

Vorlesung Elektrische Maschinen und Stromrichter

WS 2019/20

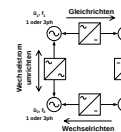
Elektrotechnisches Institut (ETI) – Leistungselektronische Systeme



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



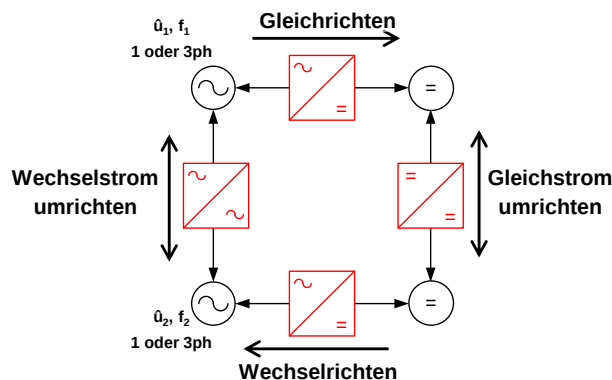
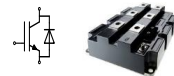
9. Leistungshalbleiter – Definition Leistungselektronik

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



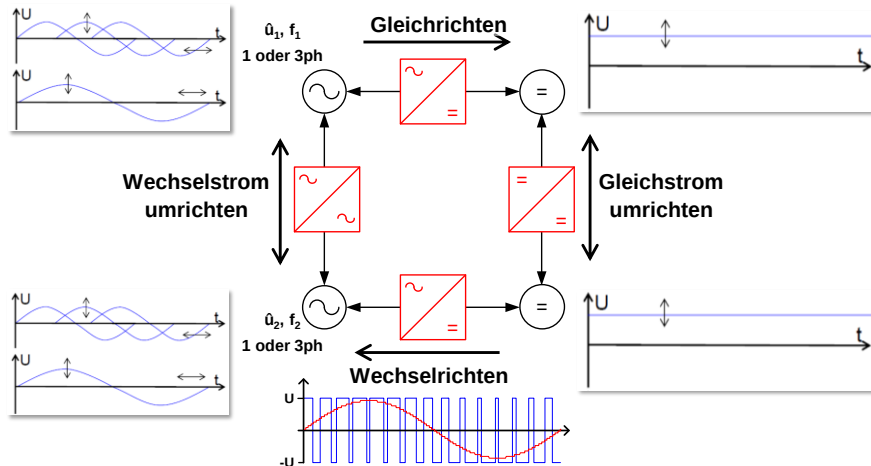
9. Leistungshalbleiter – Definition Leistungselektronik

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

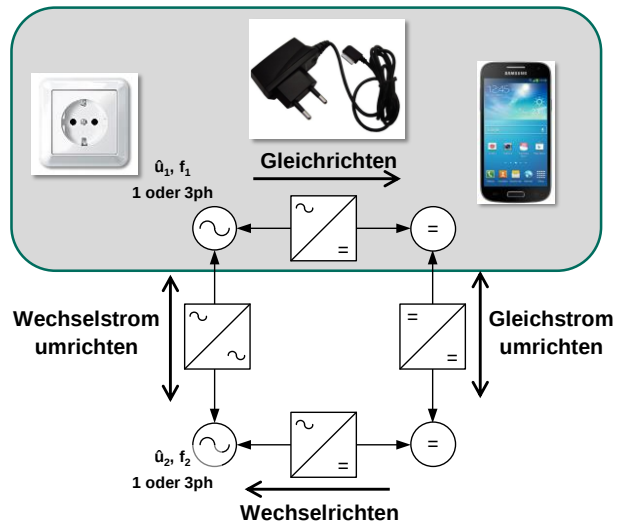
Leistungselektronik ist das Teilgebiet der Elektrotechnik, das sich mit dem **Steuern und Umformen elektrischer Energie** mit Hilfe von **elektronischen Ventilen (Schaltern)** beschäftigt.



9. Leistungshalbleiter – Definition Leistungselektronik

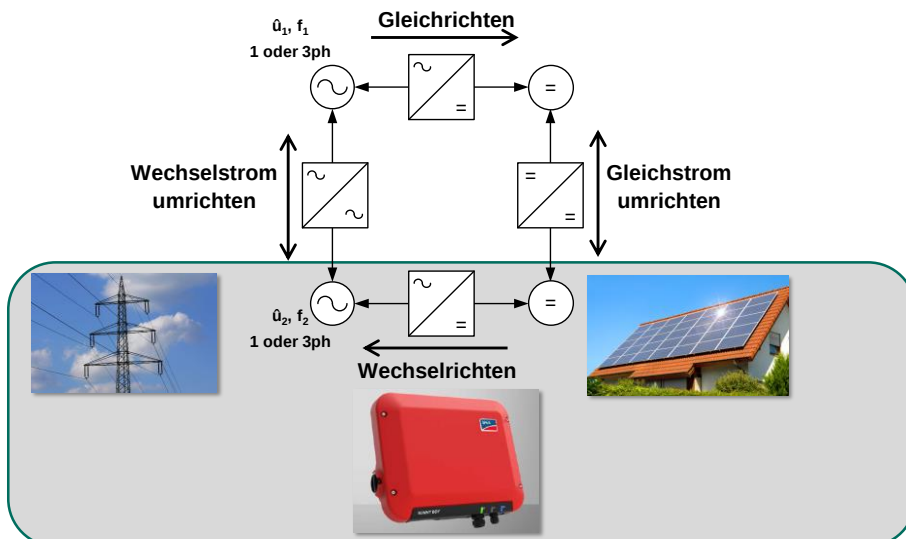
- **Leistungselektronik** ist eine **Basistechnologie** der **Energie – und Automatisierungstechnik** die sich permanent **neue Applikationen** erschließt
- **Deutschland** ist speziell auf dem Gebiet der **Leistungselektronik** im mittleren und hohen Leistungsbereich führend.

9. Leistungshalbleiter – Anwendungen Leistungselektronik



Quelle: Samsung

9. Leistungshalbleiter – Anwendungen Leistungselektronik



Quelle: SMA

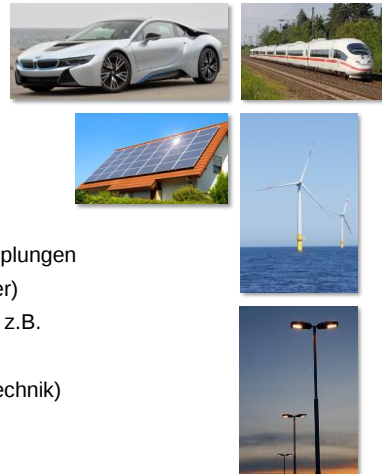
9. Leistungshalbleiter – Leistungsbereiche in der Leistungselektronik

- 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 aller konv. Kraftwerke bzw. aller reg. Energiequellen in Deutschland



9. Leistungshalbleiter – Anwendungen Leistungselektronik

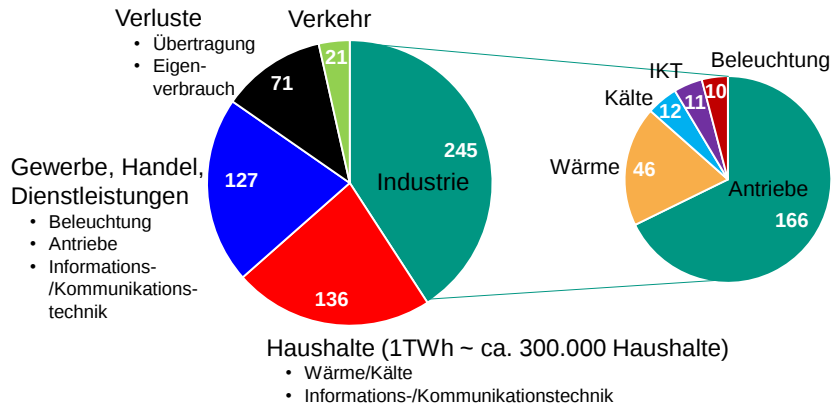
- Elektrische Antriebe
 - Industrieantriebe
 - Traktion (Elektrofahrzeuge, Bahnen)
- Einspeisung verteilter und regenerativer Energiequellen
 - Windenergie, Photovoltaik
 - Brennstoffzellen (z.B. P=1kW-500kW)
- Energieverteilung
 - Hochspannungsgleichstromübertragung HGÜ, Netzkupplungen
 - Power Quality (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 – Anwendungen Leistungselektronik

■ Stromverbrauch 2013 in Dtl.: 600 TWh (2018: 595,6 TWh)

ca. 20% Anteil am gesamten Endenergieverbrauch (Endenergie: 37% Kraftstoffe, 27% Gas, 20% Strom, 5% Kohle)



alle Angaben in TWh

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



Kap. 9: Leistungshalbleiter
Prof. Dr.-Ing. Marc Hiller

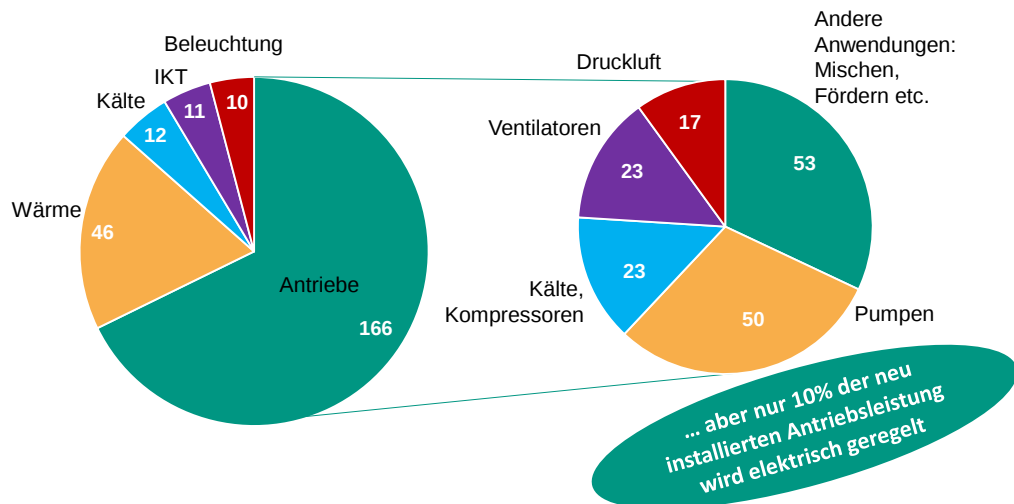
11

Elektrotechnisches Institut (ETI)
Leistungselektronische Systeme



9. Leistungshalbleiter – Anwendungen Leistungselektronik

■ Haupt-Energieverbraucher in der Industrie in Deutschland (in TWh, 2013)



alle Angaben in TWh

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



Kap. 9: Leistungshalbleiter
Prof. Dr.-Ing. Marc Hiller

12

Elektrotechnisches Institut (ETI)
Leistungselektronische Systeme

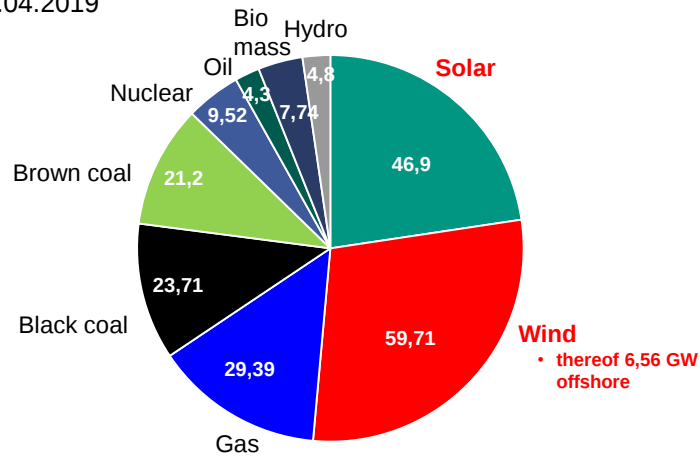


9. Leistungshalbleiter – Anwendungen Leistungselektronik

Installierte Netto-Leistung zur Stromerzeugung in Deutschland (in GW)

■ Gesamt: 207,26 GW

■ Stand: 01.04.2019

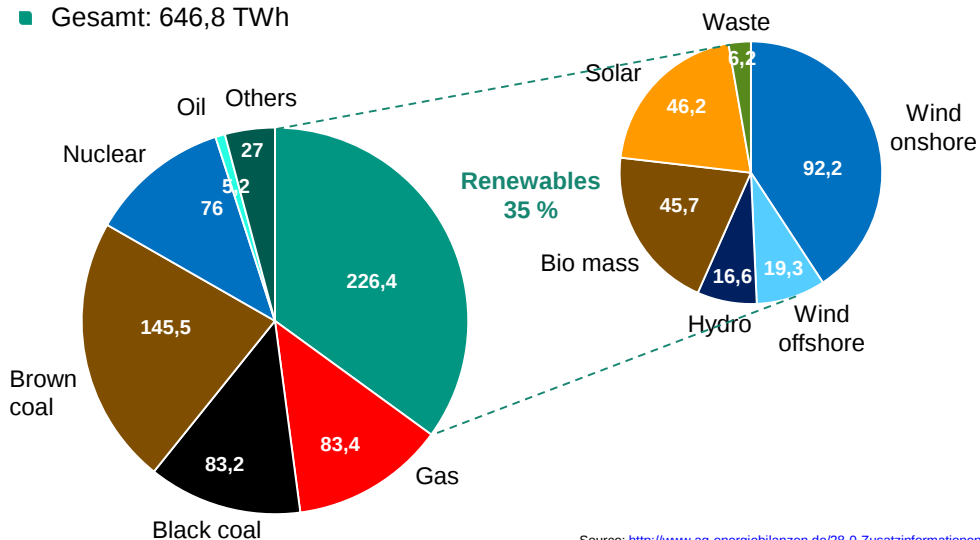


Quelle: https://www.energy-charts.de/power_inst_de.htm

9. Leistungshalbleiter – Anwendungen Leistungselektronik

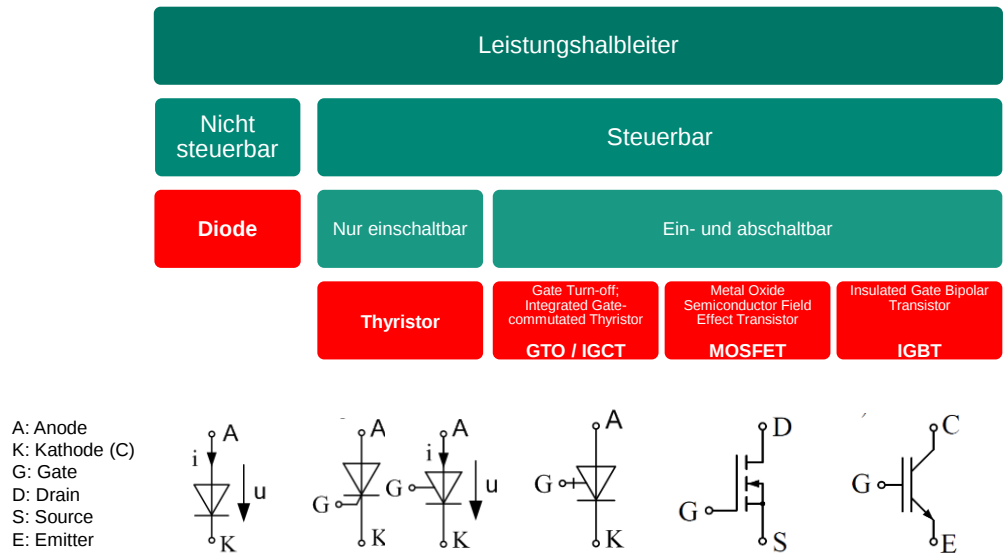
Bruttostromerzeugung in Deutschland 2018 (in TWh)

■ Gesamt: 646,8 TWh

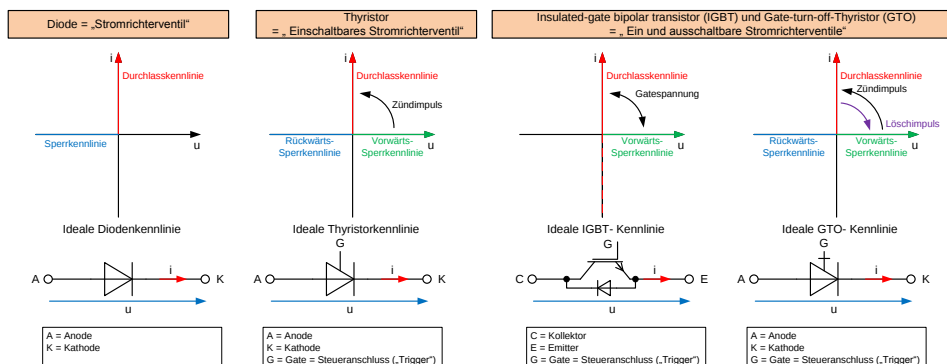


Source: <http://www.ag-energiebilanzen.de/28-0-Zusatzinformationen.html>

9. Leistungshalbleiter – Überblick

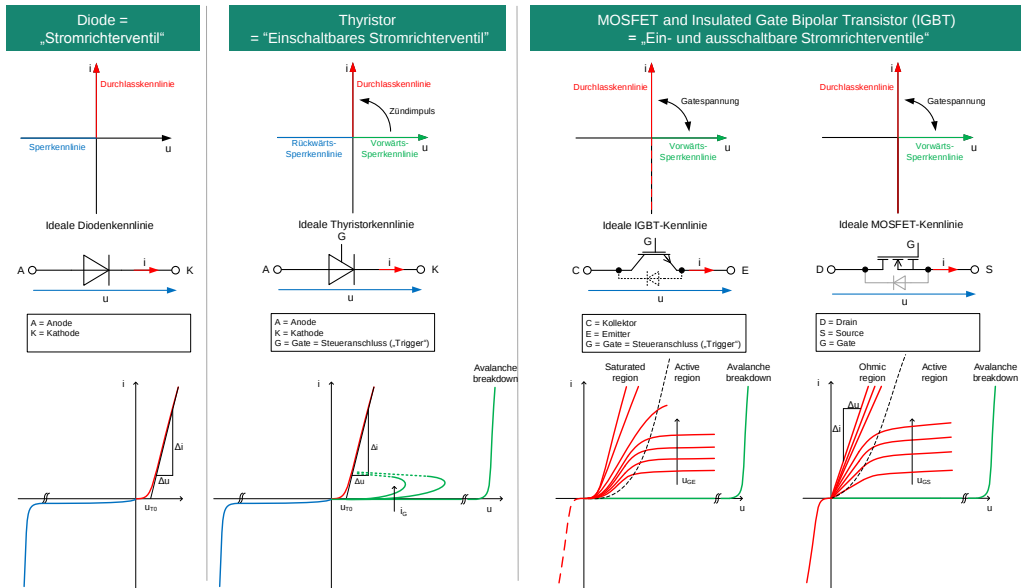


9. Leistungshalbleiter – Idealisierung der Leistungshalbleiterbauelemente



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

9. Leistungshalbleiter – Idealisierung der Leistungshalbleiterbauelemente



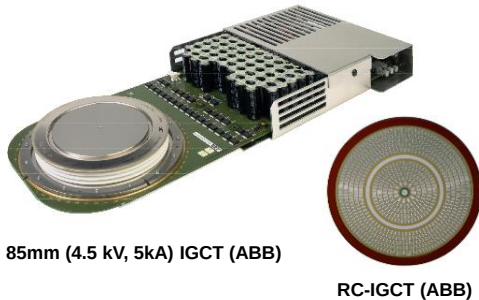
9. Leistungshalbleiter – Überblick

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 Schaltanwendung (i.d.R. max. 80-90% der max. Sperrspg. V_{CES})		
Spannungstransienten	(Über)spannung	Geschalteter Strom (z.B. bei GTO, IGCT, IGBT, MOSFET)	Spannungssteilheit du/dt (z.B. bei GTO)	Stromsteilheit di/dt (z.B. bei Thyristor, IGCT, Reverse Recovery bei Dioden)
Umgebungsbedingungen	Maximale Chip-Temperatur	Mechanische Belastung	Feuchtigkeit	

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_{S} : 2.5 – 10 MVA

Hauptanwendungen

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

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

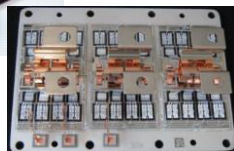
Perspektive

- 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)

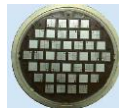
Perspektiven

- 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

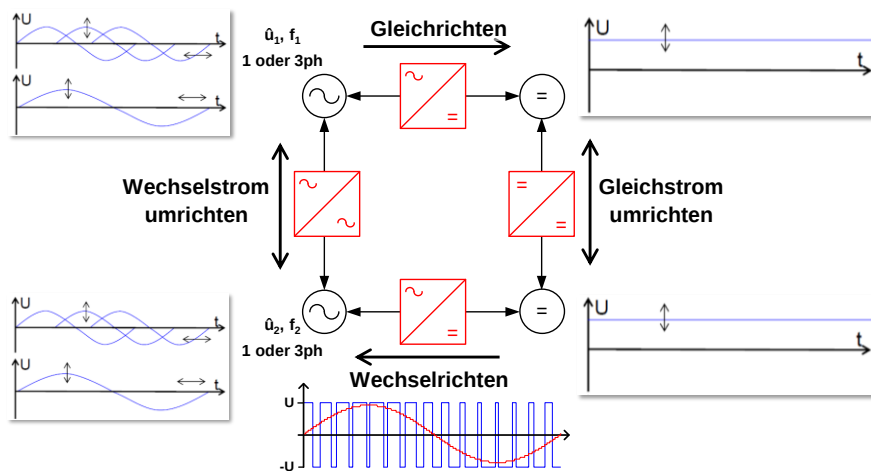
Eigenschaften

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 IGCTs
6. Press pack:
 - Kurzschluss bei Fehler (gut für Reihenschaltung)
 - Meist keine Explosion des Gehäuses
 - Aufwändiger Spannverband für Kontaktierung und Kühlung
 - Hohe Lastwechselfestigkeit

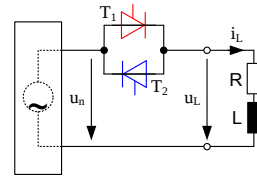
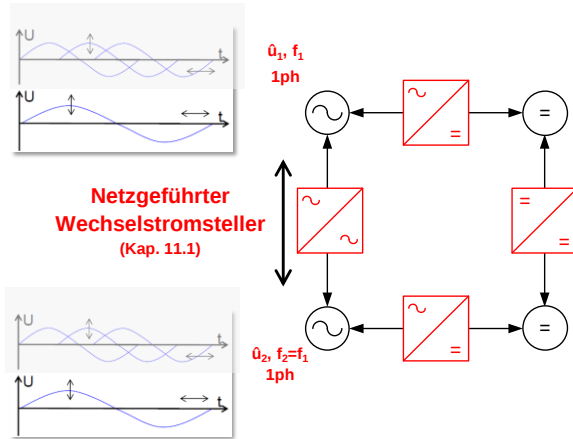
Perspektiven

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

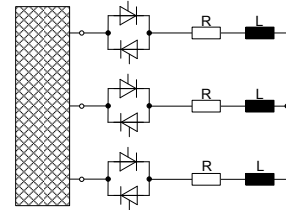
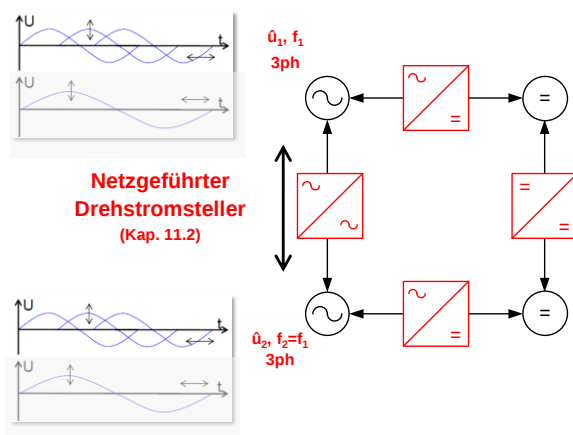
10. Stromrichter



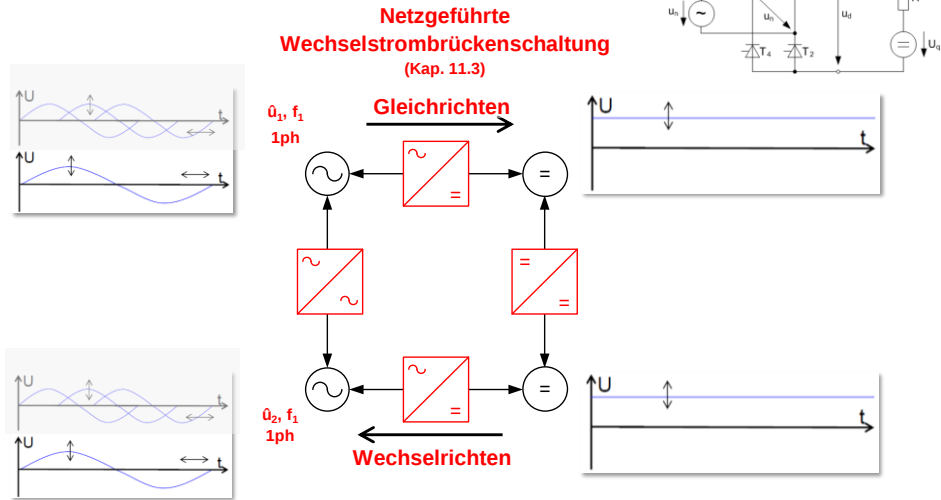
10. Stromrichter – Netzgeführte Stromrichter I



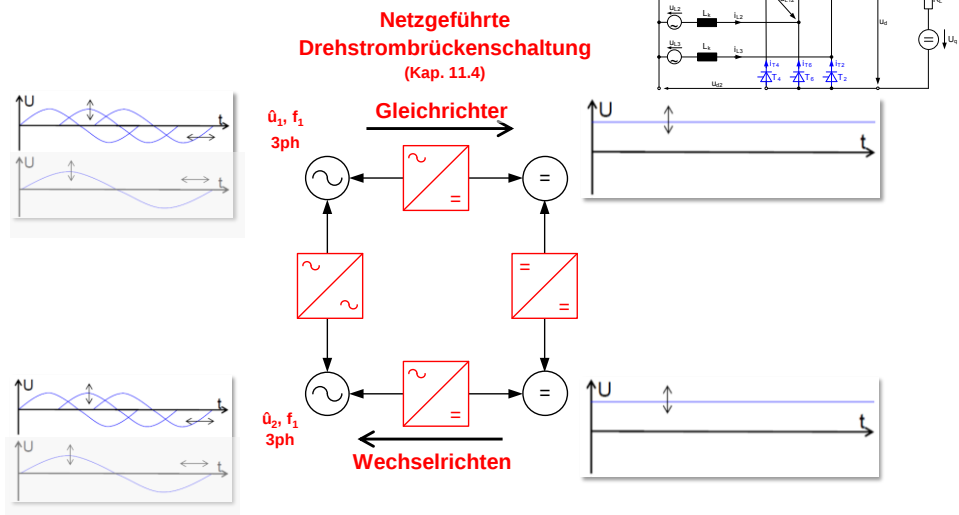
10. Stromrichter – Netzgeführte Stromrichter II



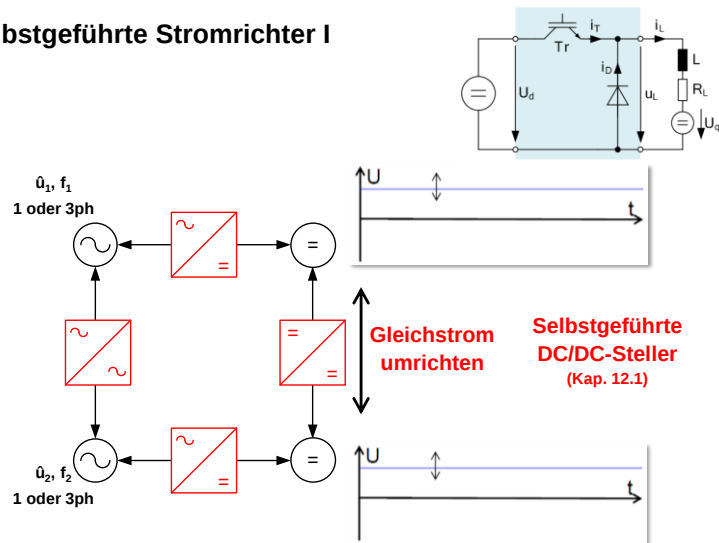
10. Stromrichter – Netzgeführte Stromrichter III



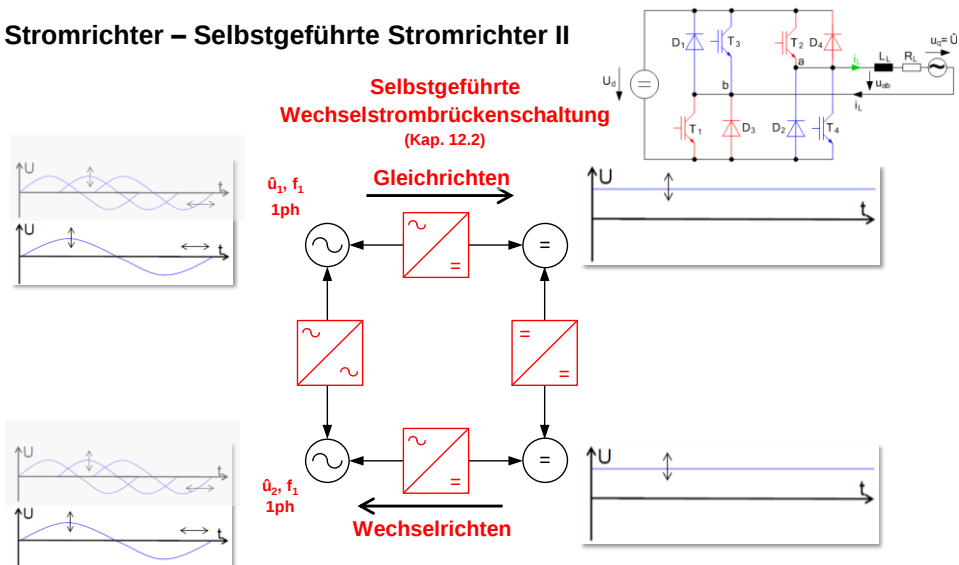
10. Stromrichter – Netzgeführte Stromrichter IV



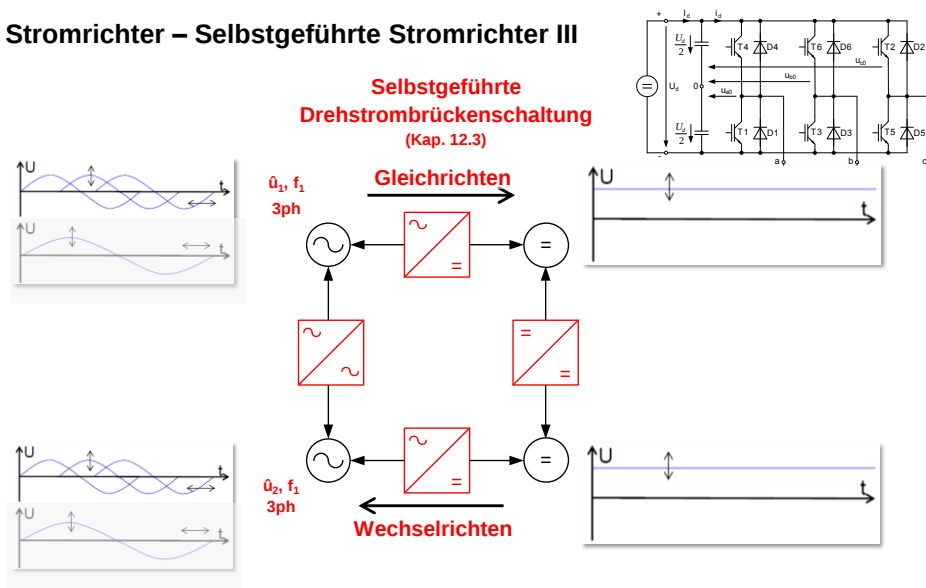
10. Stromrichter – Selbstgeführte Stromrichter I



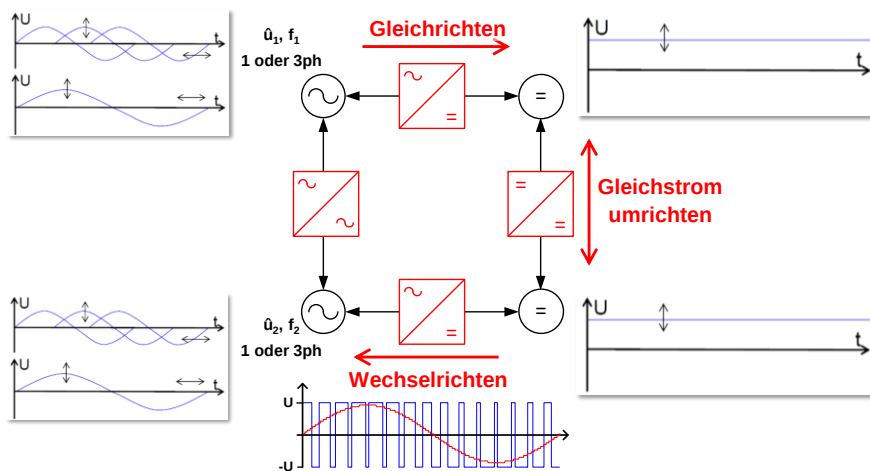
10. Stromrichter – Selbstgeführte Stromrichter II



10. Stromrichter – Selbstgeführte Stromrichter III

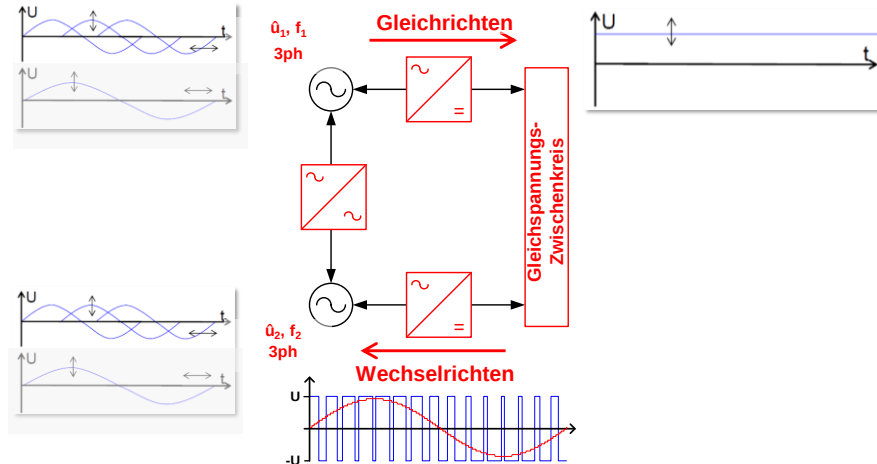


10. Stromrichter – Selbstgeführte Stromrichter IV

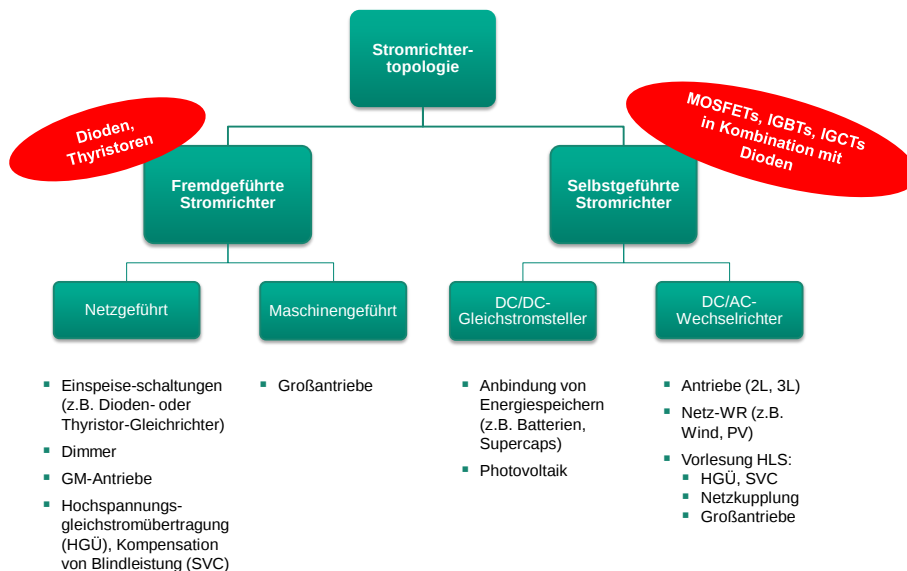


10. Stromrichter – Selbstgeführte Stromrichter IV

Selbstgeführter Zwischenkreisumrichter 3AC – DC – 3AC (Kap. 13)



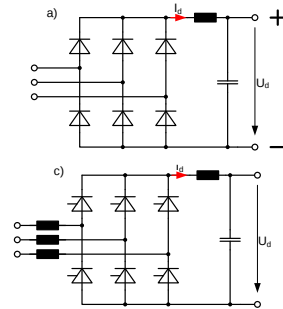
10. Stromrichter – Übersicht



10. Stromrichter – Zusammenfassung

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.**

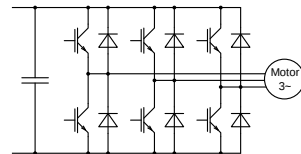


theoretisch auch (praktisch jedoch irrelevant):

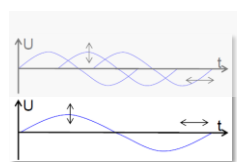
- Stromrichter, die nur kapazitive Kommutierungen ermöglichen
- sind auf Wechselstrom in der Quelle oder der Last angewiesen
- kommen mit Leistungshalbleitern aus, die nur abschaltbar sind

Selbstgeführte Stromrichter

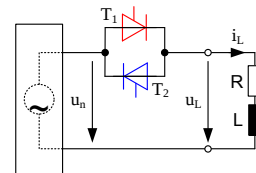
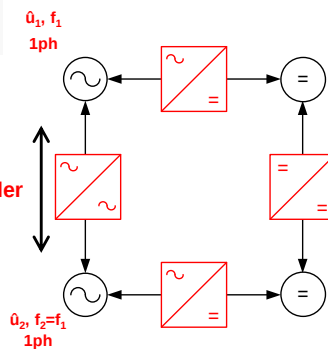
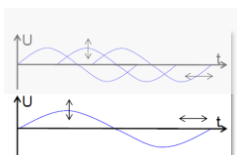
- Stromrichter, die induktive und kapazitive Kommutierungen ermöglichen,
- **Ein- und abschaltbare Leistungshalbleiter** erforderlich.



11.1 Wechselstromsteller 1AC – 1AC



Netzgeführter Wechselstromsteller
(Kap. 11.1)



11.1 Wechselstromsteller 1AC – 1AC

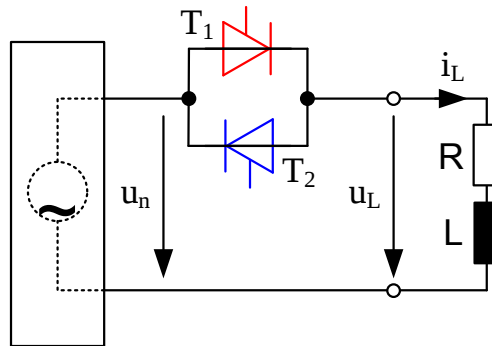


Abbildung 74a)

11.1 Wechselstromsteller 1AC – 1AC

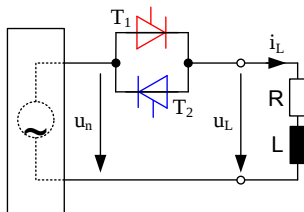


Abbildung 74a)

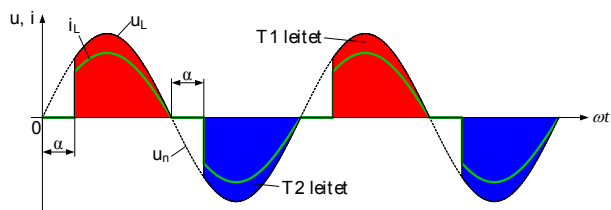


Abbildung 74b)

Wechselstromsteller bei ohm'scher Last

11.1 Wechselstromsteller 1AC – 1AC

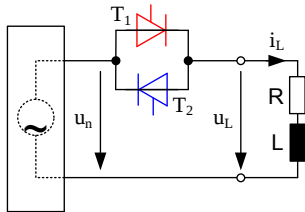


Abbildung 74a)

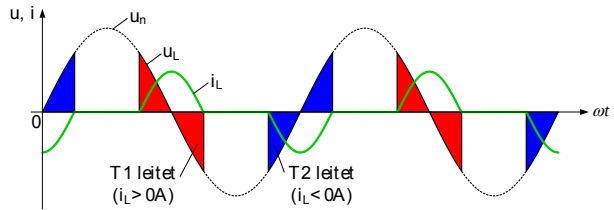


Abbildung 74c)
Wechselstromsteller bei induktiver Last

11.1 Wechselstromsteller 1AC – 1AC

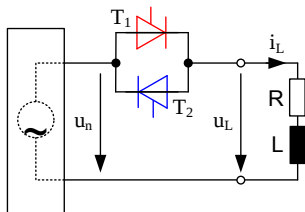


Abbildung 74a)

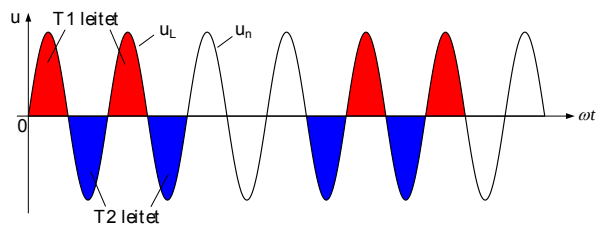
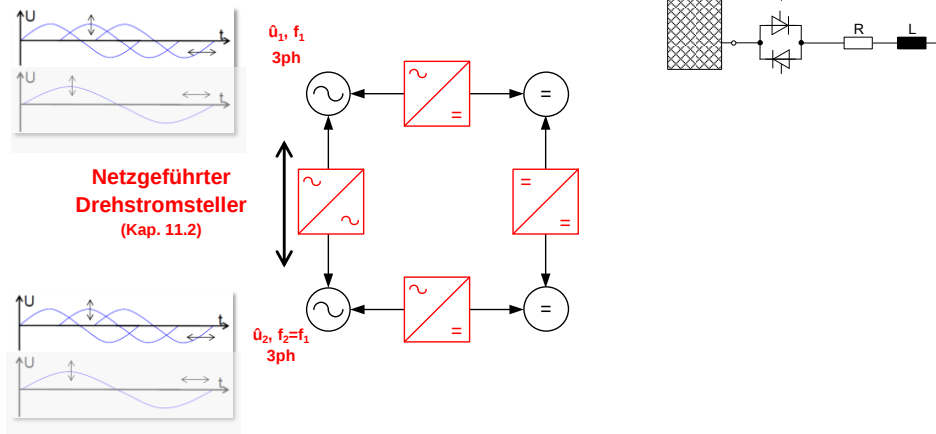


Abbildung 74d)
Wechselstromsteller bei Schwingungspaketsteuerung
mit ohm'scher Last

11.2 Drehstromsteller 3AC – 3AC



11.2 Drehstromsteller 3AC – 3AC

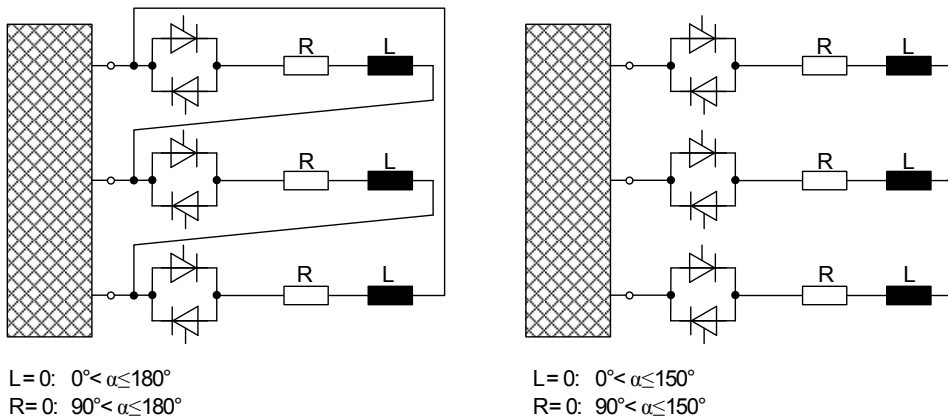
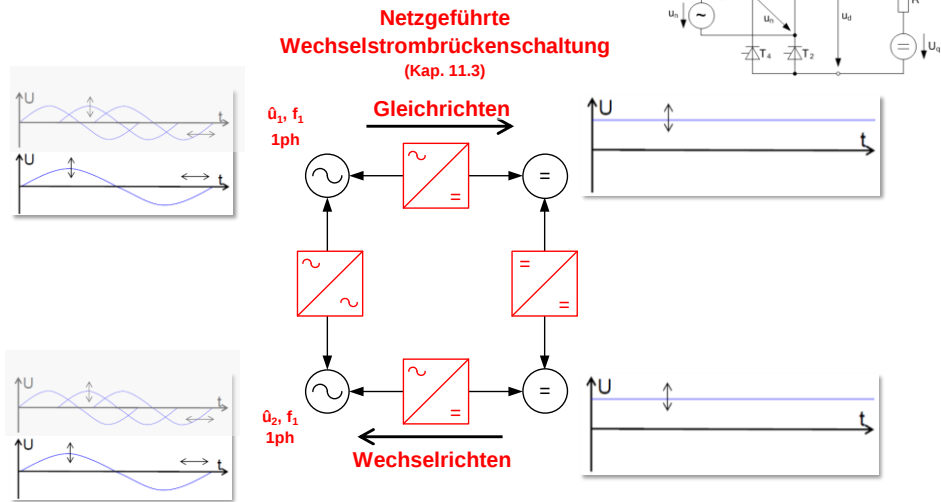


Abbildung 75a):
Drehstromsteller in Dreieckschaltung

Abbildung 75b):
Drehstromsteller in Sternschaltung ohne
Sternpunktanschluss

11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC



11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC

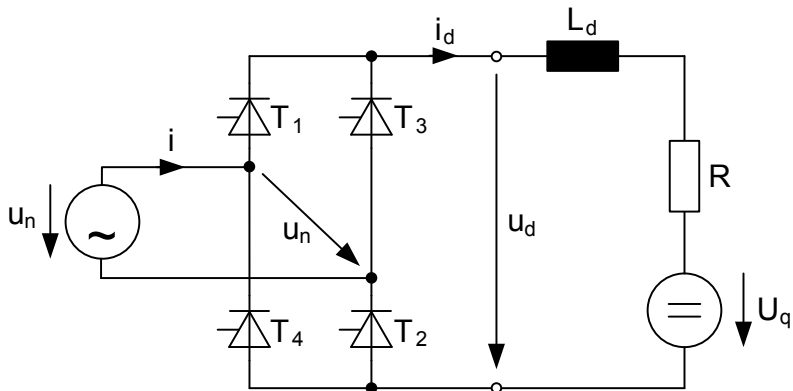


Abbildung 76a):
Netzgeführte Wechselstrombrückenschaltung

11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC

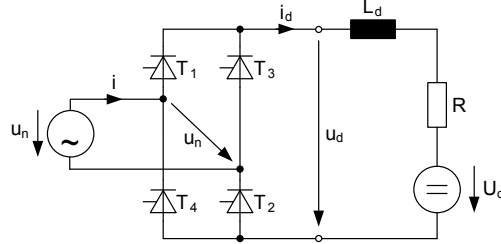


Abbildung 76a):
Netzgeführte
Wechselstrombrücken-
schaltung

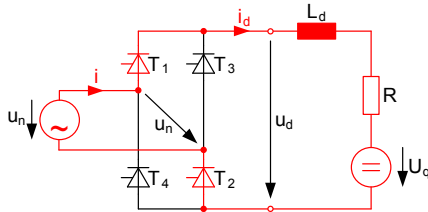


Abbildung 76b):
Stromfluss durch T1 und T2

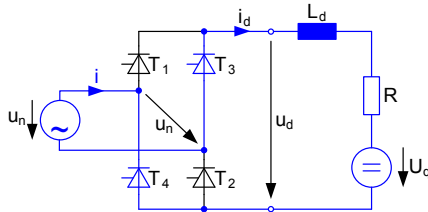
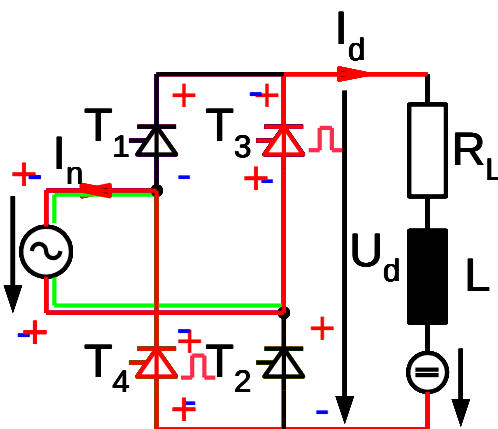


Abbildung 76c):
Stromfluss durch T3 und T4

11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC



11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC

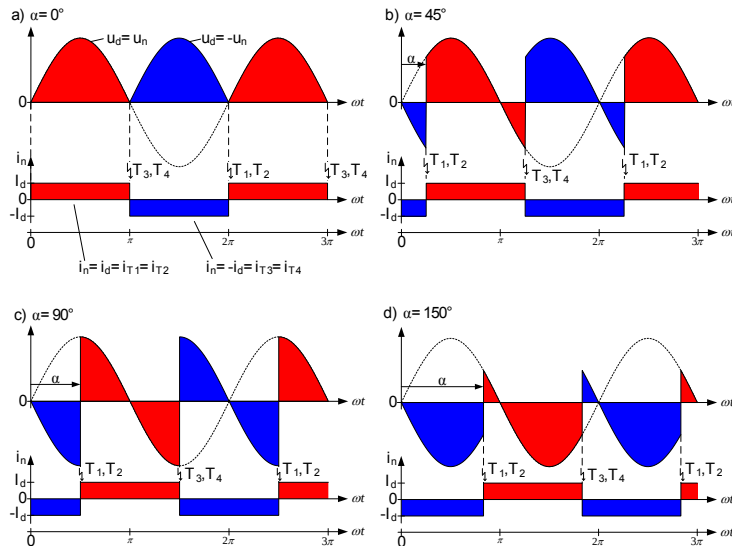


Abbildung 77: Ungelättete Ausgangsspannung $u_d(t)$ und Netzstrom $i_n(t)$ bei der Wechselstrom-brückenschaltung mit verschiedenen Steuerwinkeln

11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC

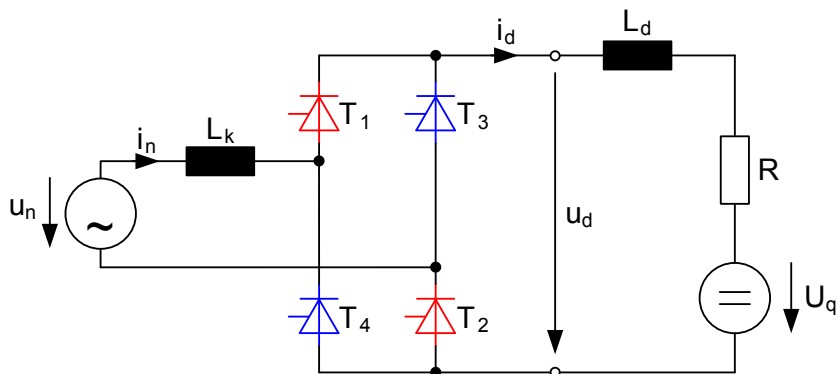


Abbildung 78: Schaltbild der netzgeführten Wechselstrombrückenschaltung mit $L_k > 0$

11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC

a) $\alpha = 45^\circ$

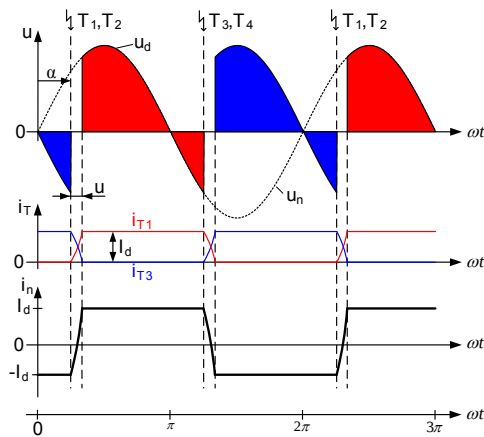


Abbildung 79a):
Ströme und Spannungen für $\alpha=45^\circ$, $u=20^\circ$

b) $\alpha = 150^\circ$

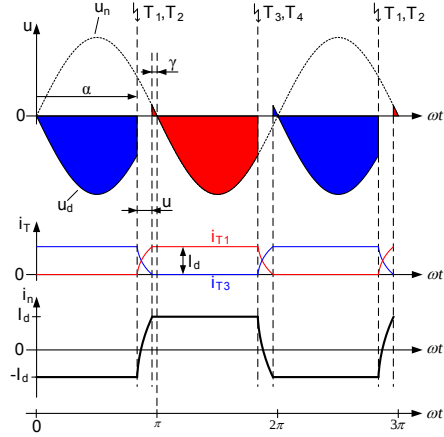


Abbildung 79b):
Ströme und Spannungen für $\alpha=150^\circ$, $u=20^\circ$

11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC

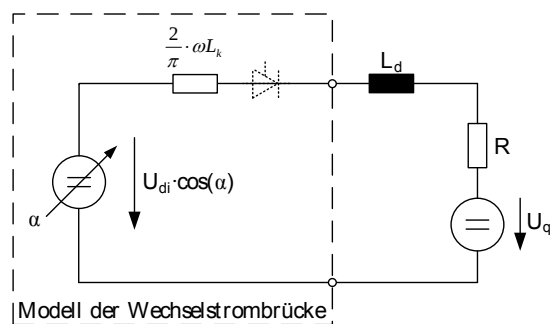


Abbildung 80:
Mittelwert-Modell für das ausgangsseitige Verhalten der netzgeführten Wechselstrombrückenschaltung mit Glättungsdrossel und Gegenspannung

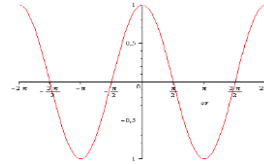
11.3 Netzgef. Wechselstrombrückenschaltung 1AC – DC

Fourieranalyse - Symmetrieeigenschaften

1. Achsen-/Spiegelsymmetrie (gerade Funktion)

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

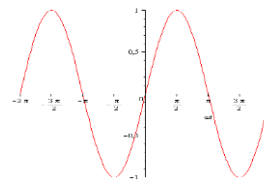
$$a_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) \cos(k\omega t) d\omega t \quad k = (1, 2, 3, \dots)$$



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

Montag (MTI-HS) 09:45 Uhr - 11:15 Uhr		Donnerstag (Fritz-Haller-HS) 08:00 Uhr - 09:30 Uhr	
14.10.	EMS V1	17.10.	EMS Ü1
21.10.	EMS V2	24.10.	EMS Ü2
28.10.	EMS V3	31.10.	EMS Ü3
04.11.	EMS V4	07.11.	EMS Ü4
11.11.	EMS V5	14.11.	EMS Ü5
18.11.	EMS V6	21.11.	EMS Ü6
25.11.	EMS V7	28.11.	EMS Ü7
02.12.	EMS V8	05.12.	EMS Ü8
09.12.	EMS V9	12.12.	EMS Ü9
16.12.	EMS V10	18.12.	EMS Ü10
23.12.	keine Vorlesung	09.01.	EMS Ü11
13.01.	EMS V11	16.01.	EMS Ü12
20.01.	EMS V12	23.01.	EMS Ü13
27.01.	EMS V13	30.01.	EMS Ü14
03.02.	EMS V14	06.02.	EMS Ü15

- V Vorlesung Braun
- V Vorlesung Hiller
- Ü Übung