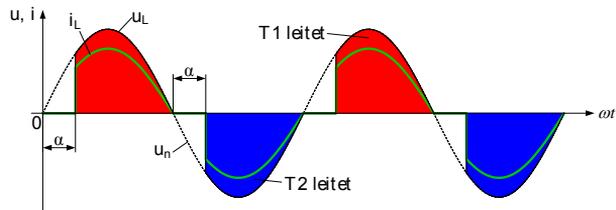


Abbildung 74b)
Wechselstromsteller bei ohm'scher Last

11.1 Wechselstromsteller 1AC – 1AC

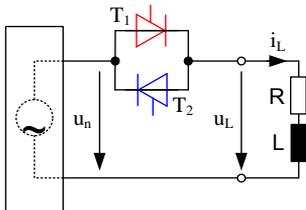


Abbildung 74a)

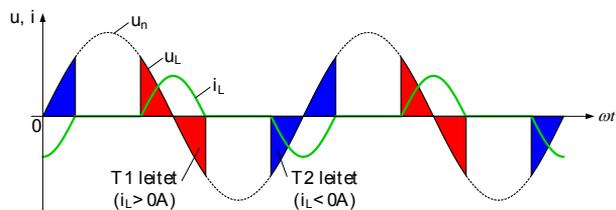


Abbildung 74c)
Wechselstromsteller bei induktiver Last

11.1 Wechselstromsteller 1AC – 1AC

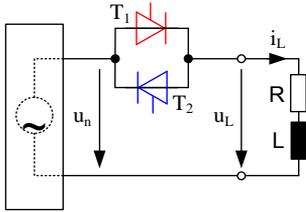


Abbildung 74a)

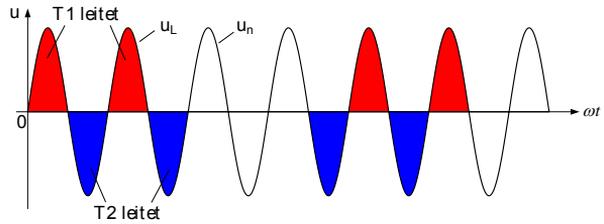
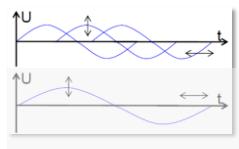
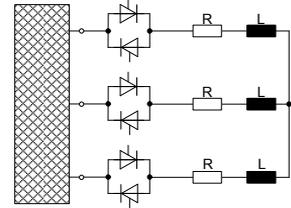
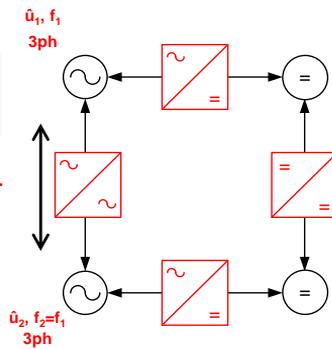
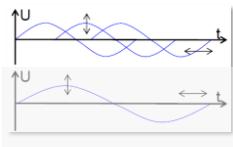


Abbildung 74d)
Wechselstromsteller bei Schwingungspaketsteuerung
mit ohm'scher Last

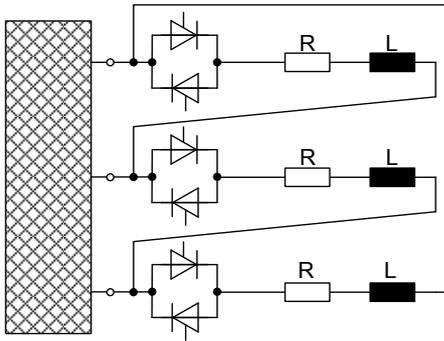
11.2 Drehstromsteller 3AC – 3AC



Netzgeführter
Drehstromsteller
(Kap. 11.2)



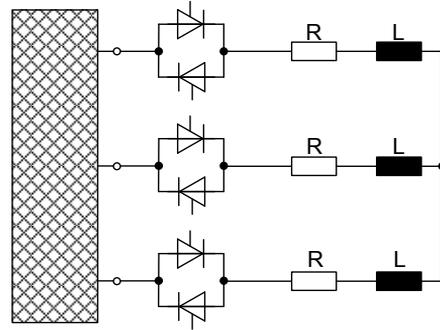
11.2 Drehstromsteller 3AC – 3AC



$$L=0: 0^\circ < \alpha \leq 180^\circ$$

$$R=0: 90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$$

Abbildung 75a):
Drehstromsteller in Dreieckschaltung

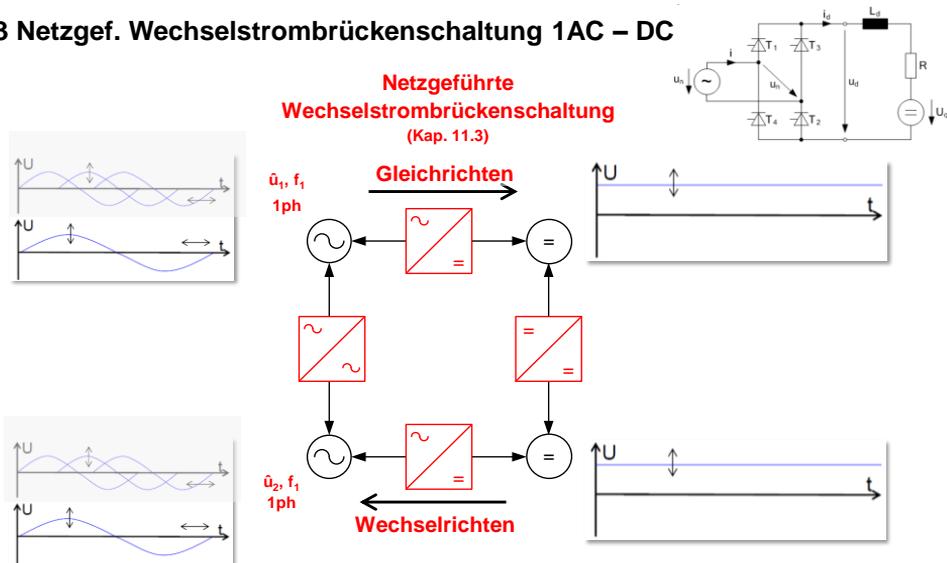


$$L=0: 0^\circ < \alpha \leq 150^\circ$$

$$R=0: 90^\circ < \alpha \leq 150^\circ$$

Abbildung 75b):
Drehstromsteller in Sternschaltung ohne
Sternpunktanschluss

11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC



11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC

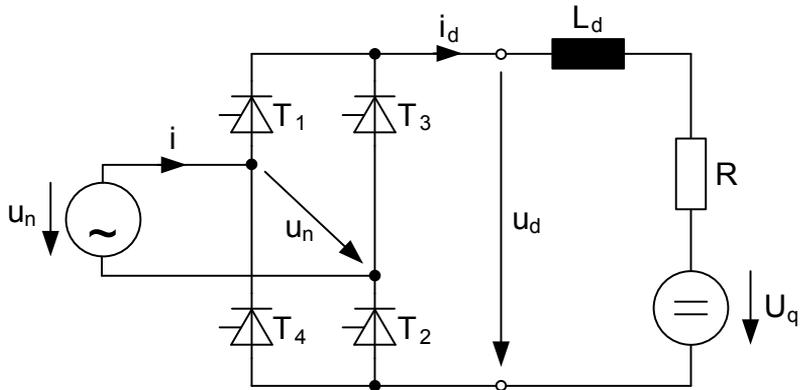


Abbildung 76a):
Netzgeführte Wechselstrombrückenschaltung

11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC

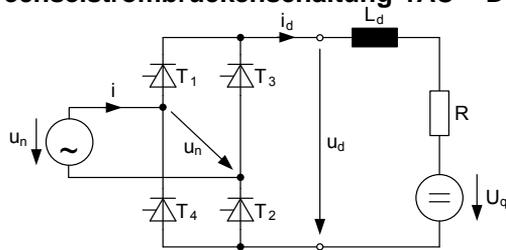


Abbildung 76a):
Netzgeführte
Wechselstrombrücken-
schaltung

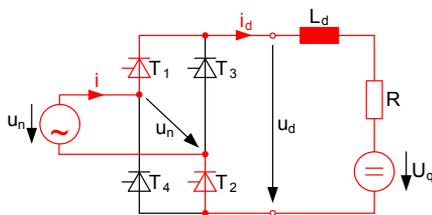


Abbildung 76b):
Stromfluss durch T1 und T2

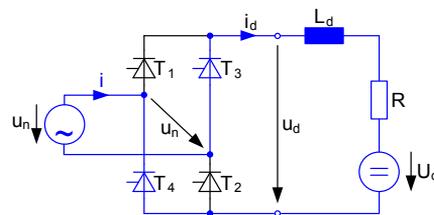
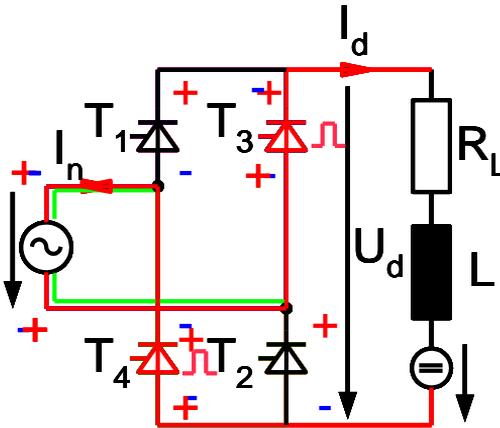


Abbildung 76c):
Stromfluss durch T3 und T4

11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC



11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC

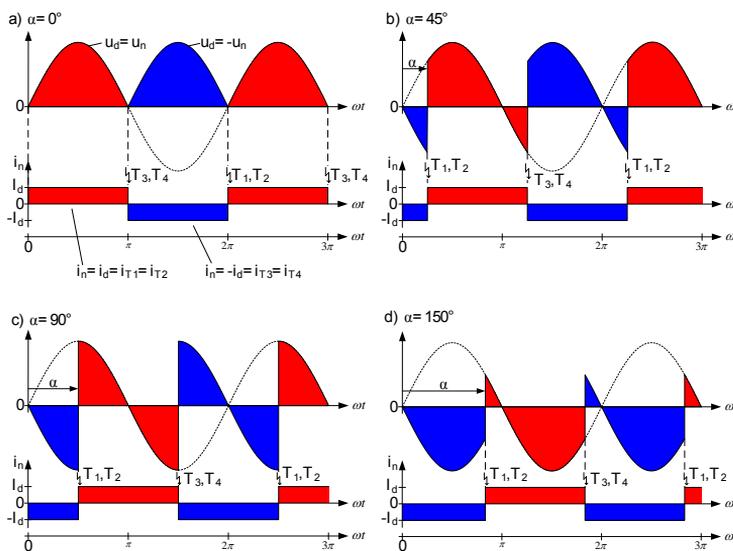


Abbildung 77: Ungeglättete Ausgangsspannung $u_d(t)$ und Netzstrom $i_n(t)$ bei der Wechselstrom-brückenschaltung mit verschiedenen Steuerwinkeln

11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC

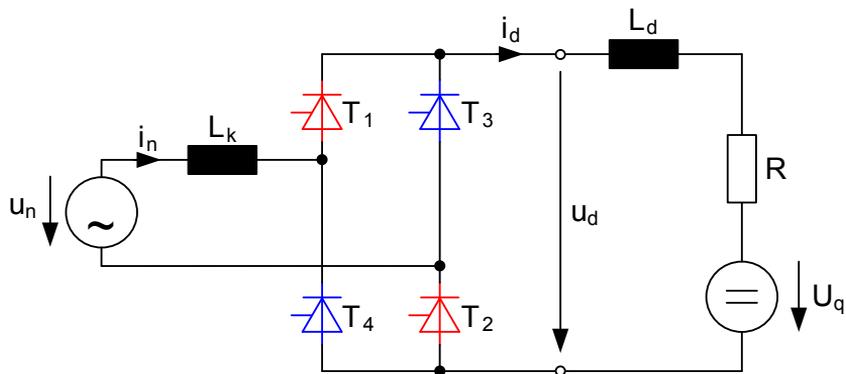


Abbildung 78: Schaltbild der netzgeführten Wechselstrombrückenschaltung mit $L_k > 0$

11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC

a) $\alpha = 45^\circ$

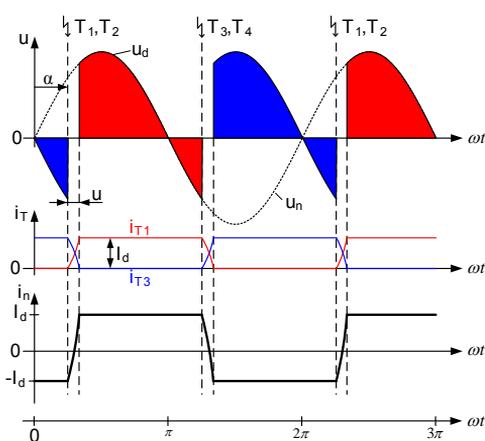


Abbildung 79a):
Ströme und Spannungen für $\alpha = 45^\circ$, $u = 20^\circ$

b) $\alpha = 150^\circ$

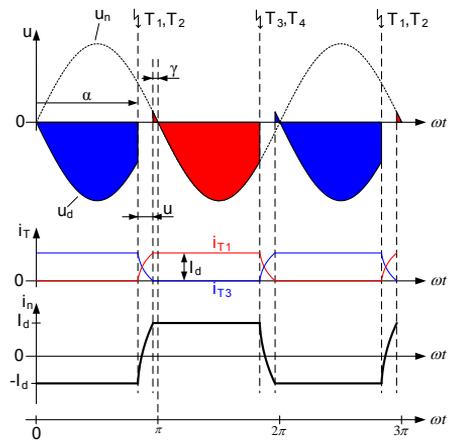


Abbildung 79b):
Ströme und Spannungen für $\alpha = 150^\circ$, $u = 20^\circ$

11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC

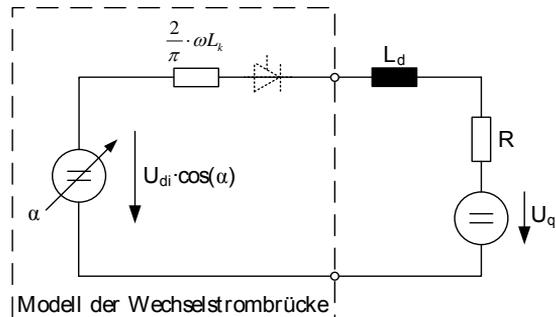


Abbildung 80:
Mittelwert-Modell für das ausgangsseitige Verhalten der netzgeführten Wechselstrombrückenschaltung mit Glättungsdrossel und Gegenspannung

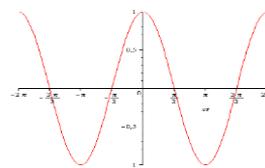
11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC

Fourieranalyse - Symmetrieeigenschaften

1. Achsen-/Spiegelsymmetrie (gerade Funktion)

$$f(\omega t) = f(-\omega t) \rightarrow b_k = 0 \quad (k = 1, 2, 3 \dots)$$

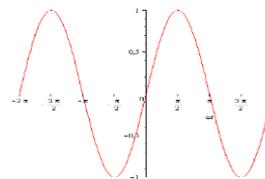
$$a_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) \cos(k\omega t) d\omega t \quad k = (1, 2, 3, \dots)$$



2. Punktsymmetrie (ungerade Funktion)

$$f(\omega t) = -f(-\omega t) \rightarrow a_k = 0 \quad (k = 1, 2, 3 \dots)$$

$$b_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) \sin(k\omega t) d\omega t \quad k = (1, 2, 3, \dots)$$



11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC

3. Wechselsymmetrie

$$f(\omega t + \pi) = -f(\omega t) \rightarrow a_{2k} = 0 \quad (k = 1, 2, 3 \dots)$$

$$b_{2k} = 0$$

$$a_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) \cos(k\omega t) d\omega t \quad b_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) \sin(k\omega t) d\omega t \quad k = (1, 2, 3, \dots)$$

4. „Viertelschwingungssymmetrie“ (häufig verwendet)

4.1 Kombination aus Punkt- und Wechselsymmetrie

$$\left. \begin{array}{l} f(\omega t + \pi) = -f(\omega t) \\ f(\omega t) = -f(-\omega t) \end{array} \right\} \rightarrow a_k = 0; \quad b_{2k} = 0; \quad b_{2k-1} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} f(\omega t) \sin((2k-1)\omega t) d\omega t$$

für $k = (1, 2, 3, \dots)$

4.2 Kombination aus Achsen- und Wechselsymmetrie

$$\left. \begin{array}{l} f(\omega t + \pi) = -f(\omega t) \\ f(\omega t) = f(-\omega t) \end{array} \right\} \rightarrow b_k = 0; \quad a_{2k} = 0; \quad a_{2k-1} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} f(\omega t) \cos((2k-1)\omega t) d\omega t$$

für $k = (1, 2, 3, \dots)$

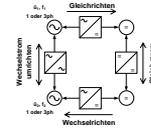
Zeitplan

Vorlesung: Mittwoch, 08.00 – 09.30 Uhr im MTI-Hörsaal
Übung: Dienstag, 11.30 – 13.00 Uhr im Benz-Hörsaal

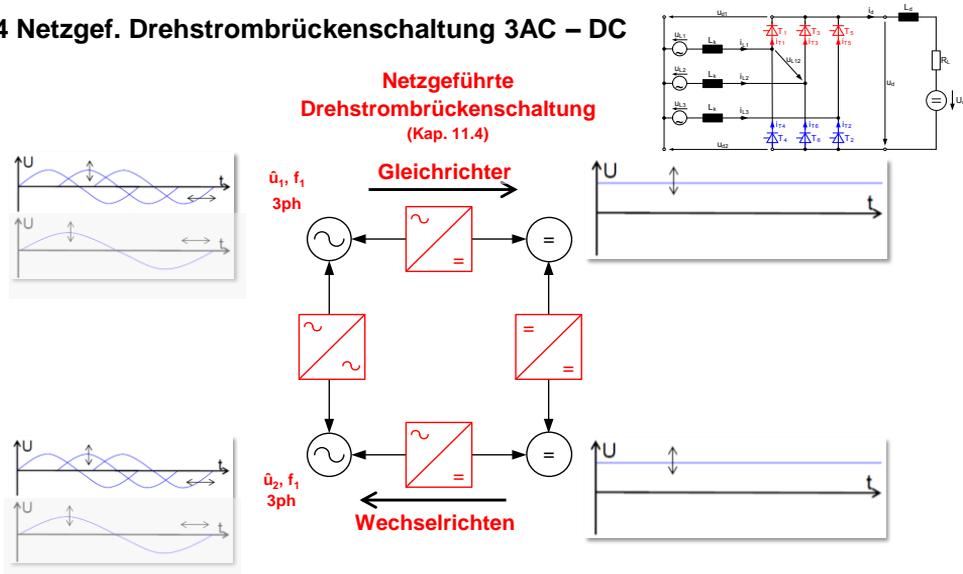
EMS 1	Dienstag, 17. April 2018	Mechanik, Kraftwirkung
EMS 2	Mittwoch, 18. April 2018	GM: Funktion, Verhalten, Fremderregung, Feldschwächung
Ü 1	Dienstag, 24. April 2018	
EMS 3	Mittwoch, 25. April 2018	Reihenschlussmotor, Schrittmotor, SM Funktion
	Dienstag, 1. Mai 2018	Feiertag
EMS 4	Mittwoch, 2. Mai 2018	Synchrongenerator, Kreisdiagramm
Ü 2	Dienstag, 8. Mai 2018	
EMS 5	Mittwoch, 9. Mai 2018	Synchronmotor, PSM, ASM: Aufbau, ESB, Kennlinien
Ü 3	Dienstag, 15. Mai 2018	
EMS 6	Mittwoch, 16. Mai 2018	ASM: Betriebsverhalten, Anlassverfahren, Drehzahlsteuerung
Ü 4	Dienstag, 22. Mai 2018	
EMS 7	Mittwoch, 23. Mai 2018	Transformator, Antriebssystem
Ü 5	Dienstag, 29. Mai 2018	
EMS 8	Mittwoch, 30. Mai 2018	Wechsel- und Drehstromsteller, Netzgef. Wechselstrombrückensch.
EMS 9	Dienstag, 5. Juni 2018	Netzgeführte DBS, 4QS, HGU
Ü 6	Mittwoch, 6. Juni 2018	
Ü 7	Dienstag, 12. Juni 2018	
EMS 10	Mittwoch, 13. Juni 2018	Tiefsetzsteller, Hochsetzsteller, 2QS
Ü 8	Dienstag, 19. Juni 2018	
Ü 9	Mittwoch, 20. Juni 2018	
EMS 11	Dienstag, 26. Juni 2018	4QS. Wechselstrombrückenschaltung, Zweigpaar
EMS 12	Mittwoch, 27. Juni 2018	Selbstgeführte DBS: Blocktaktung, Freilaufe, Raumzeigerdarstellung
Ü 10	Dienstag, 3. Juli 2018	
EMS 13	Mittwoch, 4. Juli 2018	Selbstgeführte DBS: RZM, 3L-NPC, 3L-TNPC, Mehrstufen-WR
Ü 11	Dienstag, 10. Juli 2018	
EMS 14	Mittwoch, 11. Juli 2018	Antriebssystem: Frequenzsteuerung, Feldorient., Drehzahlreg., HVDCplus
Ü 12	Dienstag, 17. Juli 2018	
Ü 13	Mittwoch, 18. Juli 2018	

Vorlesungsinhalte

- Kapitel 1 Vorbemerkung
- Kapitel 2: Einleitung
- Kapitel 3: Magnetische Kräfte und Induktion
- Kapitel 4: Gleichstrommaschine
- Kapitel 5: Schrittmotor
- Kapitel 6: Drehstromsynchronmaschine
- Kapitel 7: Asynchronmaschine
- Kapitel 8: Transformator
- Kapitel 9: Leistungshalbleiter
- Kapitel 10: Stromrichter
- Kapitel 11: Netzgeführte Stromrichter**
- Kapitel 12: Selbstgeführte Stromrichter
- Kapitel 13: Elektrische Antriebe



11.4 Netzgef. Drehstrombrückenschaltung 3AC – DC



11.4 Netzgef. Drehstrombrückenschaltung 3AC – DC

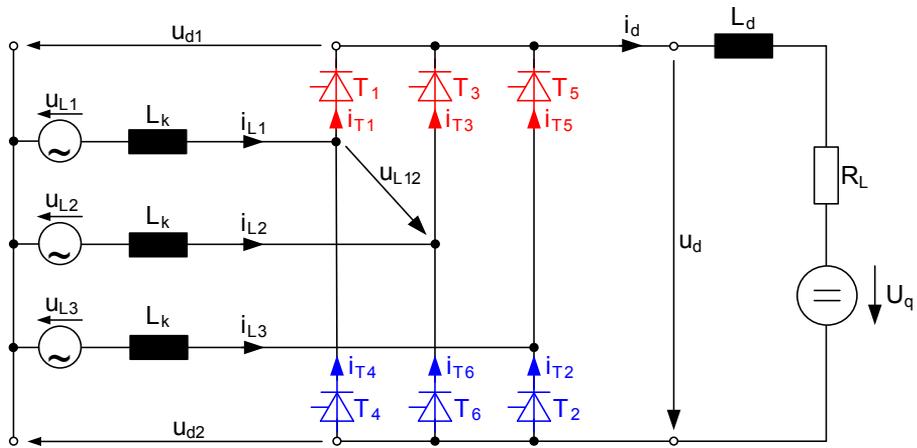
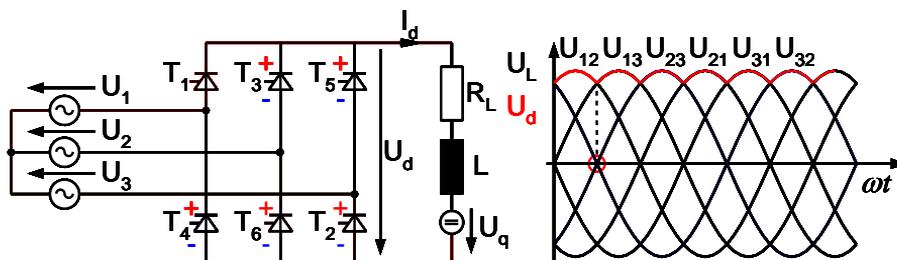


Abbildung 81:
Schaltbild der netzgeführten Drehstrombrückenschaltung mit
Kommütierungsinduktoren L_k und aktiver Last

11.4 Netzgef. Drehstrombrückenschaltung 3AC – DC

Annahmen:

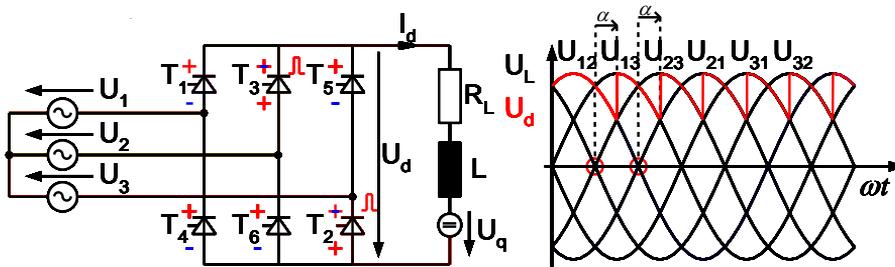
- $L \rightarrow \infty$, d.h. der Strom I_d ist ideal glatt
- Steuerwinkel $\alpha=0^\circ$ (wie Diodenbrücke)



11.4 Netzgef. Drehstrombrückenschaltung 3AC – DC

Annahmen:

- $L \rightarrow \infty$, d.h. der Strom I_d ist ideal glatt
- Steuerwinkel $\alpha=30^\circ$



11.4 Netzgef. Drehstrombrückenschaltung 3AC – DC

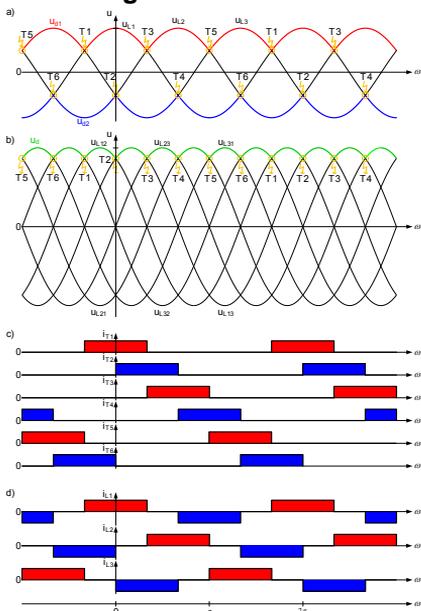


Abbildung 82:
Zeitverläufe der Sternspannungen,
Leiterspannungen, der Gleichspannung
 u_d , der Thyristorströme und Netzströme
der netzgeführten Drehstrombrücken-
schaltung für $L_k = 0$ und $\alpha = 0^\circ$

11.4 Netzgef. Drehstrombrückenschaltung 3AC – DC

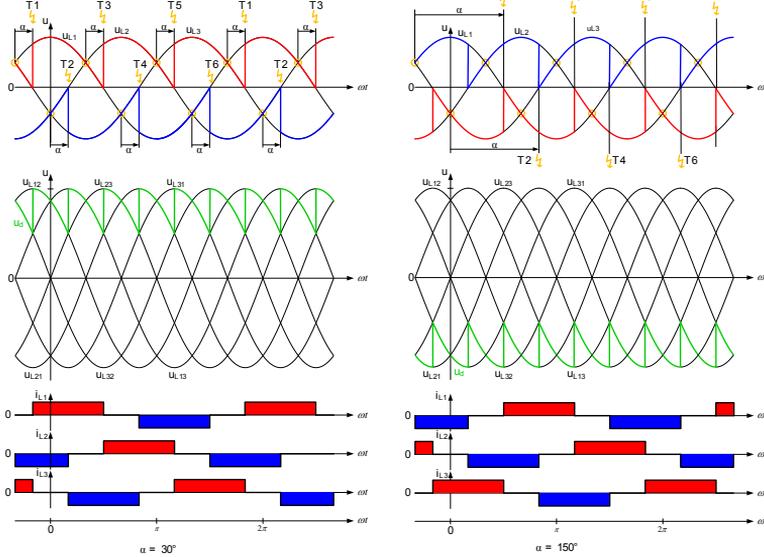


Abbildung 83: Zeitverläufe der Sternspannungen, Leiterspannungen, der Gleichspannung und der Netzströme der netzgeführten Drehstrombrückenschaltung bei $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 150^\circ$

11.4 Netzgef. Drehstrombrückenschaltung 3AC – DC

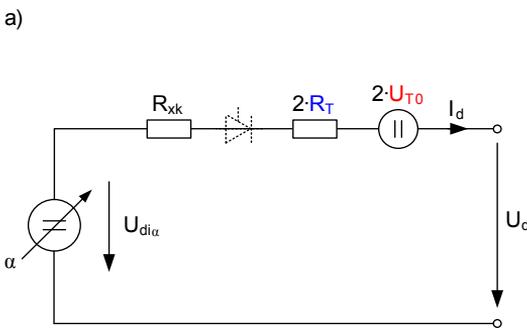


Abbildung 84a)
Modellierung der netzgeführten Drehstrombrückenschaltung hinsichtlich der Mittelwerte von u_d und i_d

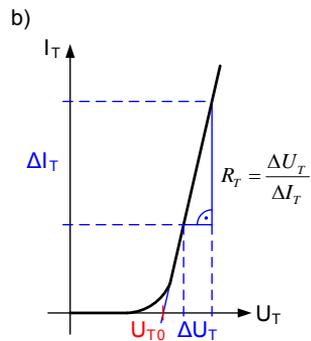


Abbildung 84b)
Näherung der Thyristorkennlinie im Durchlassbereich durch einen linearen Zweipol

11.4 Netzgef. Drehstrombrückenschaltung 3AC – DC

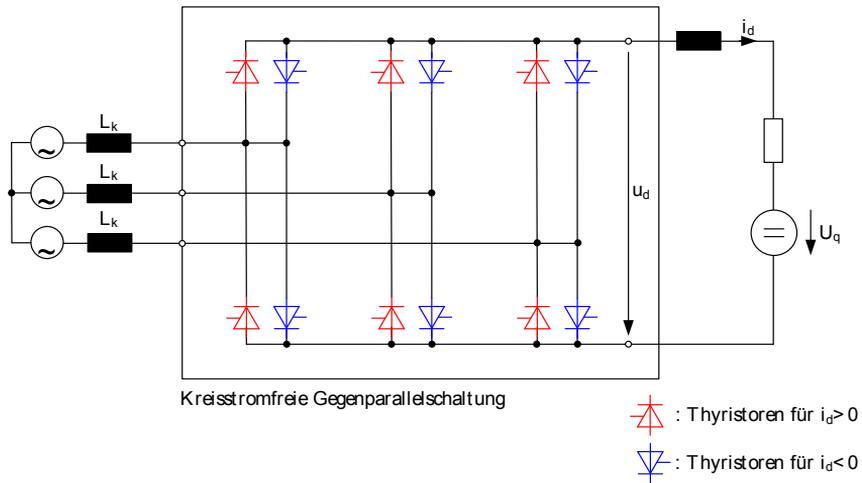


Abbildung 85:
Prinzipschaltbild eines netzgeführten Vierquadrantenstromrichters

11.5 Anwendungen netzgeführter Stromrichter

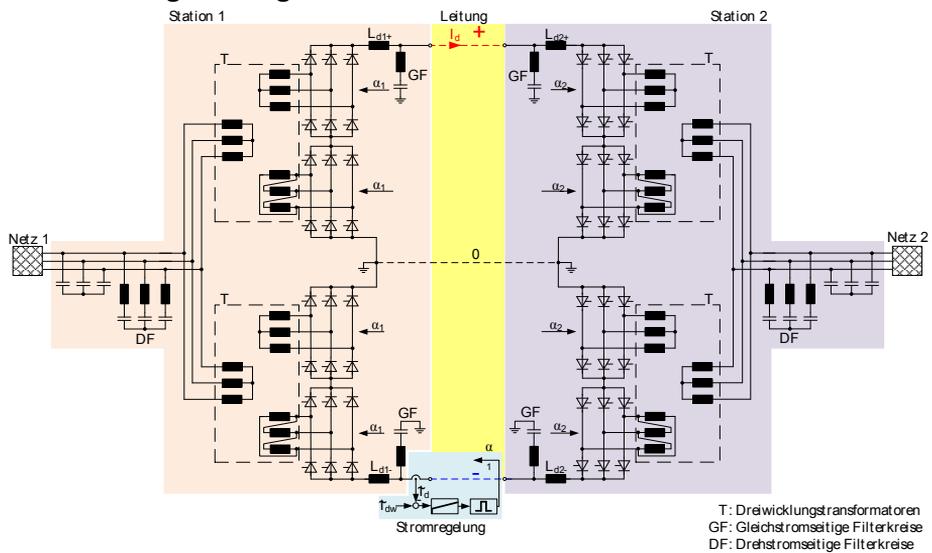
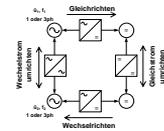


Abbildung 87: Bipolare Hochspannungs-Gleichstromübertragung mit vier zwölfpulsigen Stromrichtereinheiten (Prinzipschaltbild)

Vorlesungsinhalte

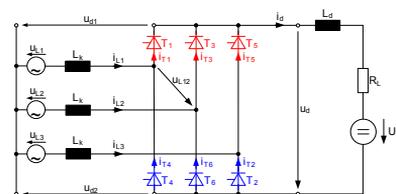
- Kapitel 1 Vorbemerkung
- Kapitel 2: Einleitung
- Kapitel 3: Magnetische Kräfte und Induktion
- Kapitel 4: Gleichstrommaschine
- Kapitel 5: Schrittmotor
- Kapitel 6: Drehstromsynchronmaschine
- Kapitel 7: Asynchronmaschine
- Kapitel 8: Transformator
- Kapitel 9: Leistungshalbleiter
- Kapitel 10: Stromrichter
- Kapitel 11: Netzgeführte Stromrichter
- Kapitel 12: Selbstgeführte Stromrichter**
- Kapitel 13: Elektrische Antriebe



12 Selbstgeführte Stromrichter

Fremdgeführte Stromrichter

- Stromrichter, die nur passive Kommutierungen ermöglichen,
 - sind auf Wechselspannung in der Quelle angewiesen,
 - kommen mit **nicht schaltbaren Leistungshalbleitern** aus.
-
- Stromrichter, die nur induktive Kommutierungen ermöglichen,
 - sind auf Wechselspannung in der Quelle (oder der Last) angewiesen,
 - kommen mit **Leistungshalbleitern aus, die nur einschaltbar sind**.

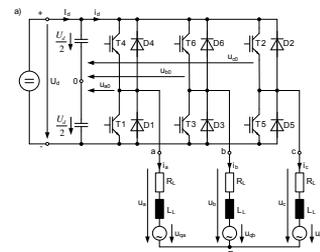


theoretisch auch (praktisch jedoch irrelevant):

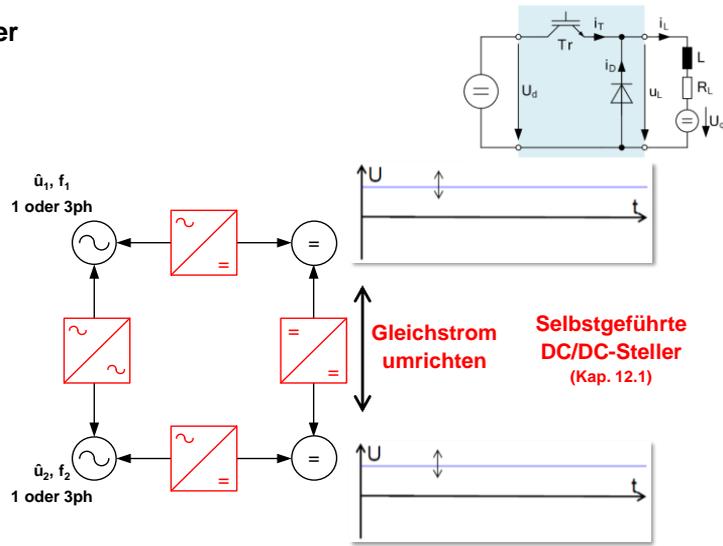
- Stromrichter, die nur kapazitive Kommutierungen ermöglichen
- sind auf Wechselstrom in der Quelle oder der Last angewiesen
- kommen mit Leistungshalbleitern aus, die nur abschaltbar sind

Selbstgeführte Stromrichter

- Stromrichter, die induktive und kapazitive Kommutierungen ermöglichen,
- **Ein- und abschaltbare Leistungshalbleiter** erforderlich.



12.1 Gleichstromsteller



12.1 Gleichstromsteller - Tiefsetzsteller

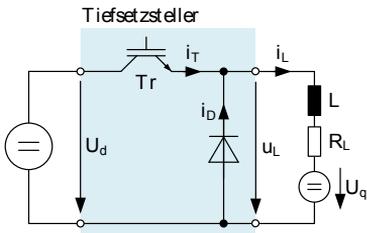


Abbildung 88: Tiefsetzsteller
a) Schaltbild

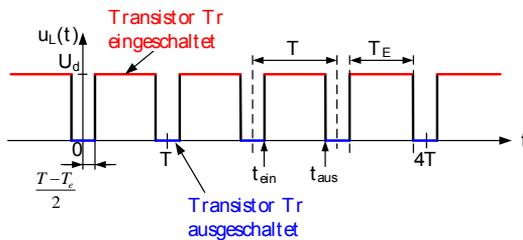


Abbildung 88: Tiefsetzsteller
d) Zeitverlauf der Ausgangsspannung im quasistationären Betrieb

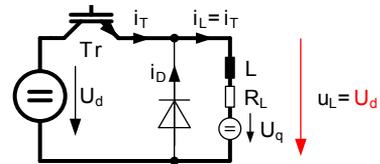


Abbildung 88: Tiefsetzsteller
b) Strompfad bei eingeschaltetem Transistor Tr

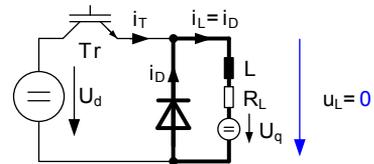


Abbildung 88: Tiefsetzsteller
c) Strompfad bei ausgeschaltetem Transistor Tr

12.1 Gleichstromsteller - Tiefsetzsteller

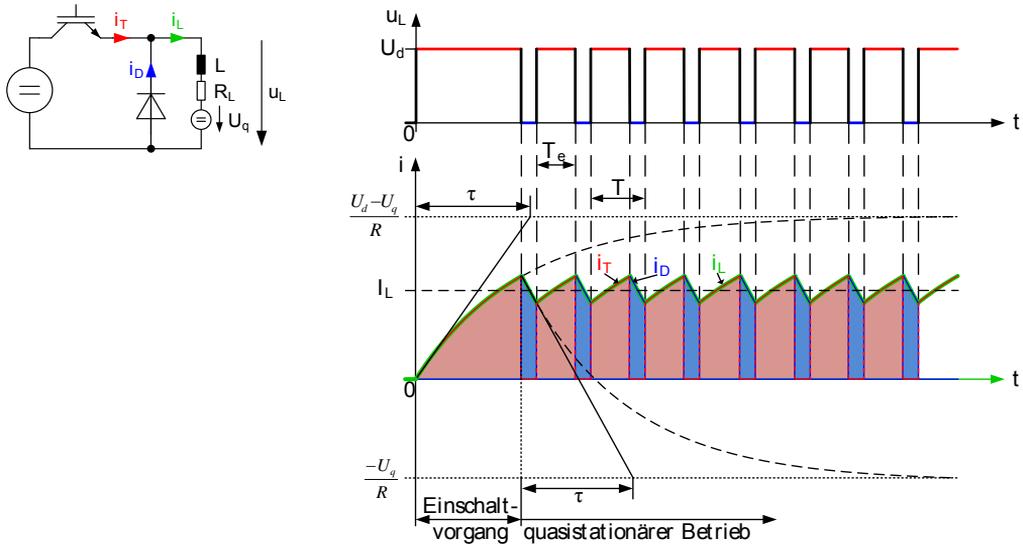


Abbildung 89: Zeitverläufe der Ströme und Spannungen beim Tiefsetzsteller

12.1 Gleichstromsteller - Hochsetzsteller

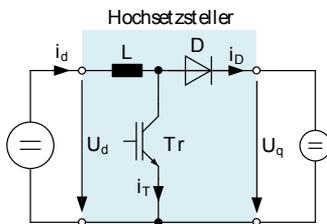


Abbildung 90: Hochsetzsteller
a) Schaltbild

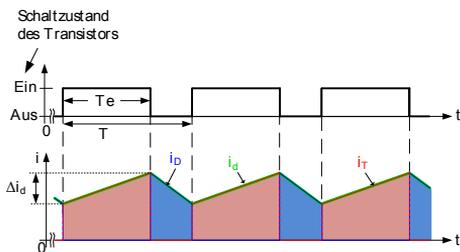


Abbildung 90: Hochsetzsteller
d) Zeitverlauf der Ströme im quasistationären Zustand

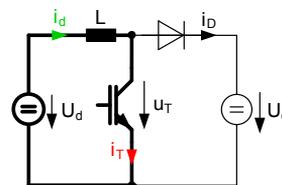


Abbildung 90: Hochsetzsteller
b) Strompfad bei eingeschaltetem Transistor Tr

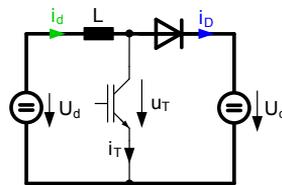
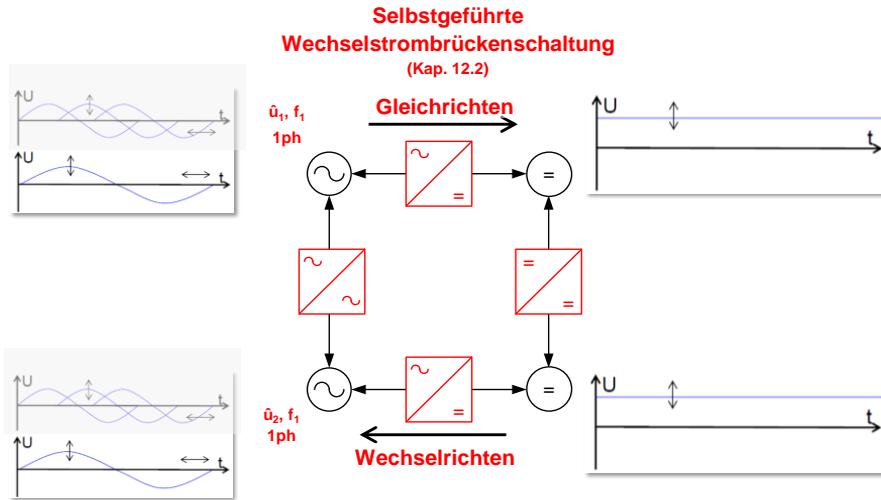


Abbildung 90: Hochsetzsteller
c) Strompfad bei ausgeschaltetem Transistor Tr

12.2 Selbstgeführte Wechselstrombrückenschaltung



12.2 Selbstgeführte Wechselstrombrückenschaltung

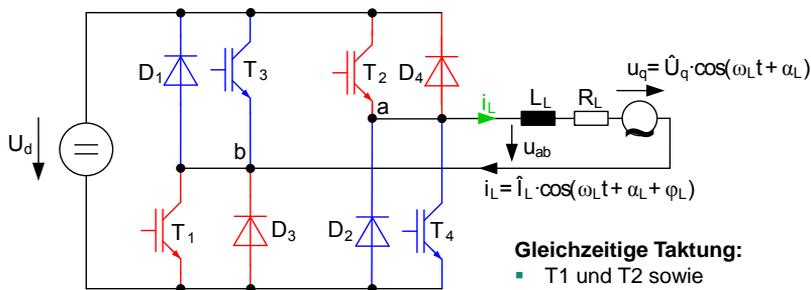


Abbildung 93:
Selbstgeführte Wechselstrombrücken-
schaltung mit gleichzeitiger Taktung
a) Schaltbild

Gleichzeitige Taktung:

- T1 und T2 sowie
 - T3 und T4
- werden immer gleichzeitig ein- und ausgeschaltet.

Vorteilhaft:

Alternierende Taktung:

Auch die Freilaufzustände

- T2 und T3 sowie
- T1 und T4

werden genutzt (bessere Ausgangsspannungsform).

12.2 Selbstgeführte Wechselstrombrückenschaltung

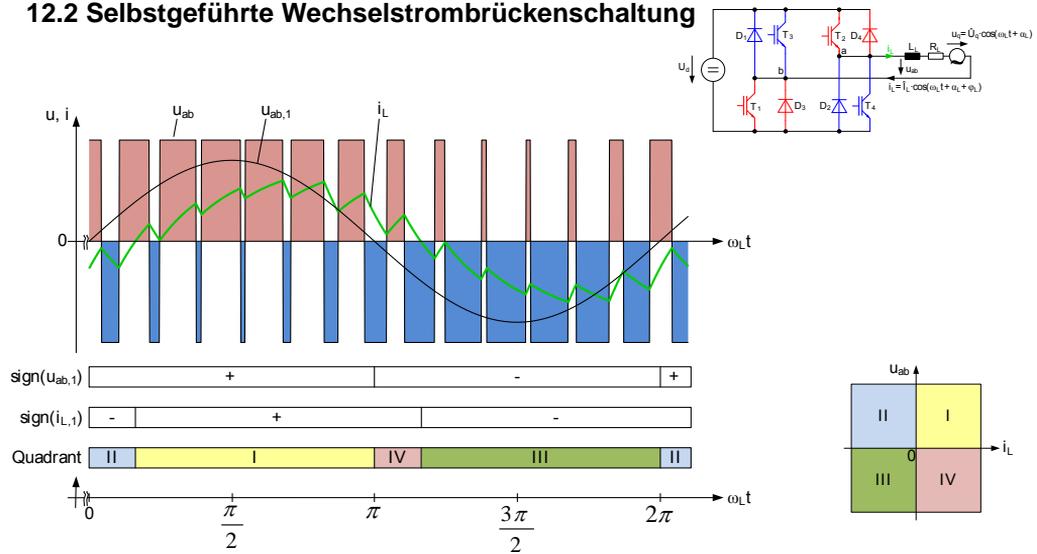
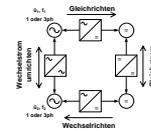


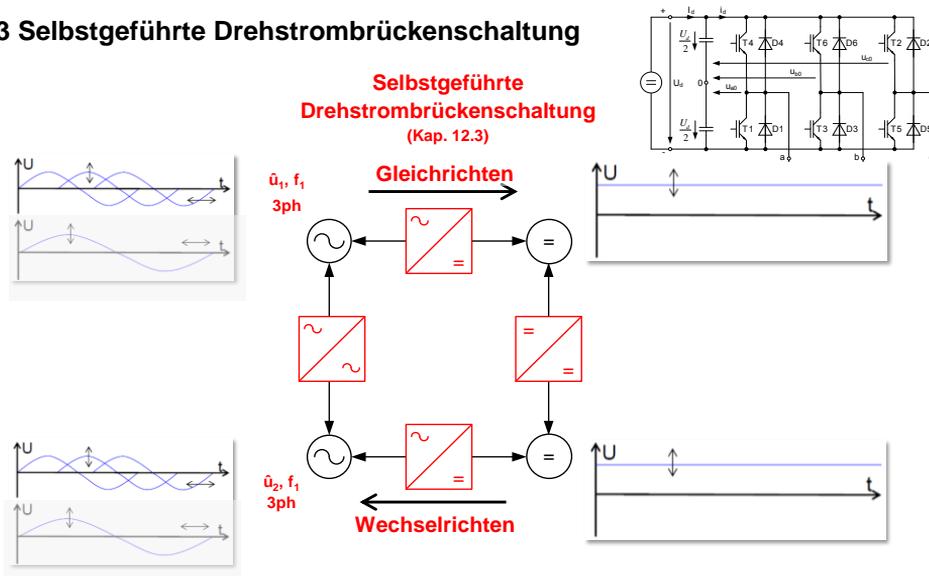
Abbildung 93: Selbstgeführte Wechselstrombrückenschaltung mit gleichzeitiger Taktung
 b) Zeitverläufe der Ausgangsspannung und des Laststroms sowie Vorzeichen der Mittelwerte von Spannung und Strom
 c) Zuordnung der Quadranten

Vorlesungsinhalte

- Kapitel 1 Vorbemerkung
- Kapitel 2: Einleitung
- Kapitel 3: Magnetische Kräfte und Induktion
- Kapitel 4: Gleichstrommaschine
- Kapitel 5: Schrittmotor
- Kapitel 6: Drehstromsynchronmaschine
- Kapitel 7: Asynchronmaschine
- Kapitel 8: Transformator
- Kapitel 9: Leistungshalbleiter
- Kapitel 10: Stromrichter
- Kapitel 11: Netzgeführte Stromrichter
- Kapitel 12: Selbstgeführte Stromrichter**
- Kapitel 13: Elektrische Antriebe



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung

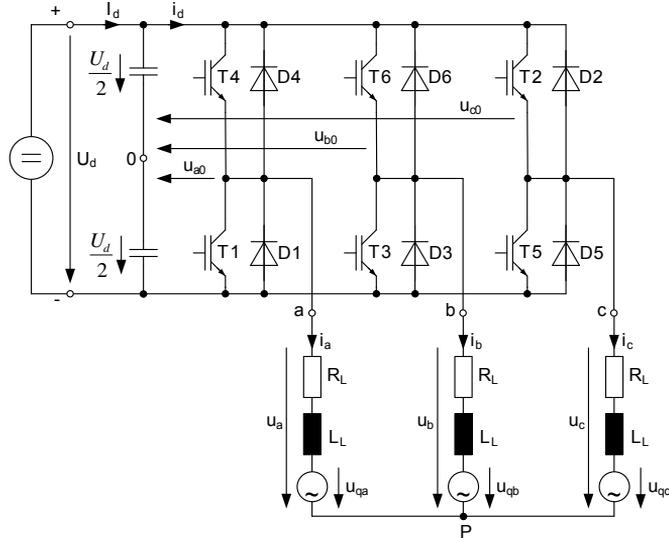


Abbildung 94: Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung mit aktiver ohm'sch-induktiver Last
a) Prinzipschaltbild

12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung

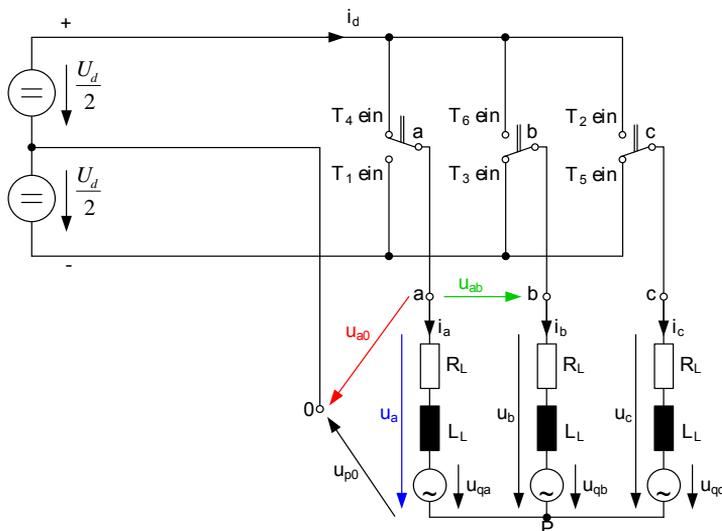


Abbildung 94: Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung mit aktiver ohm'sch-induktiver Last
b) Idealisertes Schaltermodell

12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung

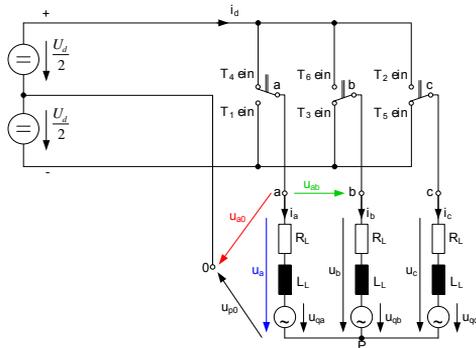
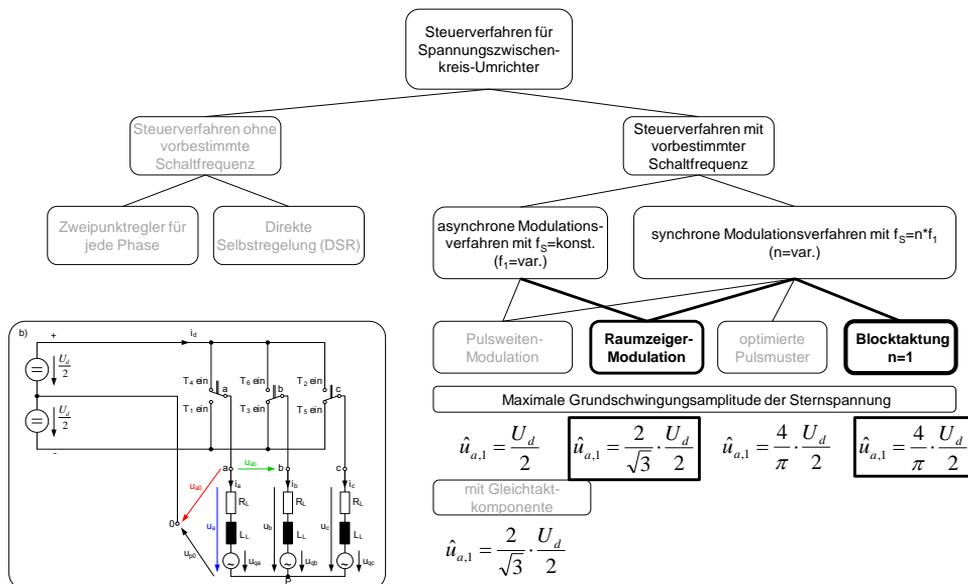


Abbildung 94:
Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung mit aktiver ohm'sch-induktiver Last
b) Idealisertes Schaltermodell

Nr.	Schaltfunktion			Leiter-spannungen			Stern-spannungen			Gleichtakt-spannung
	S _a	S _b	S _c	U _{ab}	U _{bc}	U _{ca}	U _a	U _b	U _c	U _{p0}
1	1	-1	-1	1	0	-1	2/3	-1/3	-1/3	-1/6
2	1	1	-1	0	1	-1	1/3	1/3	-2/3	1/6
3	-1	1	-1	-1	1	0	-1/3	2/3	-1/3	-1/6
4	-1	1	1	-1	0	1	-2/3	1/3	1/3	1/6
5	-1	-1	1	0	-1	1	-1/3	-1/3	2/3	-1/6
6	1	-1	1	1	-1	0	1/3	-2/3	1/3	1/6
7	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1/2
8	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	-1/2

Schaltzustände der selbstgeführten Drehstrombrückenschaltung

12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Blocktaktung

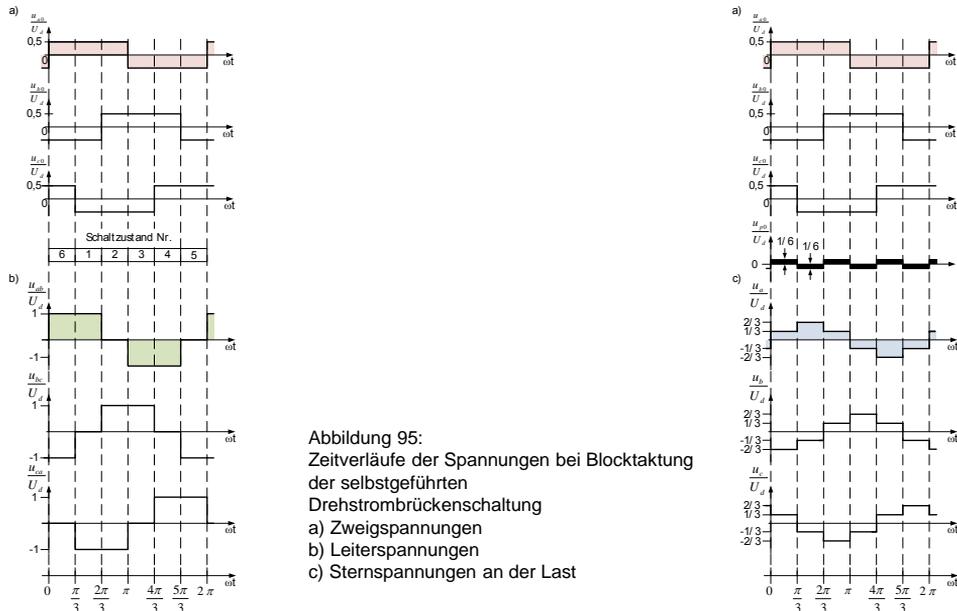


Abbildung 95:
Zeitverläufe der Spannungen bei Blocktaktung
der selbstgeführten
Drehstrombrückenschaltung
a) Zweigspannungen
b) Leiterspannungen
c) Sternspannungen an der Last

12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Blocktaktung

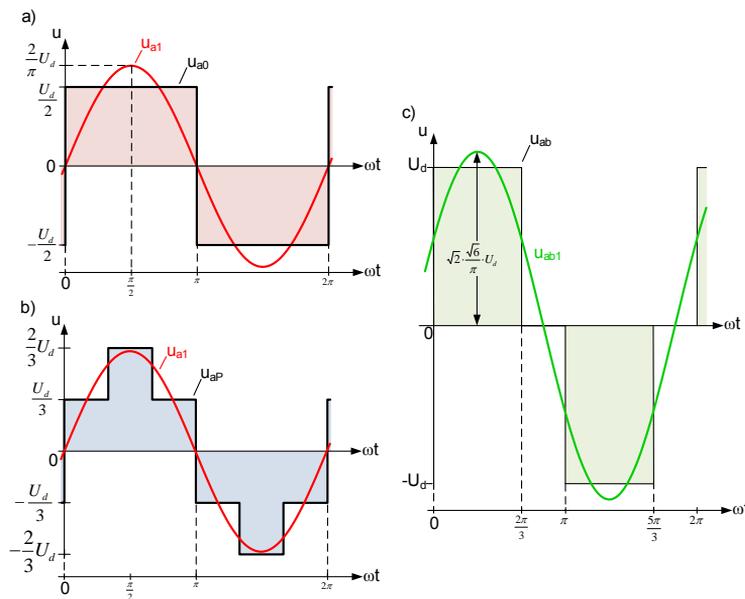


Abbildung 96:
Zeitverläufe einer
a) Zweigspannung
b) Sternspannung der Last
c) Leiterspannung
und der zugehörigen
Grundschwingung bei
Blocksteuerung

12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Freilaufzustände

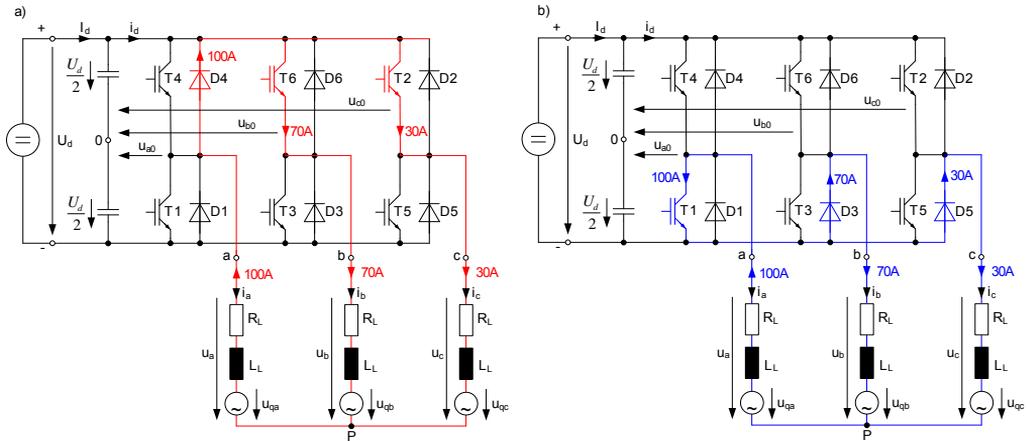
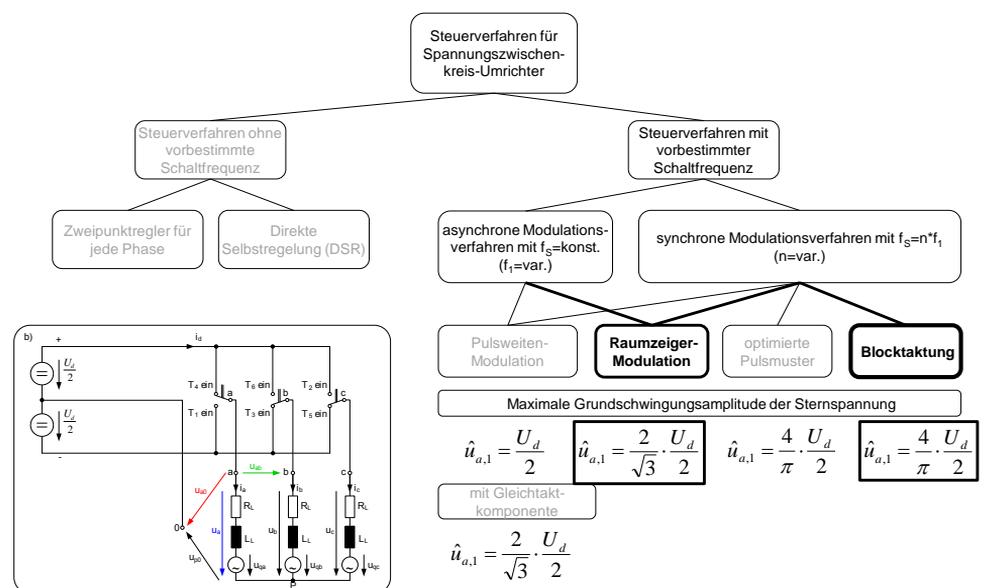


Abbildung 97:
 Stromverteilung in der selbstgeführten Drehstrombrückenschaltung für den
 a) Schaltzustand 7 (Freilauf über die obere Brückenhälfte)
 b) Schaltzustand 8 (Freilauf über die untere Brückenhälfte)
 für $i_a=+100A$, $i_b=+70A$, $i_c=+30A$

12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

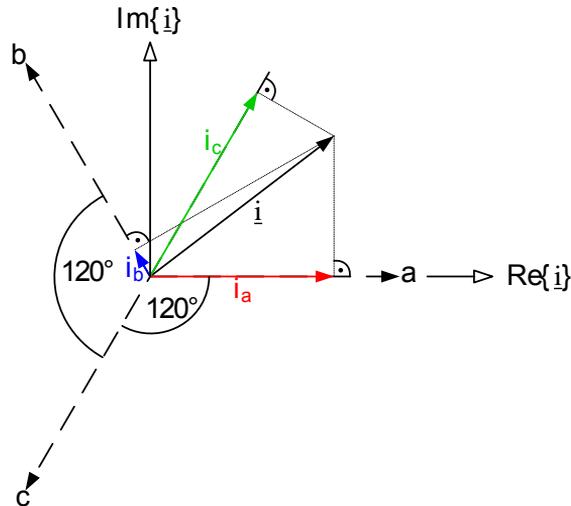


Abbildung 98:
Darstellung der drei Strangströme i_a , i_b , i_c durch einen Raumzeiger i

12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

Raumzeigerdarstellung

Grundlage ist die Darstellung eines dreiphasigen Spannungssystems durch einen **Raumzeiger** in der komplexen Ebene:

$$\underline{u} = \frac{2}{3} \cdot [u_1 + \underline{a} \cdot u_2 + \underline{a}^2 \cdot u_3] \quad \underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\underline{u} = \frac{2}{3} \cdot [u_1 + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot u_2 + e^{j\frac{4\pi}{3}} \cdot u_3]$$

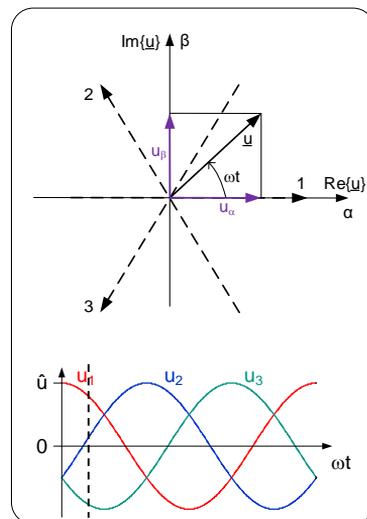
Der Raumzeiger kann mit den Komponenten u_α und u_β in einem orthogonalen Koordinatensystem beschrieben werden:

$$\underline{u} = u_\alpha + j \cdot u_\beta \quad \begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Gleichtaktkomponenten (Nullsystem) werden durch den Raumzeiger nicht dargestellt und müssen separat behandelt werden.

$$u_0 = \frac{1}{3} \cdot [u_1 + u_2 + u_3]$$

Bei symm. Drehspannungssystem: $u_0 = 0$



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

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

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

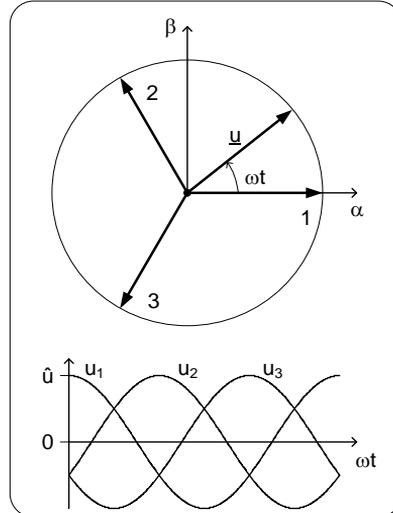
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\omega t} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems $u_{1,2,3}(t)$



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

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

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

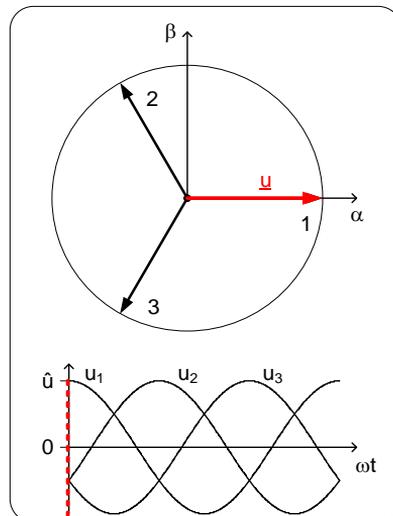
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\omega t} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems $u_{1,2,3}(t)$



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

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

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

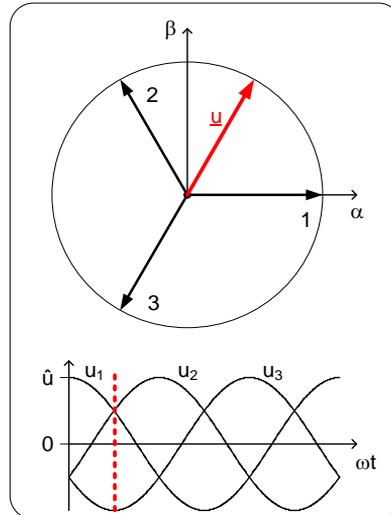
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\omega t} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems $u_{1,2,3}(t)$



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

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

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

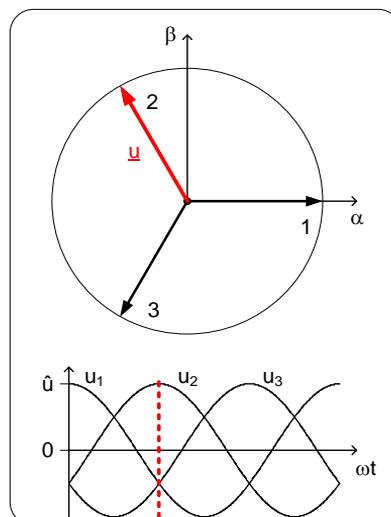
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\omega t} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems $u_{1,2,3}(t)$



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

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

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

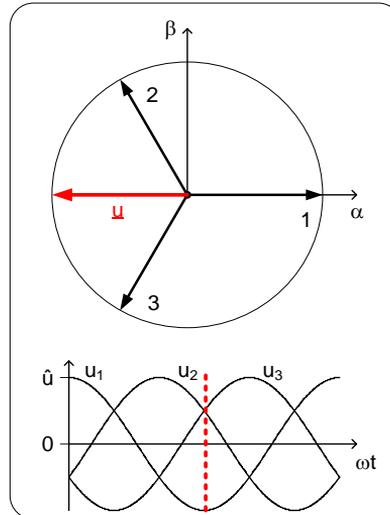
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\omega t} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems $u_{1,2,3}(t)$



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

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

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

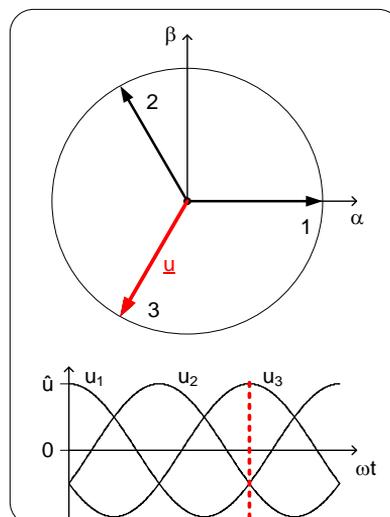
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\omega t} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems $u_{1,2,3}(t)$



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

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

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

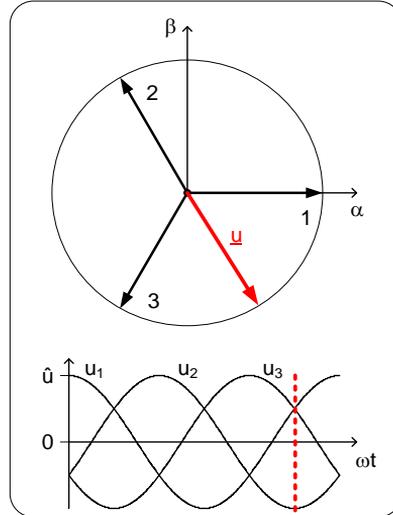
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\omega t} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems $u_{1,2,3}(t)$



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

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

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

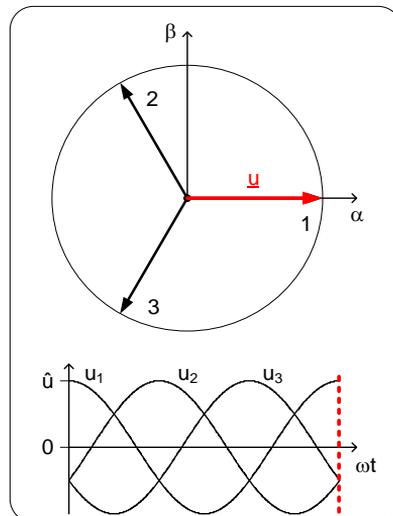
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\omega t} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems $u_{1,2,3}(t)$



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

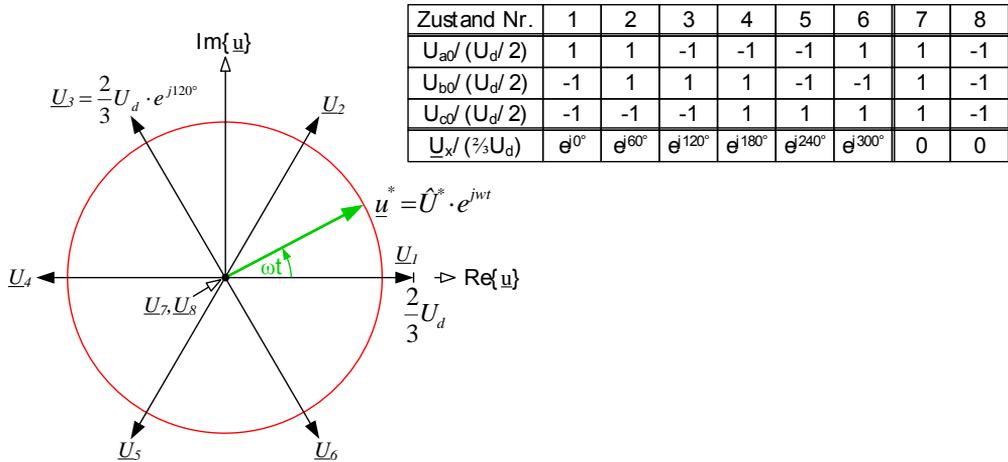
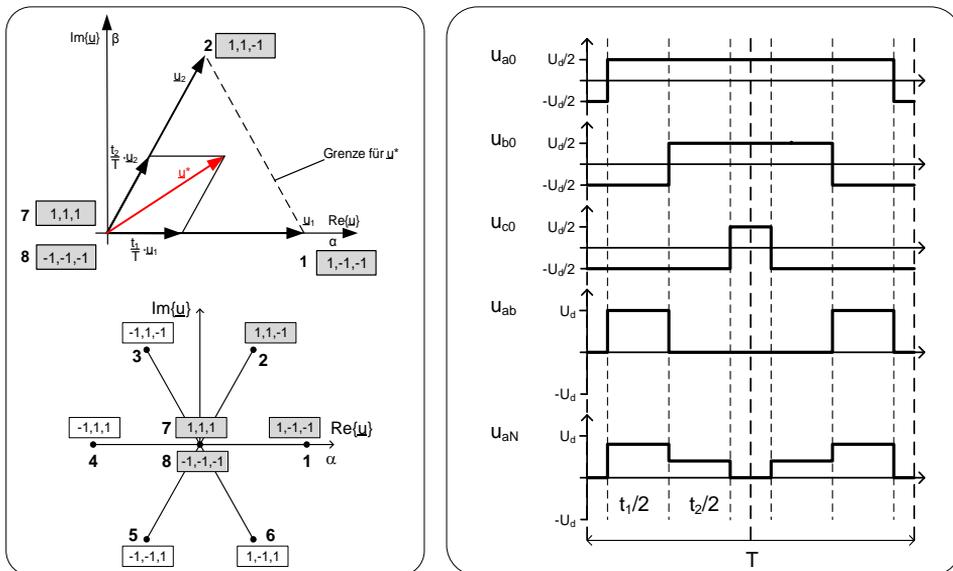
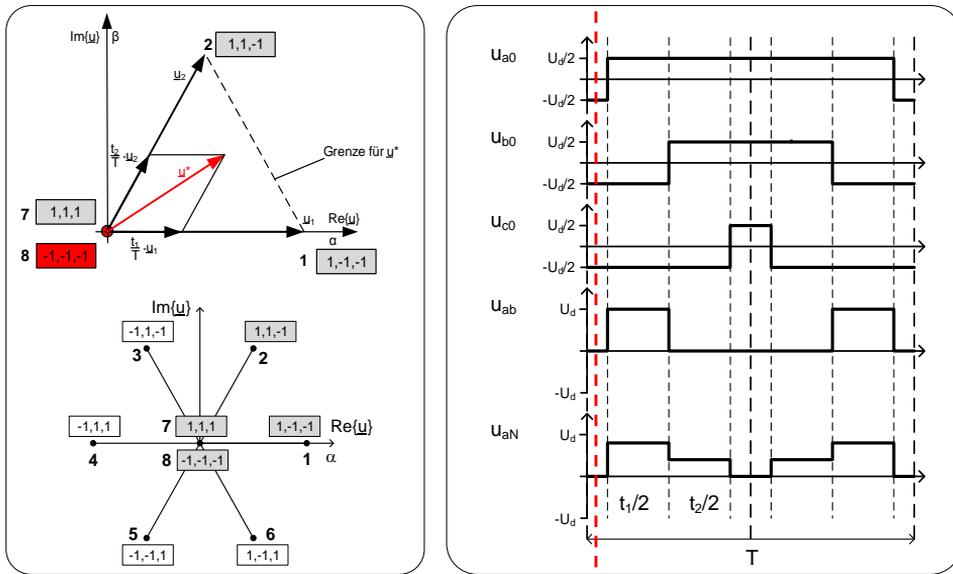


Abbildung 99: Raumzeigerdarstellung der Spannungen u_{a0} , u_{b0} , u_{c0} für die Schaltzustände 1 bis 8, sowie Trajektorie des Raumzeigers eines sinusförmig symmetrischen Drehspannungssystems

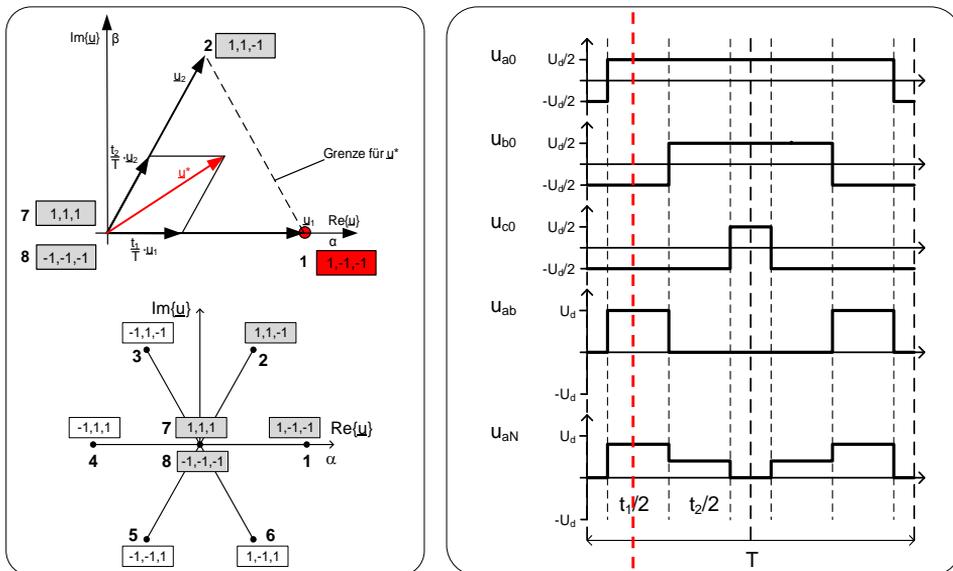
12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



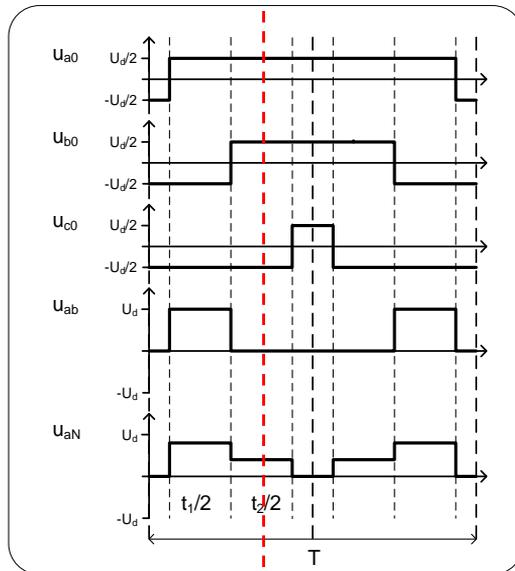
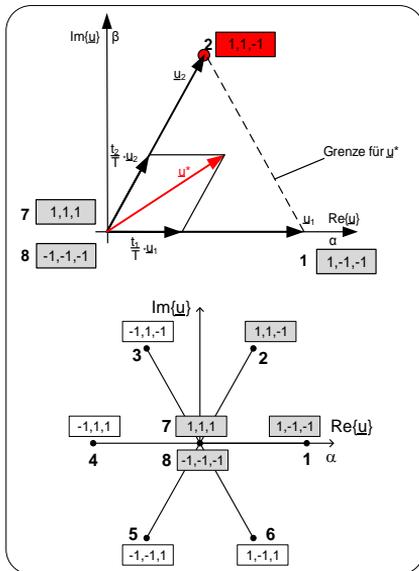
12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



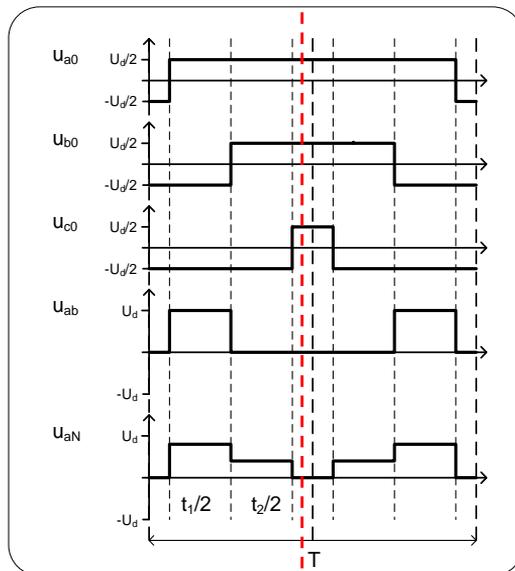
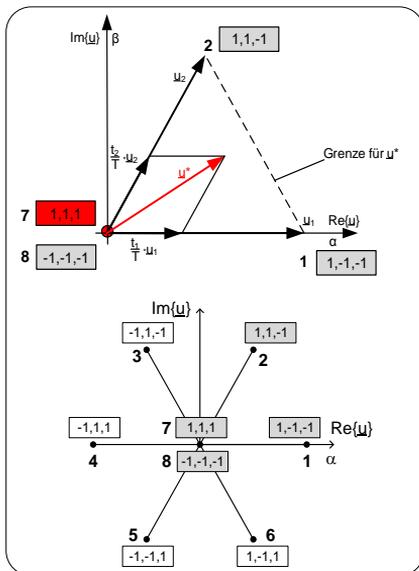
12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



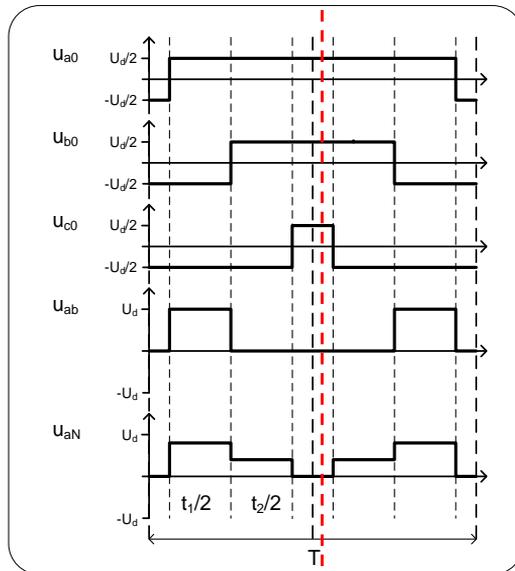
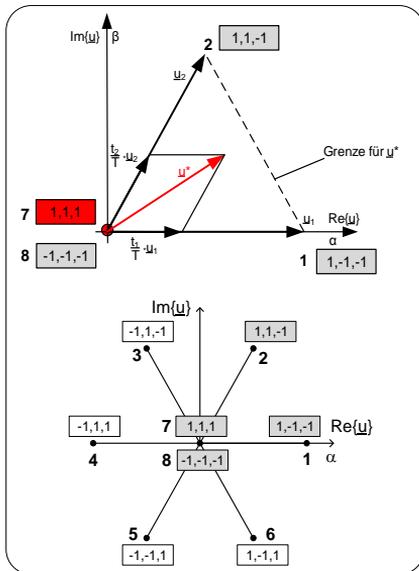
12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



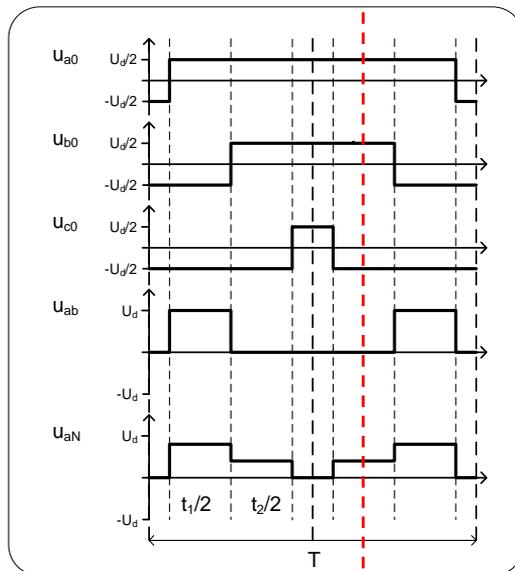
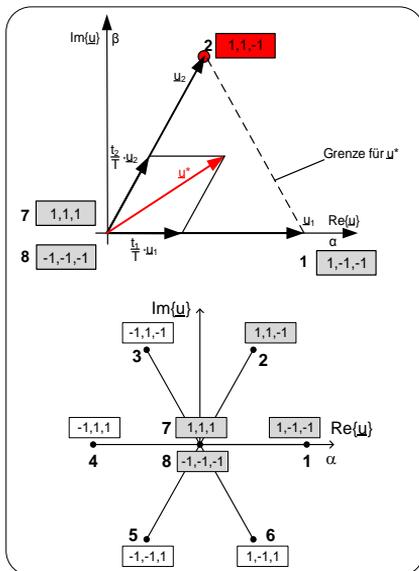
12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



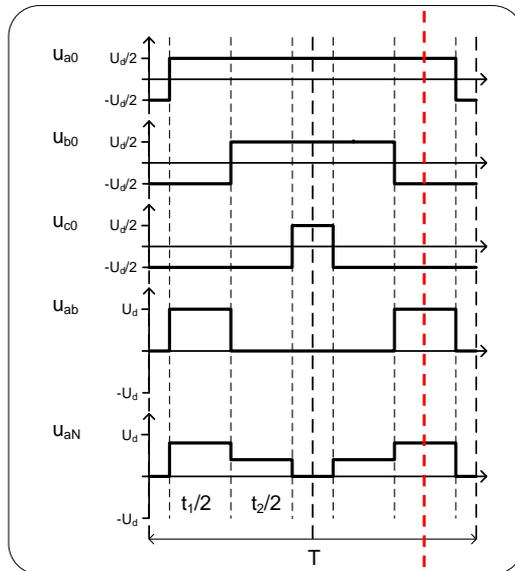
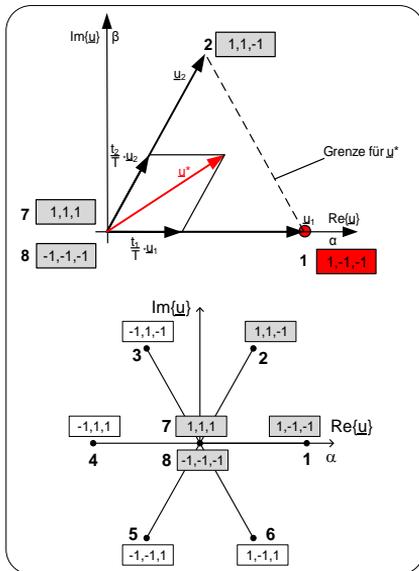
12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



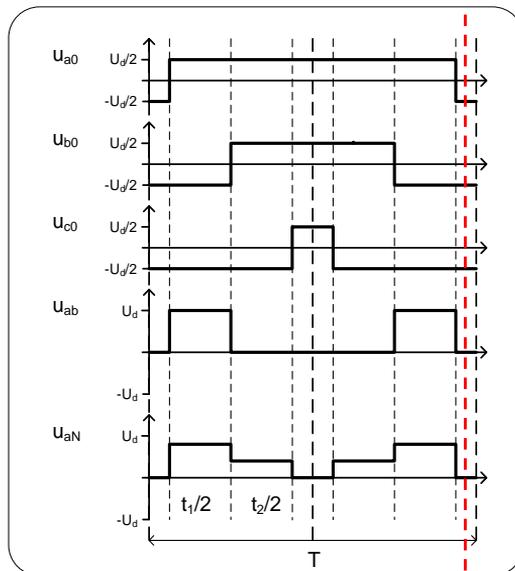
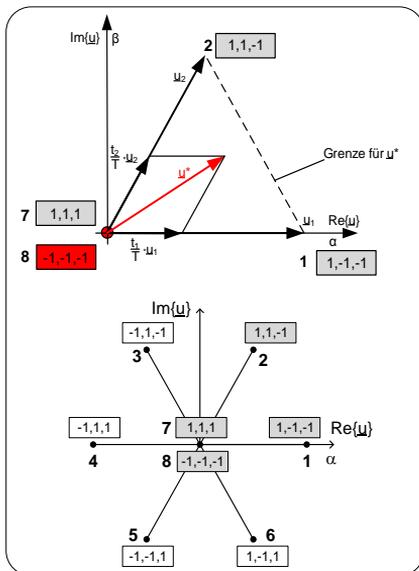
12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

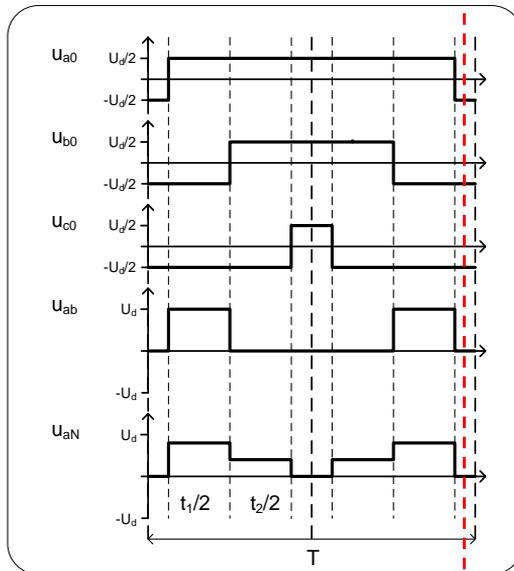
- Einstellung eines symmetrischen Spannungssystems durch Vorgabe einer kreisförmigen Bahnkurve
- Für eine quasikontinuierliche Approximation der (meist sinusförmigen) Spannungswerte wird eine sehr kurze Pulsperiode T betrachtet.

Durch geeignete Wahl der Einschalt Dauern für die Raumzeiger der einzelnen Schaltzustände kann der Sollspannungs-Raumzeiger näherungsweise eingestellt werden.

- „Kürzung“ der Raumzeiger durch zeitweises Einschalten der von Null verschiedenen Raumzeiger, z.B. durch Wechsel zwischen Raumzeiger 1..6 und Nullzeiger 7,8.
- „Summenbildung“ durch Abwechseln der von Null verschiedenen Raumzeiger 1..6.

Vorteilhaft:

- Nutzung der dem Sollspannungs-Raumzeiger benachbarten Raumzeiger (zwei von Null verschiedene Raumzeiger plus Nullzeiger),
- Wahl der Raumzeiger so, dass beim Wechsel nur ein Brückenweitz schalten muss.



12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

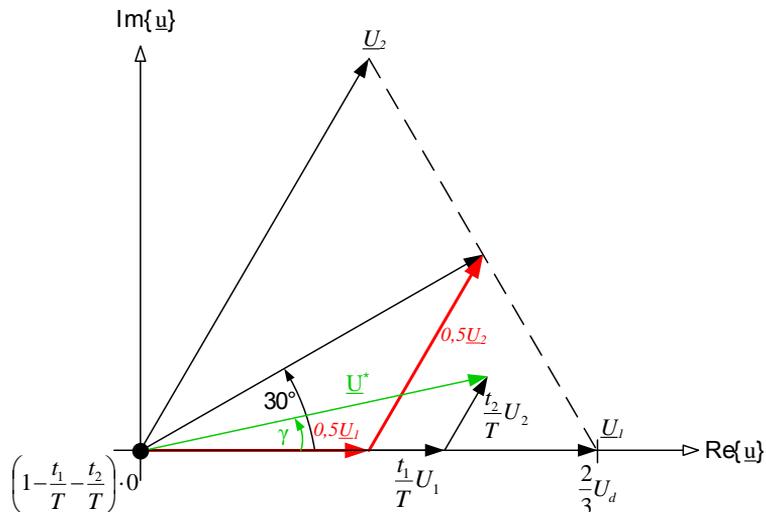


Abbildung 100:
Darstellung des Raumzeigers \underline{U}^* durch die benachbarten Raumzeiger der Schaltzustände 1, 2 und 7, 8, sowie Grenzfall für $\gamma=30^\circ$

12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

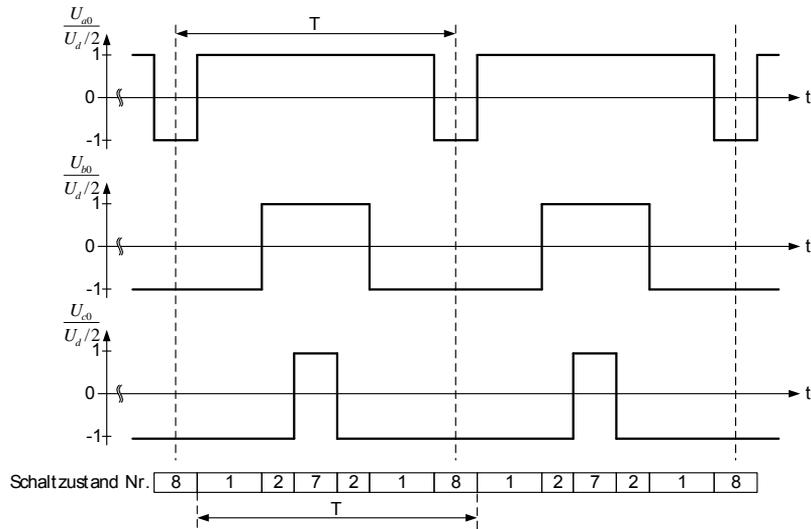
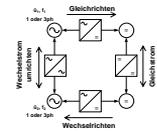


Abbildung 101:
Darstellung zweier Pulsperioden der Raumzeigermodulation: Zweigspannungen u_{a0} , u_{b0} , u_{c0} und Schaltzustandsnummern für $0 < \gamma < 30^\circ$ entsprechend Abb. 100

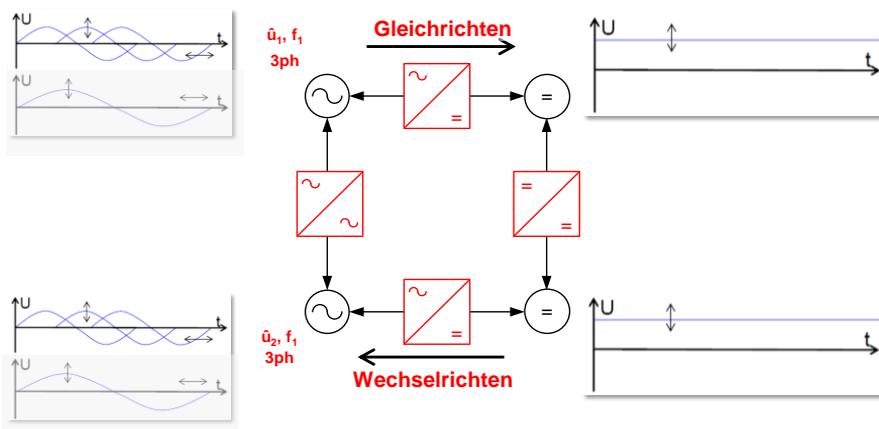
Vorlesungsinhalte

- Kapitel 1 Vorbemerkung
- Kapitel 2: Einleitung
- Kapitel 3: Magnetische Kräfte und Induktion
- Kapitel 4: Gleichstrommaschine
- Kapitel 5: Schrittmotor
- Kapitel 6: Drehstromsynchronmaschine
- Kapitel 7: Asynchronmaschine
- Kapitel 8: Transformator
- Kapitel 9: Leistungshalbleiter
- Kapitel 10: Stromrichter
- Kapitel 11: Netzgeführte Stromrichter
- Kapitel 12: Selbstgeführte Stromrichter**
- Kapitel 13: Elektrische Antriebe



12.4 Mehrstufenwechselrichter

Mehrstufenwechselrichter (Kap. 12.4)



12.4 Mehrstufenwechselrichter

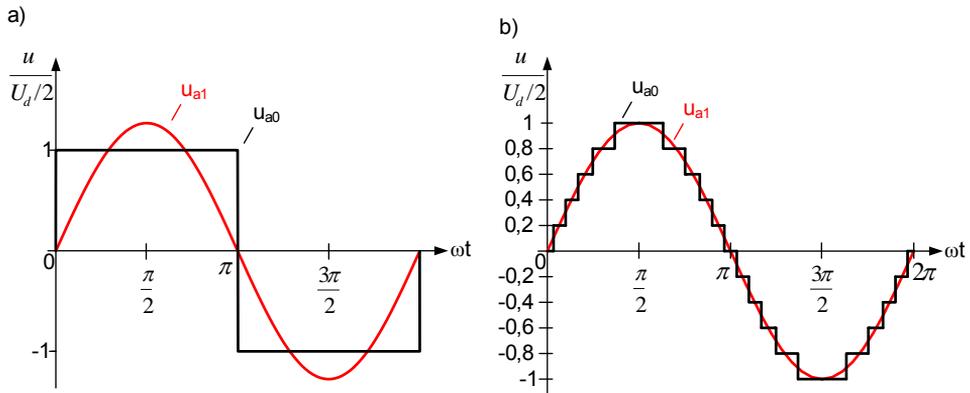
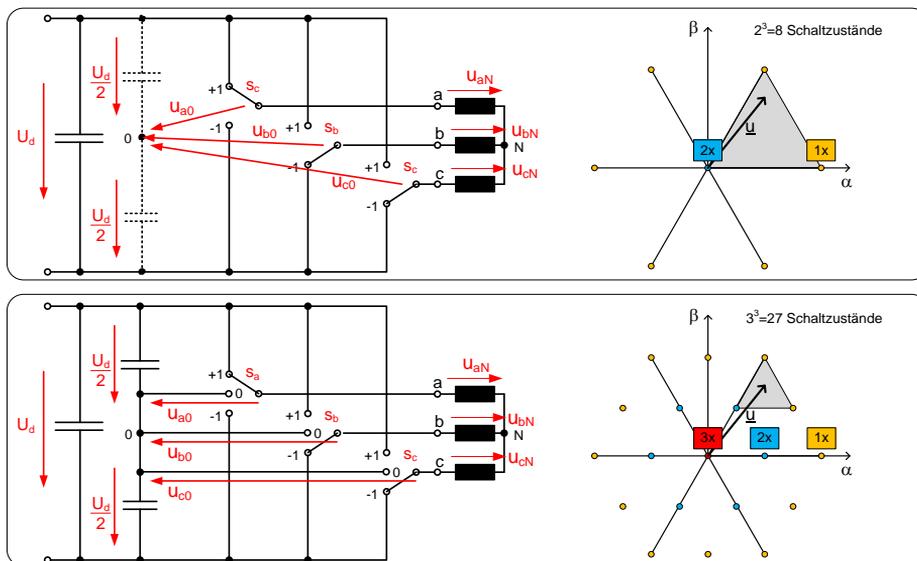
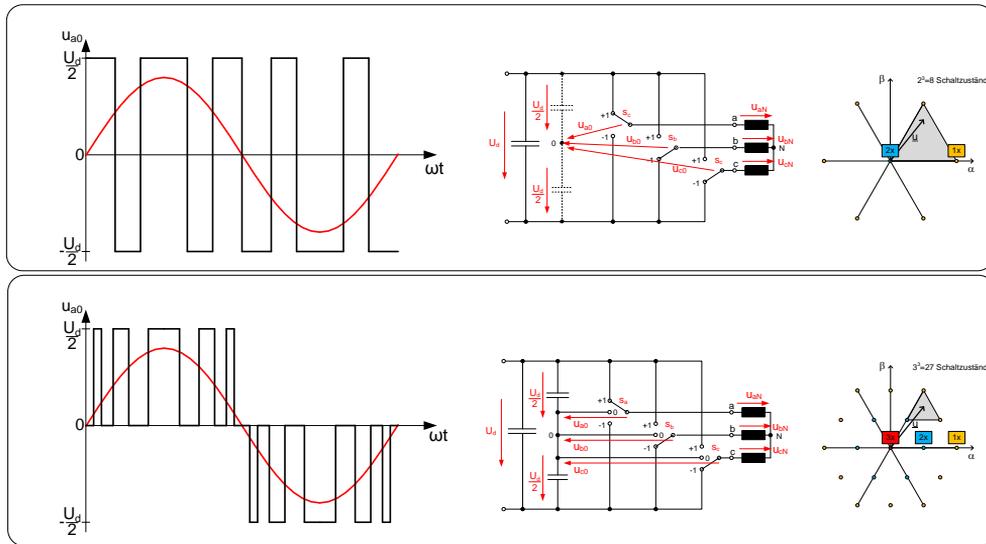


Abbildung 102:
 Kurvenform der Zweigspannung u_{a0} bei Blocktaktung mit dem Zeitverlauf der Grundschwingung u_{a1}
 a) Zweistufenwechselrichter (Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung)
 b) Elfstufenwechselrichter

12.4 Mehrstufenwechselrichter



12.4 Mehrstufenwechselrichter



12.4 Mehrstufenwechselrichter

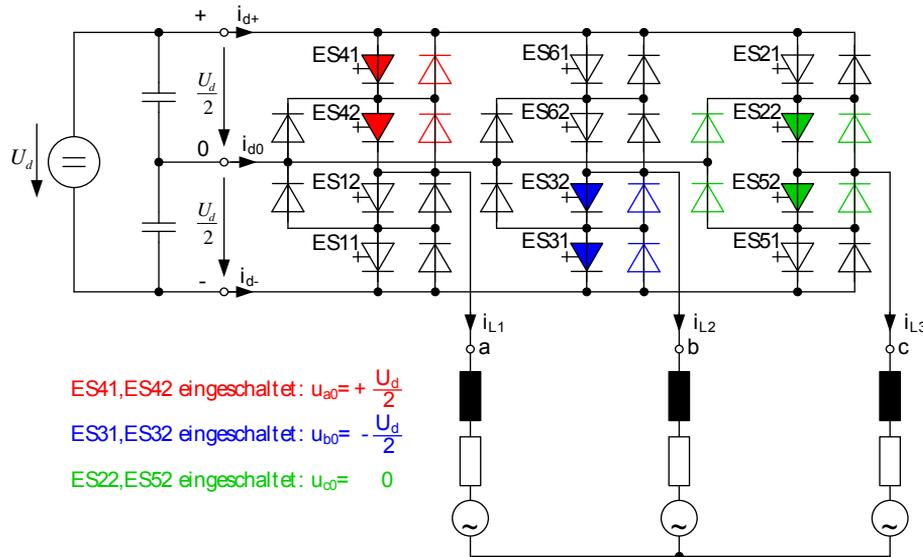
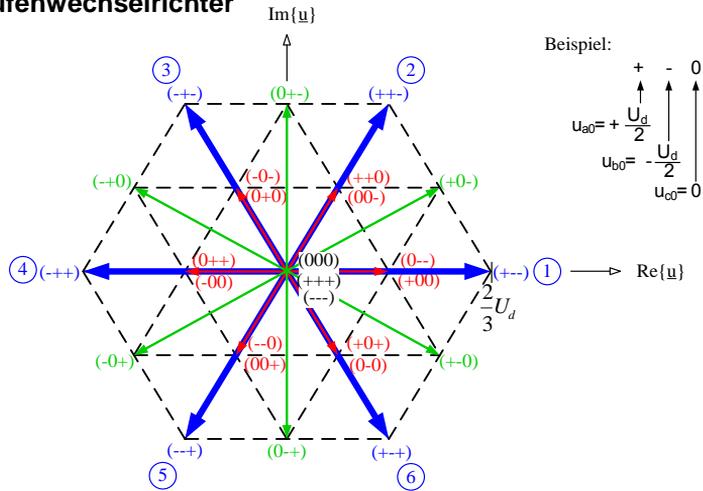


Abbildung 103:
Prinzipschaltbild des Neutral Point Clamped Inverters mit ohm'schinduktiver Last mit Gegenspannung

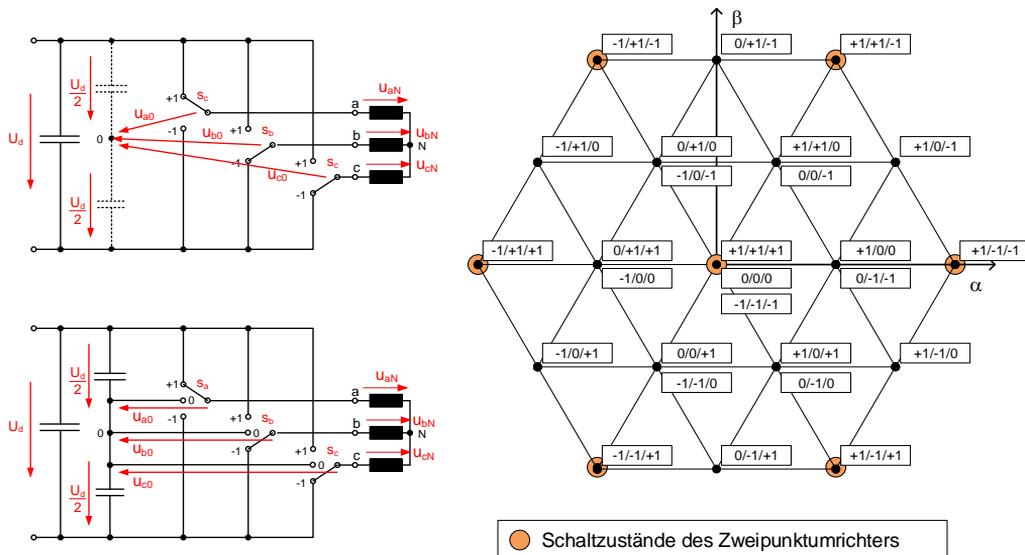
12.4 Mehrstufenwechselrichter



blau: Raumzeiger bei Betrieb wie eine selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung
 rot: zusätzliche Raumzeiger halber Länge
 grün: gleichaktfreie zusätzliche Raumzeiger

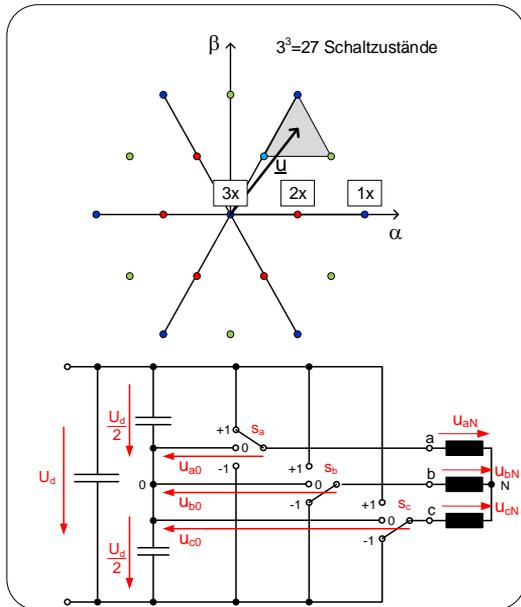
Abbildung 104: Raumzeiger der Ausgangsspannung eines Neutral Point Clamped Inverters in Abhängigkeit vom Schaltzustand

12.4 Mehrstufenwechselrichter



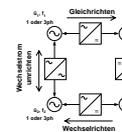
12.4 Mehrstufenwechselrichter

Nr.	Schaltfunktion			Leiterspannungen			Sternspannungen			Gleichtaktspannung		Raumzeiger		
	s_a	s_b	s_c	u_{a0}	u_{b0}	u_{c0}	u_a	u_b	u_c	u_{u0}	u_v	u_w	u	U_i
1	1	-1	-1	1	0	-1	2/3	-1/3	-1/3	-1/6	2/3	0	2/3	0°
2	1	1	-1	0	1	-1	1/3	1/3	-2/3	1/6	+1/3	$\sqrt{3}/3$	2/3	60°
3	-1	1	-1	-1	1	0	-1/3	2/3	-1/3	-1/6	-1/3	$-\sqrt{3}/3$	2/3	120°
4	-1	1	1	-1	0	1	-2/3	1/3	1/3	1/6	-2/3	0	2/3	180°
5	-1	-1	1	0	-1	1	-1/3	-1/3	2/3	-1/6	-1/3	$-\sqrt{3}/3$	2/3	240°
6	1	-1	1	1	-1	0	1/3	-2/3	1/3	1/6	+1/3	$\sqrt{3}/3$	2/3	300°
7	1	0	-1	1/2	1/2	-1	1/2	0	-1/2	0	+1/2	$-\sqrt{3}/6$	$\sqrt{3}/3$	30°
8	0	1	-1	-1/2	1	-1/2	0	1/2	-1/2	0	0	$\sqrt{3}/6$	$\sqrt{3}/3$	90°
9	-1	1	-1	-1	1/2	1/2	-1/2	1/2	0	0	-1/2	$-\sqrt{3}/6$	$\sqrt{3}/3$	150°
10	-1	0	1	-1/2	-1/2	1	-1/2	0	1/2	0	-1/2	$\sqrt{3}/6$	$\sqrt{3}/3$	210°
11	0	-1	1	1/2	-1	-1/2	0	-1/2	1/2	0	0	$-\sqrt{3}/6$	$\sqrt{3}/3$	270°
12	1	-1	1	1	-1/2	-1/2	1/2	-1/2	0	0	+1/2	$-\sqrt{3}/6$	$\sqrt{3}/3$	330°
13	1	0	0	1/2	0	-1/2	1/3	-1/6	-1/6	1/6	0	1/3	0°	
14	0	-1	-1	1/2	0	-1/2	1/3	-1/6	-1/6	-1/3	+1/6	0	1/3	0°
15	1	1	0	0	1/2	-1/2	1/6	1/6	-1/3	1/3	+1/6	$\sqrt{3}/6$	1/3	60°
16	0	0	-1	0	1/2	-1/2	1/6	1/6	-1/3	-1/6	-1/6	$\sqrt{3}/6$	1/3	60°
17	0	1	0	-1/2	1/2	0	-1/6	1/3	-1/6	1/6	-1/6	$-\sqrt{3}/6$	1/3	120°
18	-1	0	-1	-1/2	1/2	0	-1/6	1/3	-1/6	-1/3	1/6	$-\sqrt{3}/6$	1/3	120°
19	0	1	1	-1/2	0	1/2	-1/3	1/6	1/6	1/3	-1/3	0	1/3	180°
20	-1	0	0	-1/2	0	1/2	-1/3	1/6	1/6	-1/6	-1/3	0	1/3	180°
21	0	0	1	0	-1/2	1/2	-1/6	-1/6	1/3	1/6	-1/6	$-\sqrt{3}/6$	1/3	240°
22	-1	-1	0	0	-1/2	1/2	-1/6	-1/6	1/3	-1/3	1/6	$-\sqrt{3}/6$	1/3	240°
23	1	0	1	1/2	-1/2	0	1/6	-1/3	1/6	1/3	+1/6	$\sqrt{3}/6$	1/3	300°
24	0	-1	0	1/2	-1/2	0	1/6	-1/3	1/6	-1/6	-1/6	$\sqrt{3}/6$	1/3	300°
25	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1/2	0	0	0	-
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
27	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	-1/2	0	0	0	-

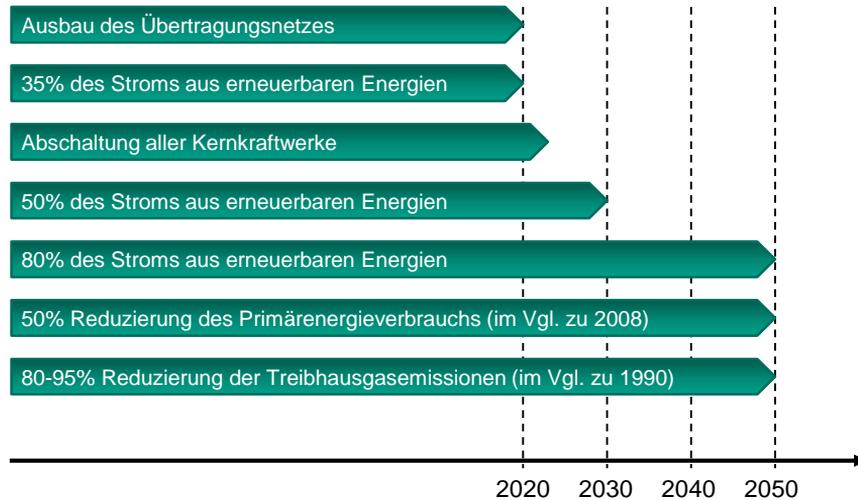


Vorlesungsinhalte

- Kapitel 1: Vorbemerkung
- Kapitel 2: Einleitung
- Kapitel 3: Magnetische Kräfte und Induktion
- Kapitel 4: Gleichstrommaschine
- Kapitel 5: Schrittmotor
- Kapitel 6: Drehstromsynchronmaschine
- Kapitel 7: Asynchronmaschine
- Kapitel 8: Transformator
- Kapitel 9: Leistungshalbleiter
- Kapitel 10: Stromrichter
- Kapitel 11: Netzgeführte Stromrichter
- Kapitel 12: Selbstgeführte Stromrichter
- Kapitel 13: Elektrische Antriebe**



13 Elektrische Antriebe – Ziele der Energiewende in Deutschland



13 Elektrische Antriebe – Ziele der Energiewende in Deutschland

- Wesentliche Elemente der Energiewende sind

Energieeffizienz

- Rationellere Verwendung von Energie
- Optimierte Prozesse bei der **Wandlung, dem Transport und der Speicherung von Energie**

Energieeinsparmaßnahmen

- Vermeidung von Energieverbrauch
- Erfordern keine Investitionen
- Erreichbar durch individuelle Verhaltensänderungen
- Sofort umsetzbar

Ausbau der erneuerbaren Energien

- **Wind, Sonne, Bioenergie, Wasserkraft, Erdwärme, Meeresenergie**
- **Integration in das Stromnetz**
- **Speicherung**

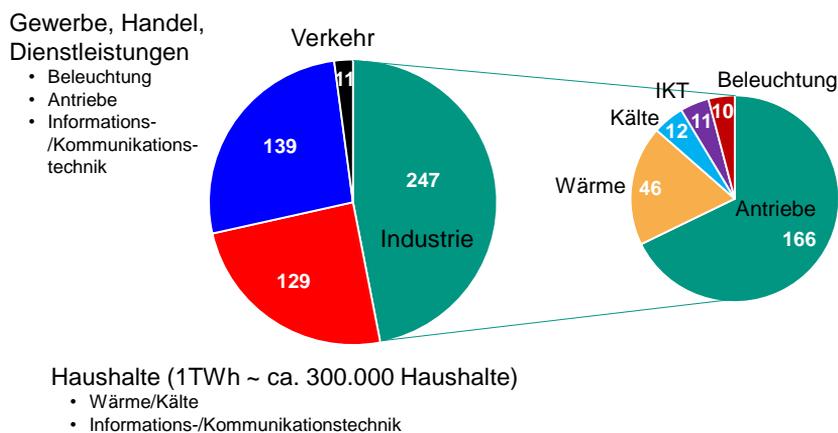
13 Elektrische Antriebe – Ziele der Energiewende in Deutschland

- Wo sind wir u.a. bereits gut unterwegs
 - Ausbau von Wind, Sonne, Bioenergie, Wasserkraft inkl. effiziente Anbindung in das Stromnetz
 - Effiziente Beleuchtungstechnologien
 - Wärmedämmung

- Wo sind teilweise noch große Potenziale
 - Einsatz energieeffizienter Motoren im Industrie- und Haushaltsbereich
 - Effizientere Prozessführung in der Industrie
 - Energiespeicherung
 - Elektromobilität
 - Einsatz von elektrisch statt mechanisch geregelten Antrieben
 - Effizientere Energieverteilung

13 Elektrische Antriebe – Ziele der Energiewende in Deutschland

- Nettostromverbrauch 2016 in Dtl.: 525 TWh
ca. 21% Anteil am gesamten Endenergieverbrauch (Endenergie: 37% Kraftstoffe, 25% Gas, 21% Strom, 5% Kohle, 5% Fernwärme)

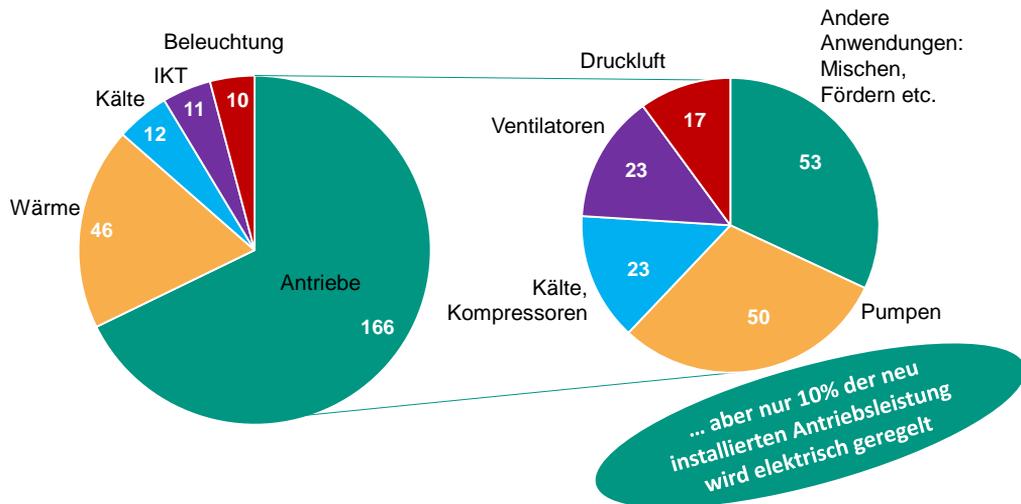


alle Angaben in TWh

Quelle: Energiedaten Gesamtausgabe BMWi, AG Energiebilanzen e.V.

13 Elektrische Antriebe – Ziele der Energiewende in Deutschland

■ Haupt-Energieverbraucher in der Industrie in Deutschland (in TWh, 2016)



alle Angaben in TWh

Quelle: Rationelle Energiegewinnung in der Industrie, Fraunhofer Institut System und Innovationsforschung Karlsruhe; Siemens



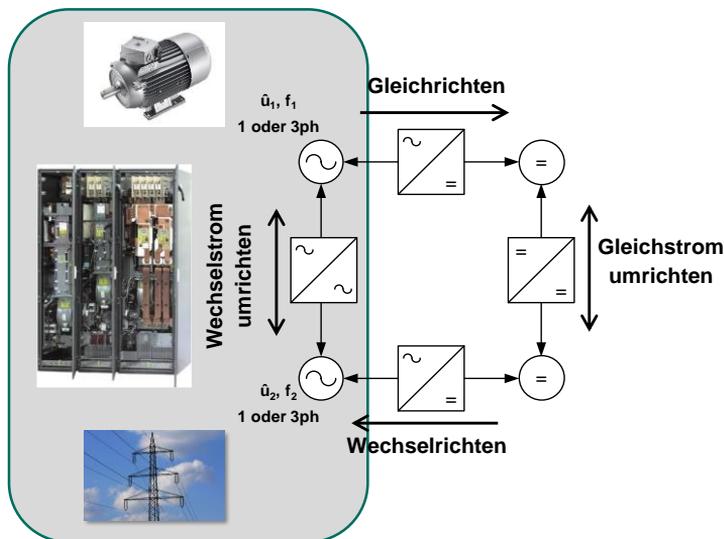
Kap. 13: Elektrische Antriebe
Prof. Dr.-Ing. Marc Hiller

16

Elektrotechnisches Institut (ETI)
Leistungselektronische Systeme



13 Elektrische Antriebe – Steigerung der Energieeffizienz



Quelle: Siemens



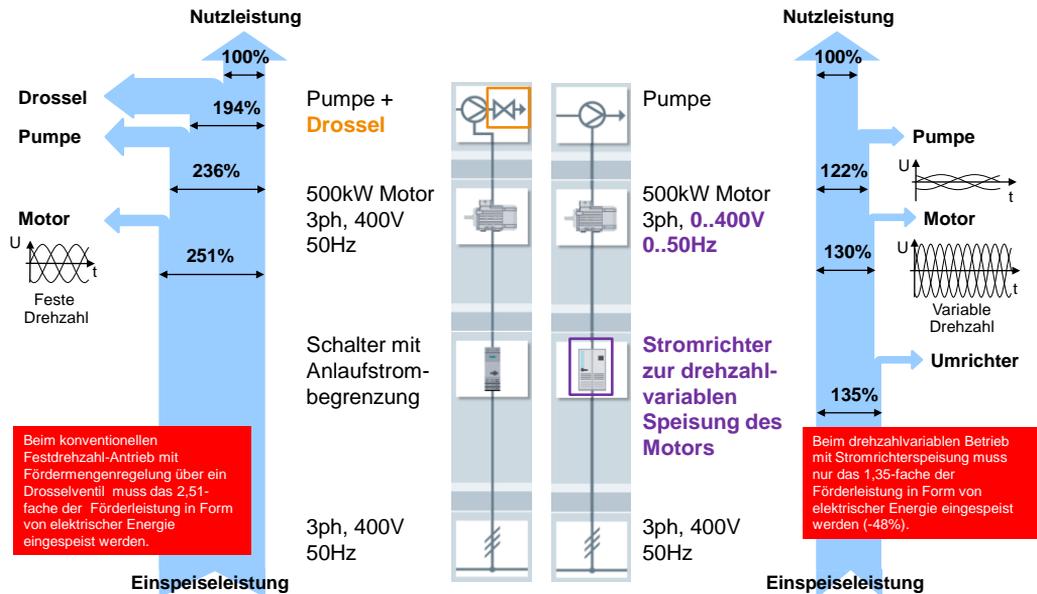
Kap. 13: Elektrische Antriebe
Prof. Dr.-Ing. Marc Hiller

17

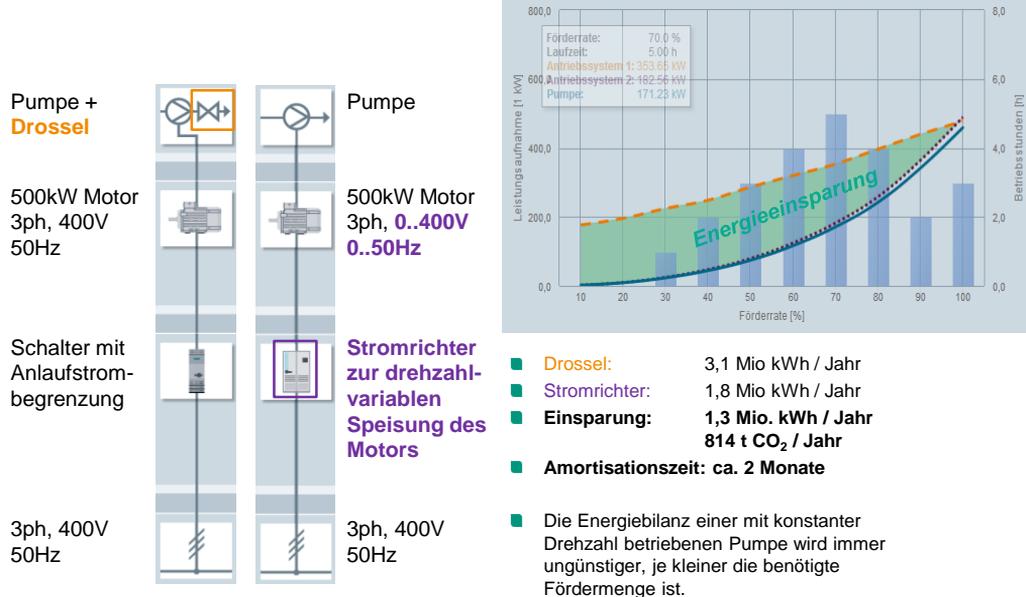
Elektrotechnisches Institut (ETI)
Leistungselektronische Systeme



13 Elektrische Antriebe – Steigerung der Energieeffizienz



13 Elektrische Antriebe – Steigerung der Energieeffizienz



13 Elektrische Antriebe

Kategorie		Kleinspannung Extra Low Voltage (ELV)	Niederspannung Low Voltage (LV)	Mittelspannung* Medium Voltage (MV)
Motorspannung		< ~50 V	< 1000V typisch 3-phasig: 400V, 690V	bis ca. 13,2kV typ.: 2,3/3,3/4,16/6/6,6/10/13,2kV
Leistung		< 500 W	< 10 MW	< 100 MW
Markt- anteil	Stück	97,3%	2,7%	< 0,005%
	Leistung	41%	44%	15%
				

* übliche Bezeichnung für Umrichter (Bez. „Hochspannung“ bei Maschinen üblich)

Quelle: Faulhaber, SEW Eurodrive, Siemens



13 Elektrische Antriebe

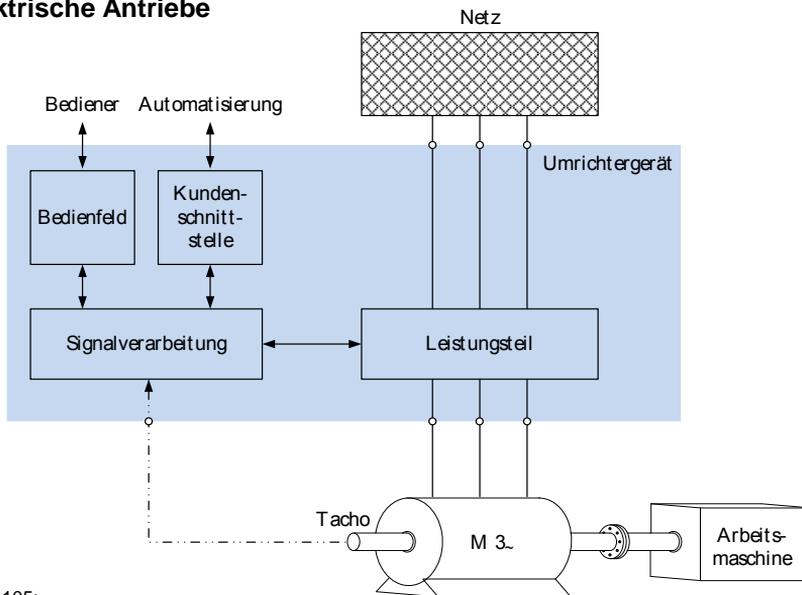
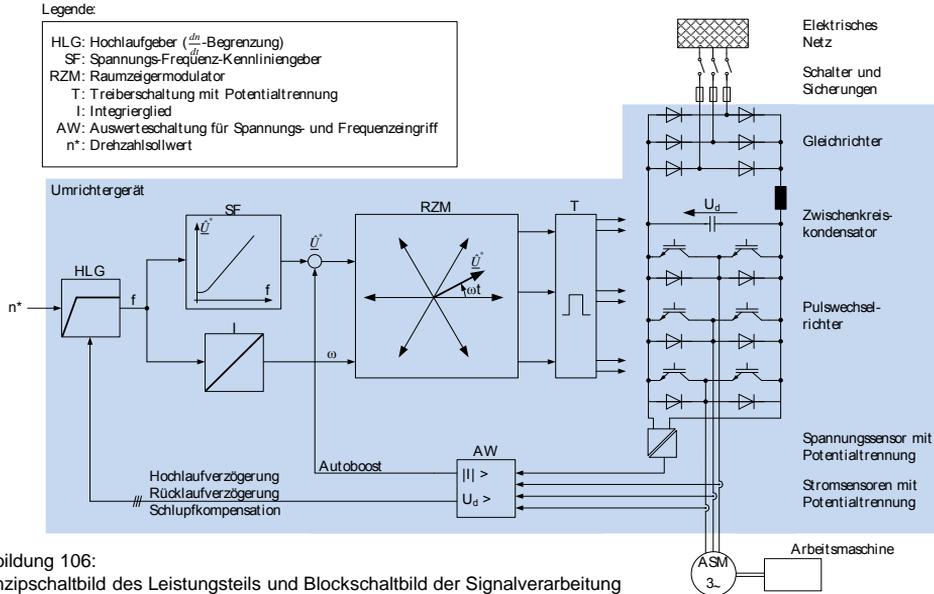


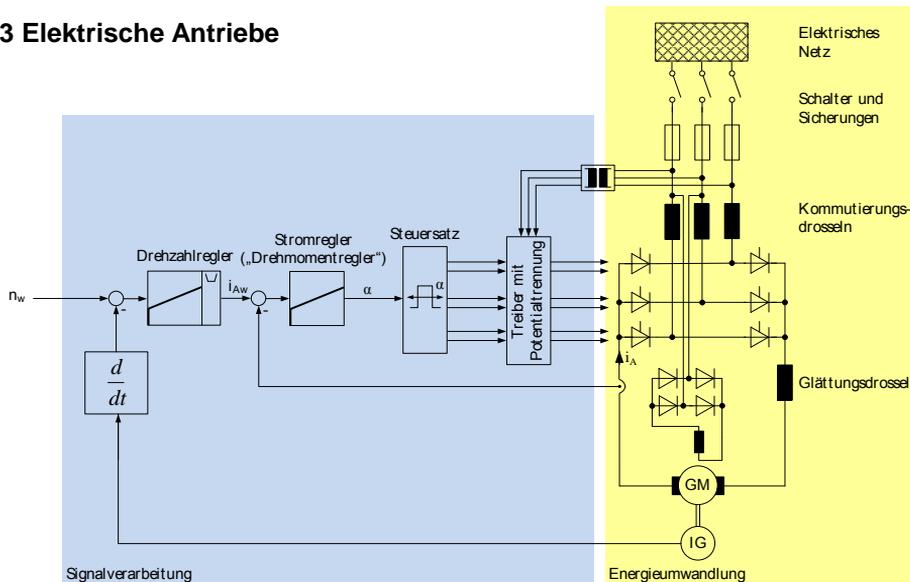
Abbildung 105:
Umrichtergerät zwischen Netz und Motor



13 Elektrische Antriebe



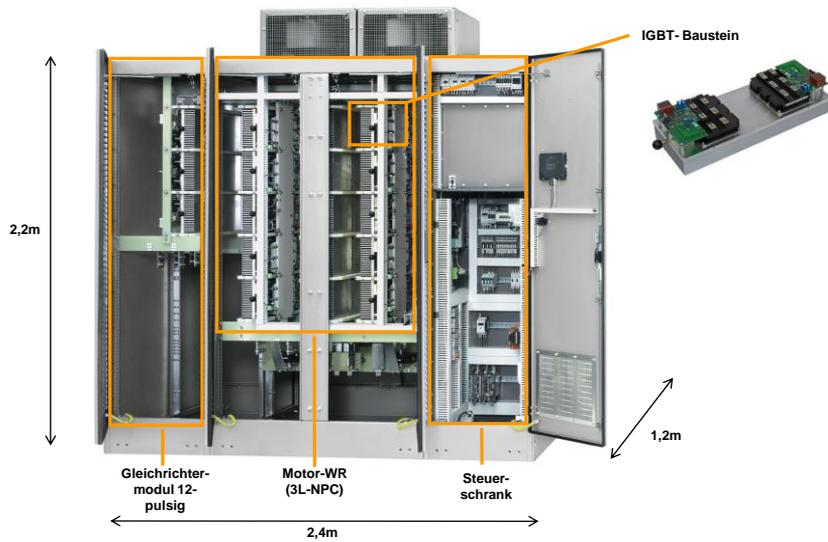
13 Elektrische Antriebe



13 Elektrische Antriebe



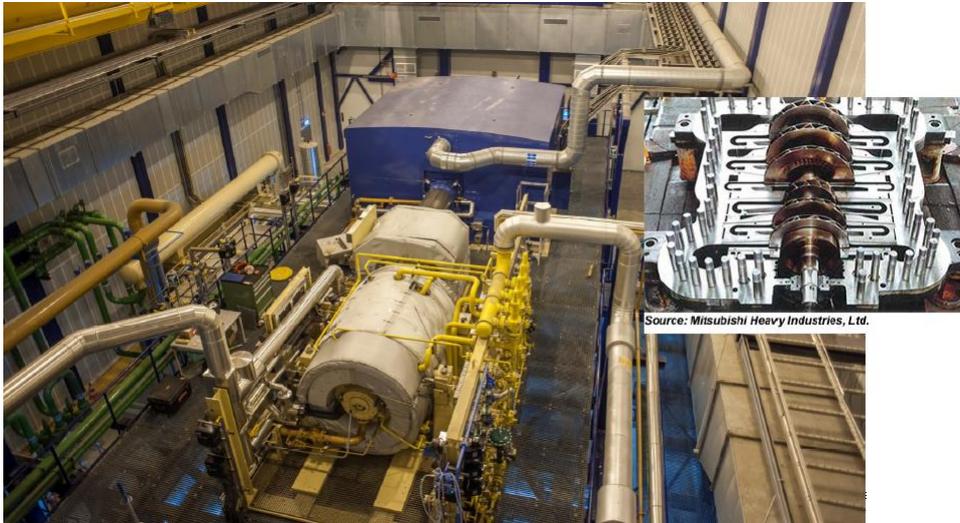
13 Elektrische Antriebe



3L-NPC Umrichter: 4,16kV, 600A, 4,3MVA, luftgeküht (Siemens SINAMICS GM150)

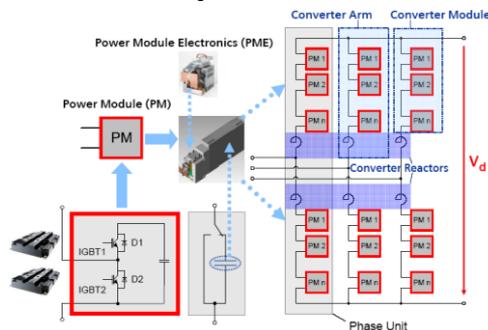
Quelle: Siemens

13 Elektrische Antriebe



Energieübertragung (HGÜ, engl.: HVDC)

- Punkt-zu-Punkt-Übertragung von elektrischer Energie über große Distanzen
- Kriterien:
 - Skalierbare Spannung, d.h. Leistung
 - Wirkungsgrad
 - Hohe Verfügbarkeit
 - Netzurückwirkungen



- Selbstgeführte Hochspannungsgleichstromübertragung (Beispiel: Sylwin1):
 - DC-Nennspannung: $U=640 \text{ kV}$
 - DC-Nennstrom: $I=1350 \text{ A}$
 - $P_{\text{nenn}}=865 \text{ MW}$
- Topologie
 - Modular Multilevel Converter (MMC) mit ca. 2000 Zellen pro Stromrichter (mit 4,5kV-IGBT-Modulen)

Quelle: Siemens

13 Elektrische Antriebe

