



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Elektrische Maschinen,
Antriebe und Bahnen
TU Braunschweig
- Professur Leistungselektronik -



Grundlagen der elektrischen Energietechnik

Teil 3: Grundlagen der Leistungselektronik

Vorlesung (8)

Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz

Institut für Elektrischen Maschinen, Antriebe und Bahnen - IMAB

Was machen wir heute ?

1. Einführung in die Leistungselektronik
 - 1.1. Aufgaben und Komponenten der Leistungselektronik
2. Leistungshalbleiter
 - 2.1. Bipolare Leistungshalbleiter: PN-Übergang, pn-Diode, Bipolartransistor, Thyristor, GTO
 - 2.2. Feldgesteuerte Leistungshalbleiter: MOSFET, IGBT
3. Netzgeführte Stromrichter (Stromrichterschaltungen mit Dioden und Thyristoren)
 - 3.1. Gleichrichter – ungesteuert
 - 3.1.1 Mittelpunktschaltungen: M1U, M2U, M3U
 - 3.1.2 Brückenschaltungen: B2U, B6U
 - 3.2. Gleichrichter – gesteuert
 - 3.2.1. M1C, M2C, M3C, B2C, B6C
4. Selbstgeführte Stromrichter (Stromrichterschaltungen mit MOSFET und IGBT)
 - 4.1. Gleichstromsteller
 - 4.1.1. Tiefsetzsteller
 - 4.1.2. Hochsetzsteller
 - 4.1.3. Zweiquadrantensteller
 - 4.1.4. Vierquadrantensteller (Vollbrücke)

4.2. Umrichter

4.2.1. Umrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis (ein- und dreiphasig)

Umrichter

- In der elektrischen Antriebstechnik wird der Begriff Umrichter häufig im Sinne eines Stromrichters eingesetzt, der
 - aus einem Wechselstrom- bzw. Drehstromnetz konstanter Frequenz und Spannung
 - eine Ausgangsspannung mit variabler Frequenz und Spannung erzeugt,um die Drehrichtung und Drehzahl von Drehstrommotoren zu steuern.
- Man spricht hier auch von Frequenzumrichter.

Man unterscheidet zwischen

Zwischenkreis-Umrichter und **Direktumrichter**:

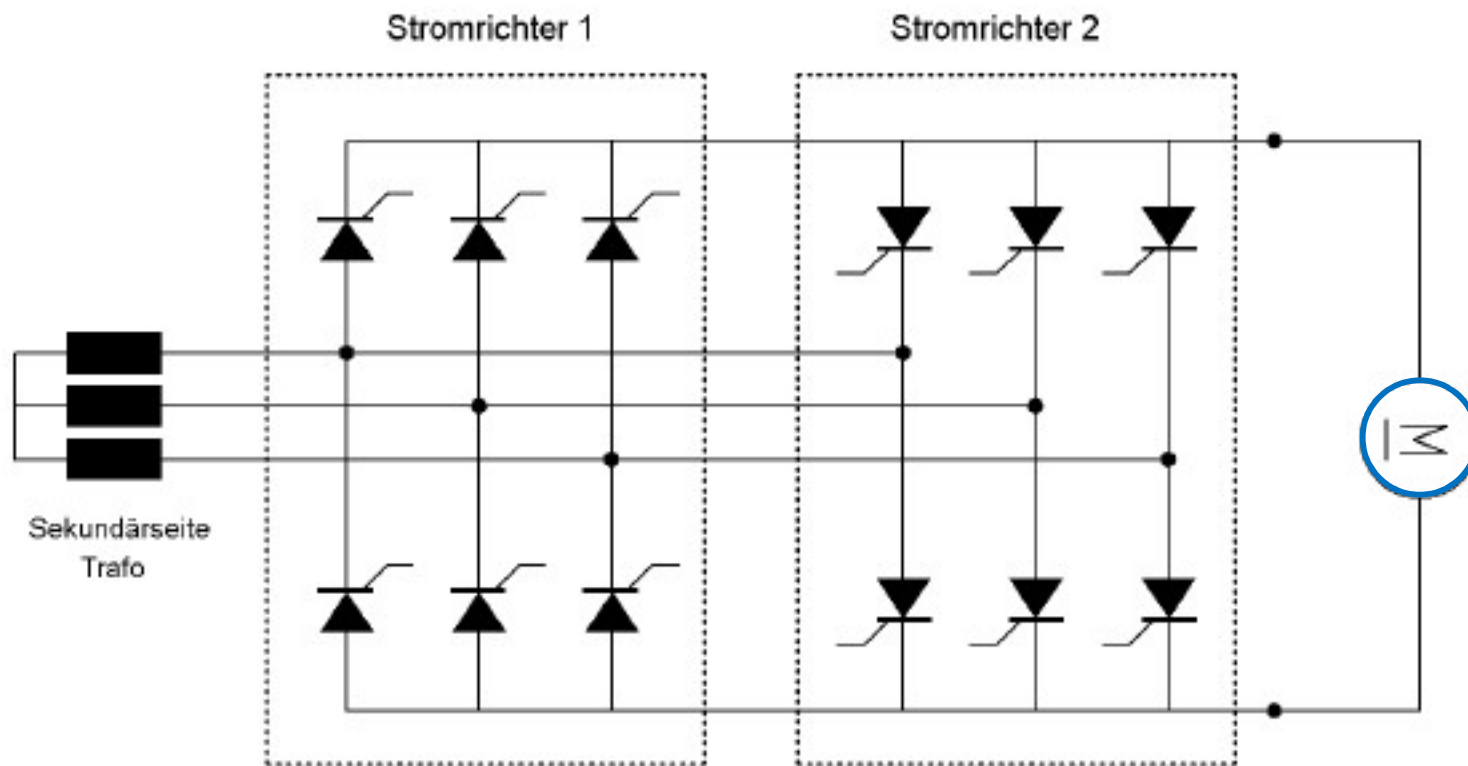
- Bei **Zwischenkreis-Umrichter** (auch: Umrichter mit Zwischenkreis) wird die elektrische Energie zunächst in einem Zwischenkreis gespeichert.

Die Anordnung enthält die folgende **drei** Stufen:

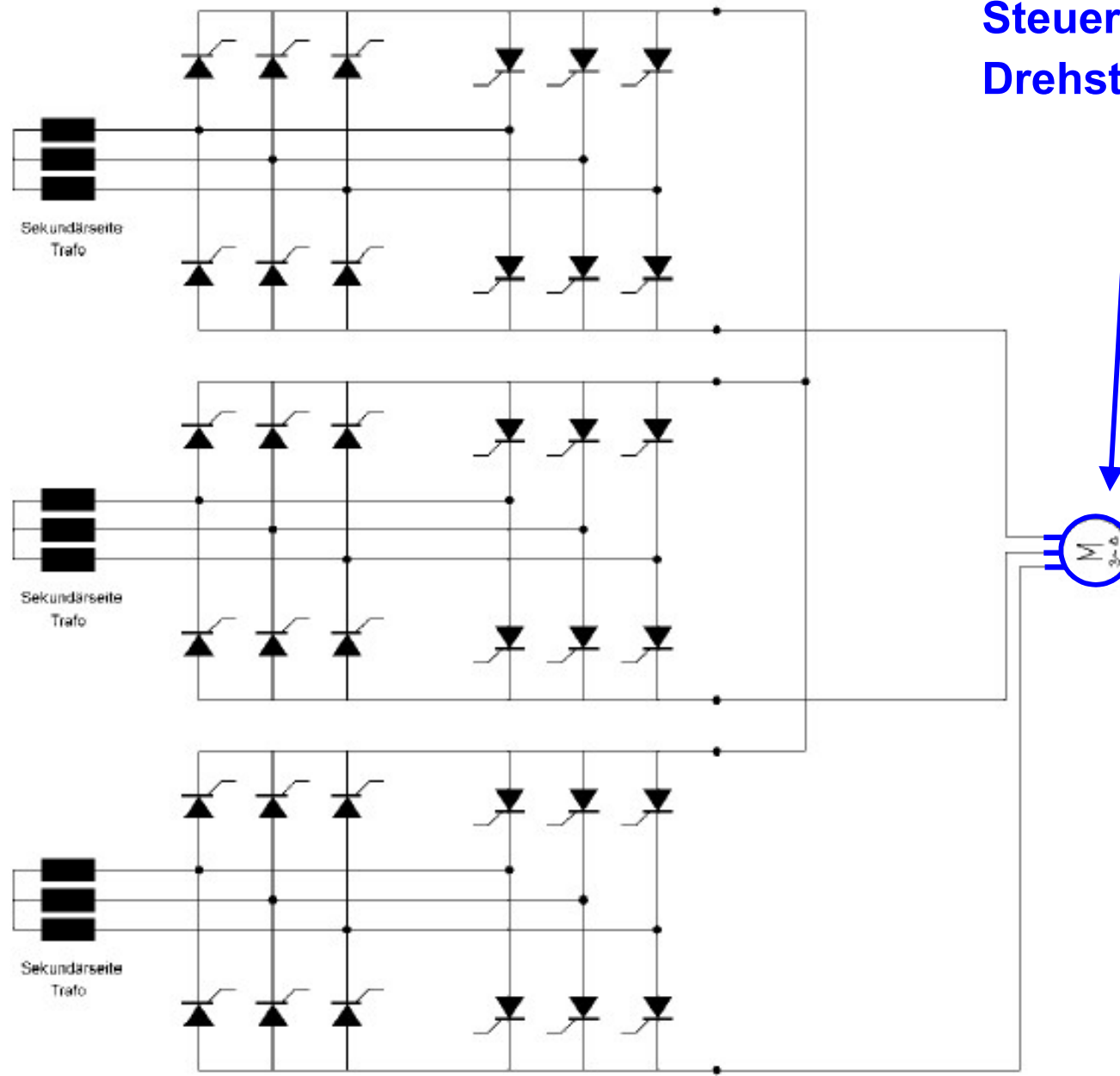
1. einen eingangsseitigen Gleichrichter
2. einen nachgeschalteten Zwischenkreis
3. einen nachgeschalteten Wechselrichter

- Beim **Direktumrichter** entfällt die Zwischenspeicherung elektrischer Energie.
 - Der Direktumrichter besteht aus zwei gegeneinander geschalteten Stromrichtern (= gesteuerte Gleichrichterbrücken-Schaltungen) pro Phase.
 - Stromrichter 1 kann in eine Richtung Strom führen, dagegen führt Stromrichter 2 den Strom in der anderen Richtung.

Direktumrichter - zur Steuerung einer Gleichstrommaschine



- Bei der Ansteuerung ist darauf zu achten, dass niemals beide Stromrichter gleichzeitig Strom führen.
- Die Ausgangsfrequenz variabel (jedoch auf den halben Wert der Eingangsfrequenz beschränkt.)

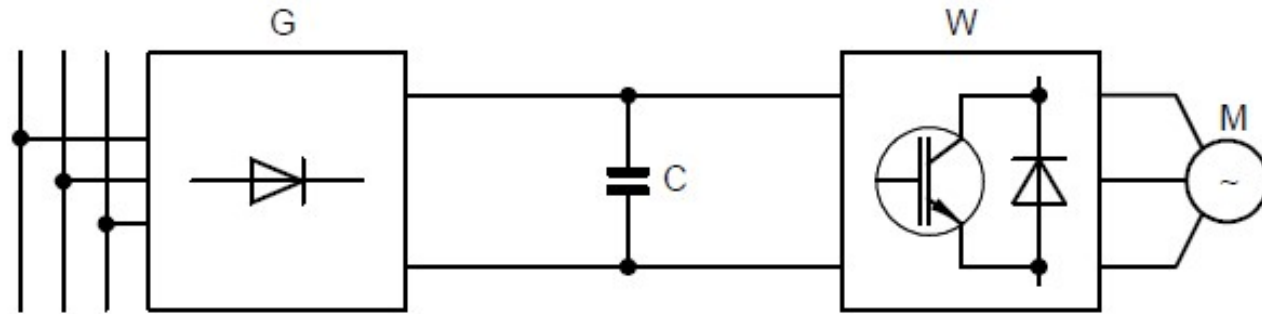


- Pro Motorphase wird ein (steuerbares) Stromrichterpaar benötigt.
- Jedes Stromrichterpaar bedient damit eine Motorphase.
- Transformatoren werden benötigt um Kurzschlüsse zwischen den Phase zu verhindern.

(Wechselstrom-)Umrichter mit Zwischenkreis

- Man unterscheidet in
 - **Spannungszwischenkreis** (Voltage Source Inverter, VSI) mit Zwischenkreiskondensator (C)
 - **Stromzwischenkreis** (Current Source Inverter, kurz CSI) mit Zwischenkreisdrossel (L).

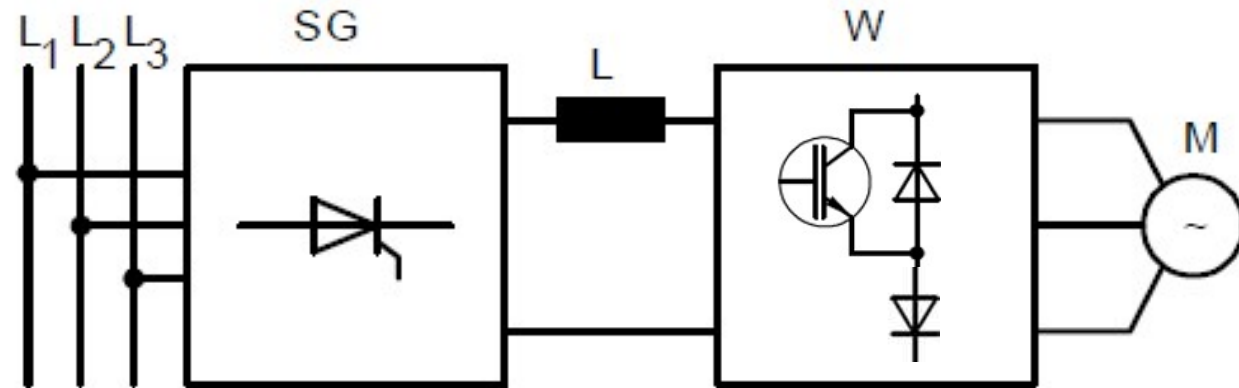
Umrichter mit Spannungs- zwischenkreis



G: ungesteuerter Gleichrichter
C: Glättung- (Stütz-) Kondensator
W: Wechselrichter
M: Drehstrommotor (ASM)

- Merkmal dieses Umrichters-Typs ist, dass im Zwischenkreis eine eingepreßte Spannung vorhanden ist. Zur Glättung der Zwischenkreisspannung wird im Allgemeinen parallel zur Gleichspannung ein Stützkondensator angeordnet.
- Der nachgeschaltete selbstgeführte Wechselrichter verteilt die Zwischenkreisspannung periodisch auf die einzelnen Stränge des Drehstrommotors.

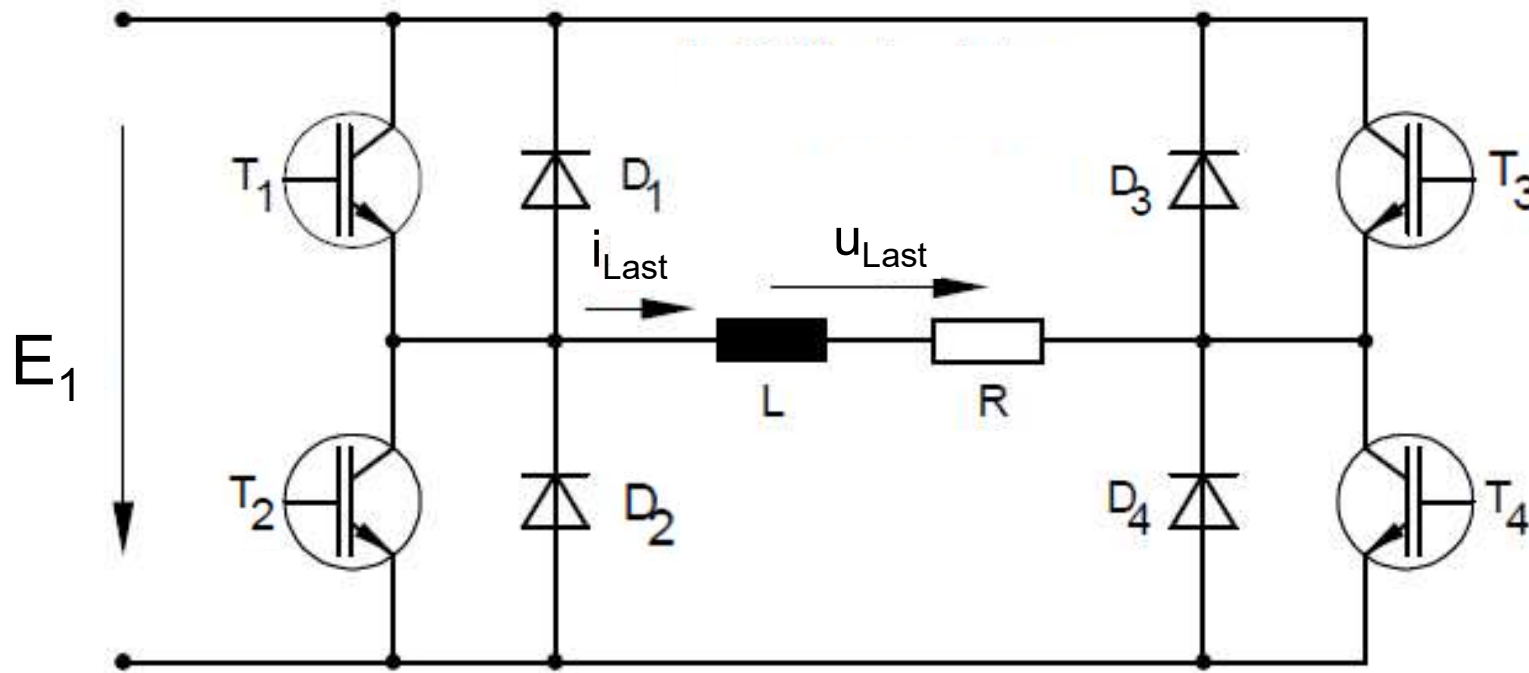
Umrichter mit Strom- zwischenkreis



SG : steuerbarer Gleichrichter
W : Wechselrichter
L : Zwischenkreisinduktivität
M : Drehstrommotor (ASM)

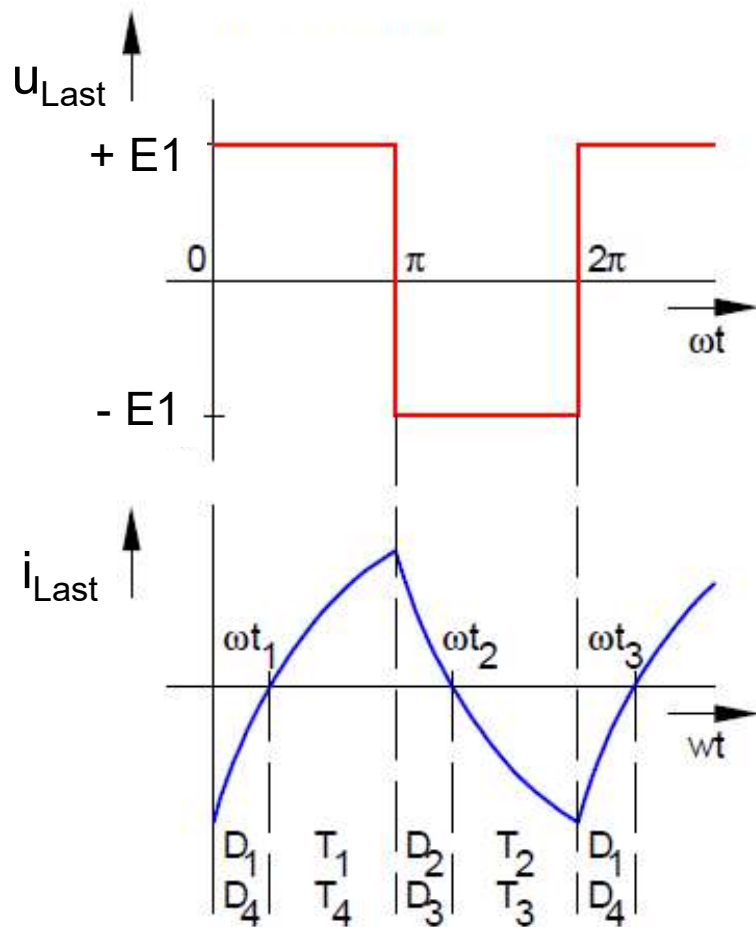
- Kennzeichnend für diesen Umrichter-Typs ist, dass im Zwischenkreis ein eingprägter Gleichstrom fließt. Der Zwischenkreis enthält eine Glättungsinduktivität, die zu einem im Zwischenkreis fließenden eingprägten Strom führt. Ein netzseitig angeordneter steuerbarer Gleichrichter liefert eine einstellbare Gleichspannung.
- Der nachgeschaltete selbstgeführte Wechselrichter verteilt den Zwischenkreisstrom periodisch auf die einzelnen Stränge des Drehstrommotors.

Einphasiger Wechselrichter mit eingepprägter Spannung (Einphasen-Spannungswechselrichter)



- Die Schaltung des Vierquadrantenstellers ist auch zur Bildung eines Einphasen-Spannungs-Wechselrichters geeignet .
- Die aus R, L bestehende Last bildet einen Wechselstromverbraucher

Einphasen-Spannungswechselrichter: Grundfrequenzsteuerung (auch „Blocksteuerung“ genannt)

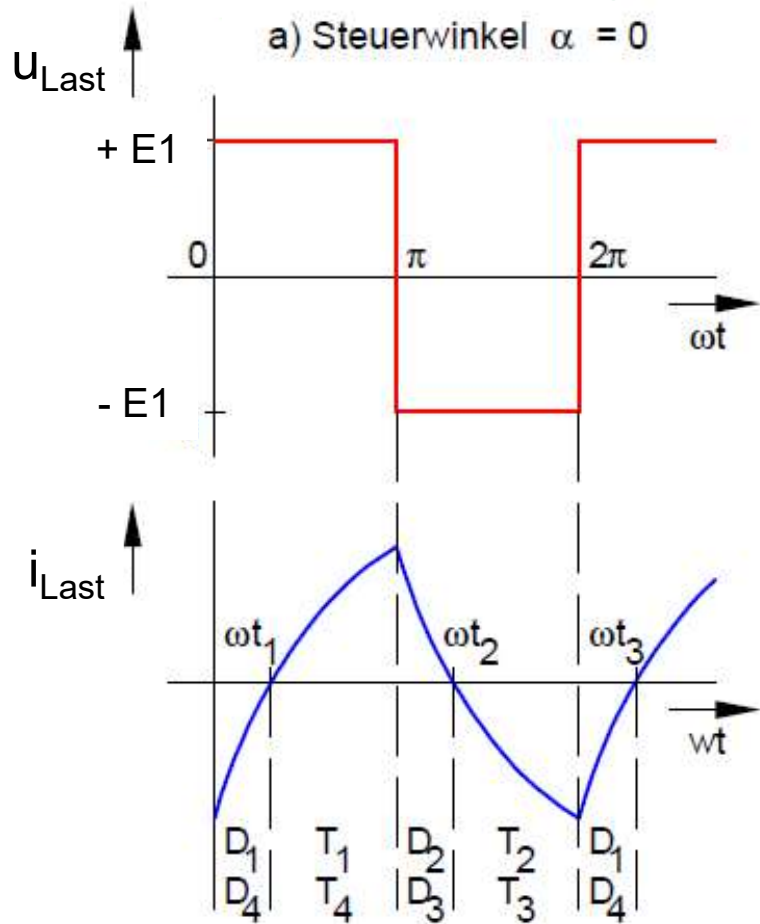


- Die Transistoren T1, T4 werden synchron im Wechsel mit den Transistoren T2, T3 ein- und ausgeschaltet. Die Einschaltzeit t_{14} des Schalterpaares T1, T4 gleich der Einschaltzeit t_{23} des Schalterpaares T2, T3.
- Die Ausgangsspannung ist eine aus rechteckigen Blöcken bestehende Wechselspannung mit der Amplitude E_1 . Diese Wechselspannung enthält eine sinusförmige Grundschwingung fester Amplitude $(\frac{4}{\pi} E_1)$.
- Die Freilaufdioden D1 bis D4 sind erforderlich, um bei angenommener induktiven Last einen Strom mit einem zur momentanen Spannung unterschiedlichen Vorzeichen zu ermöglichen.

Einphasen-Spannungswechselrichter: Schwenkverfahren

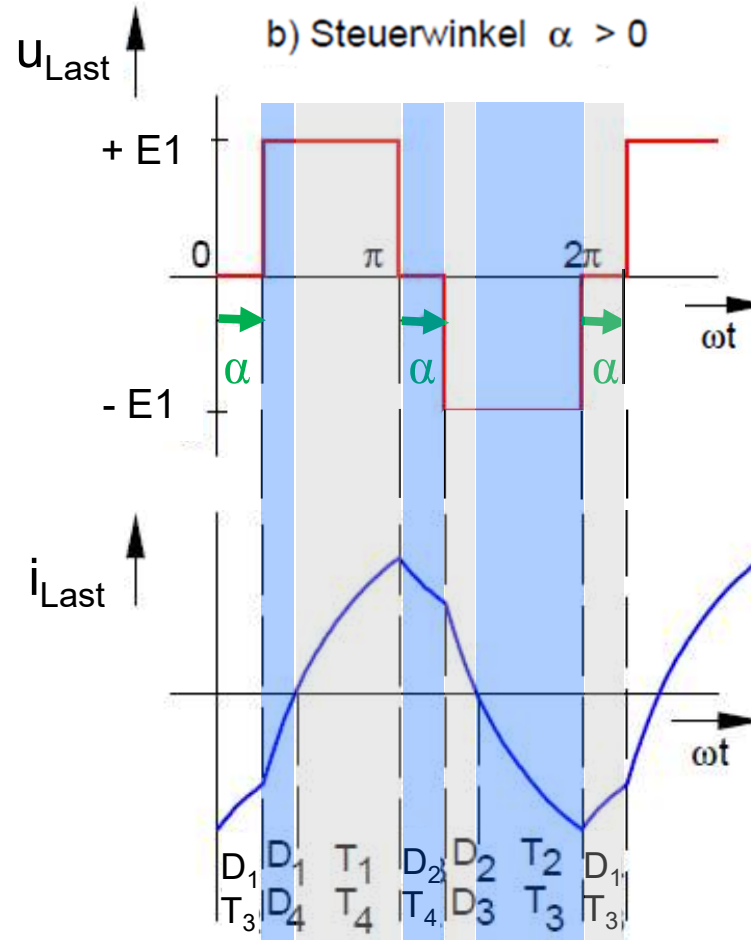
Blocksteuerung

a) Steuerwinkel $\alpha = 0$



Schwenkverfahren

b) Steuerwinkel $\alpha > 0$



- Werden die Transistorpaare (T1, T4), (T2, T3) um den Steuerwinkel α verzögert angesteuert, so kann der Effektivwert der ausgangsseitigen Rechteck-Wechselspannung beeinflusst werden.

Unterschwingungsverfahren

Vergleich einer Dreiecksfunktion u_{Dr} mit einer sinusförmigen Steuerspannung u_{St} .

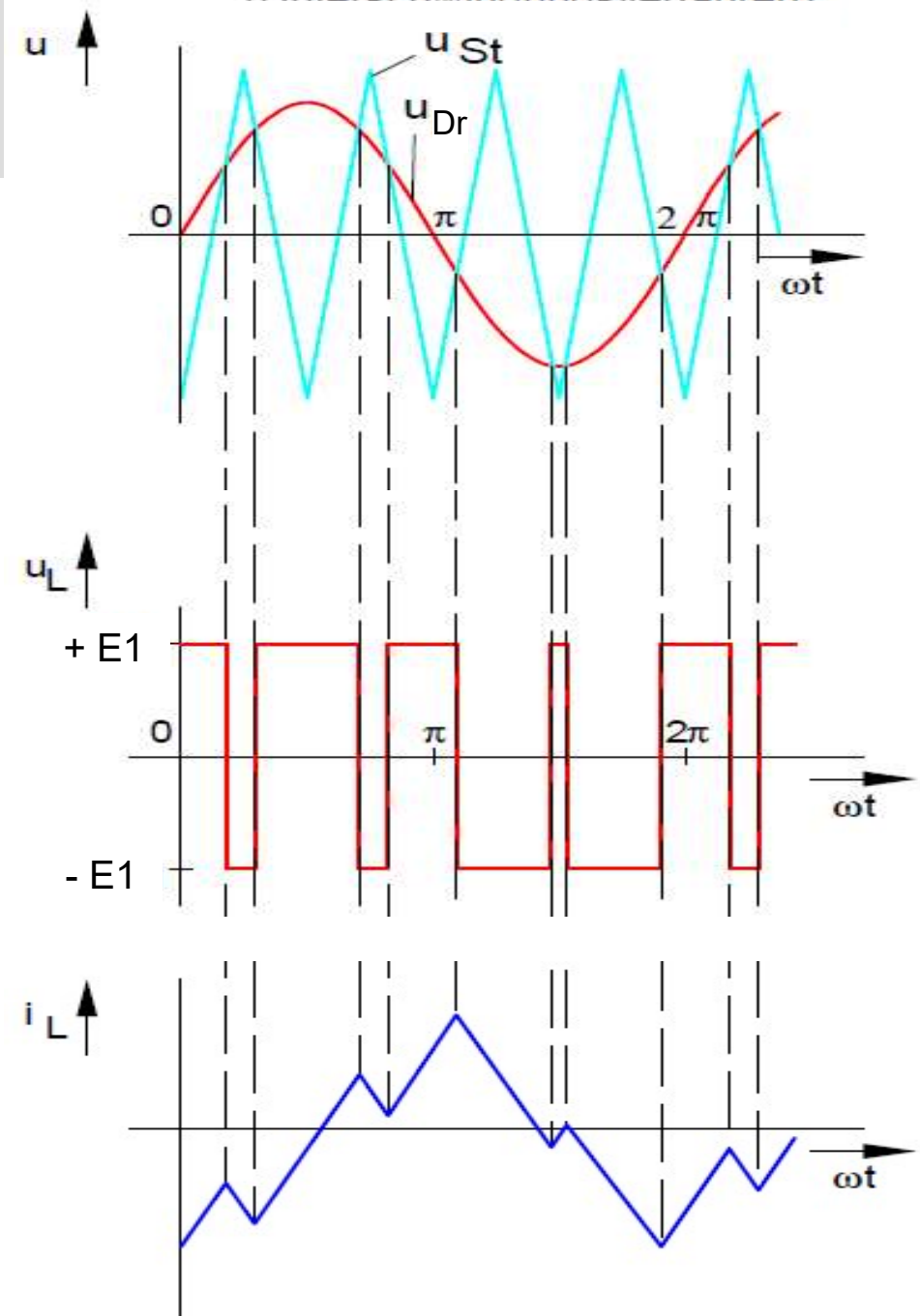
→ sinusbewertete Pulsbreitenmodulation (PWM)

→ Ausgangsgrößen näher an Sinusform

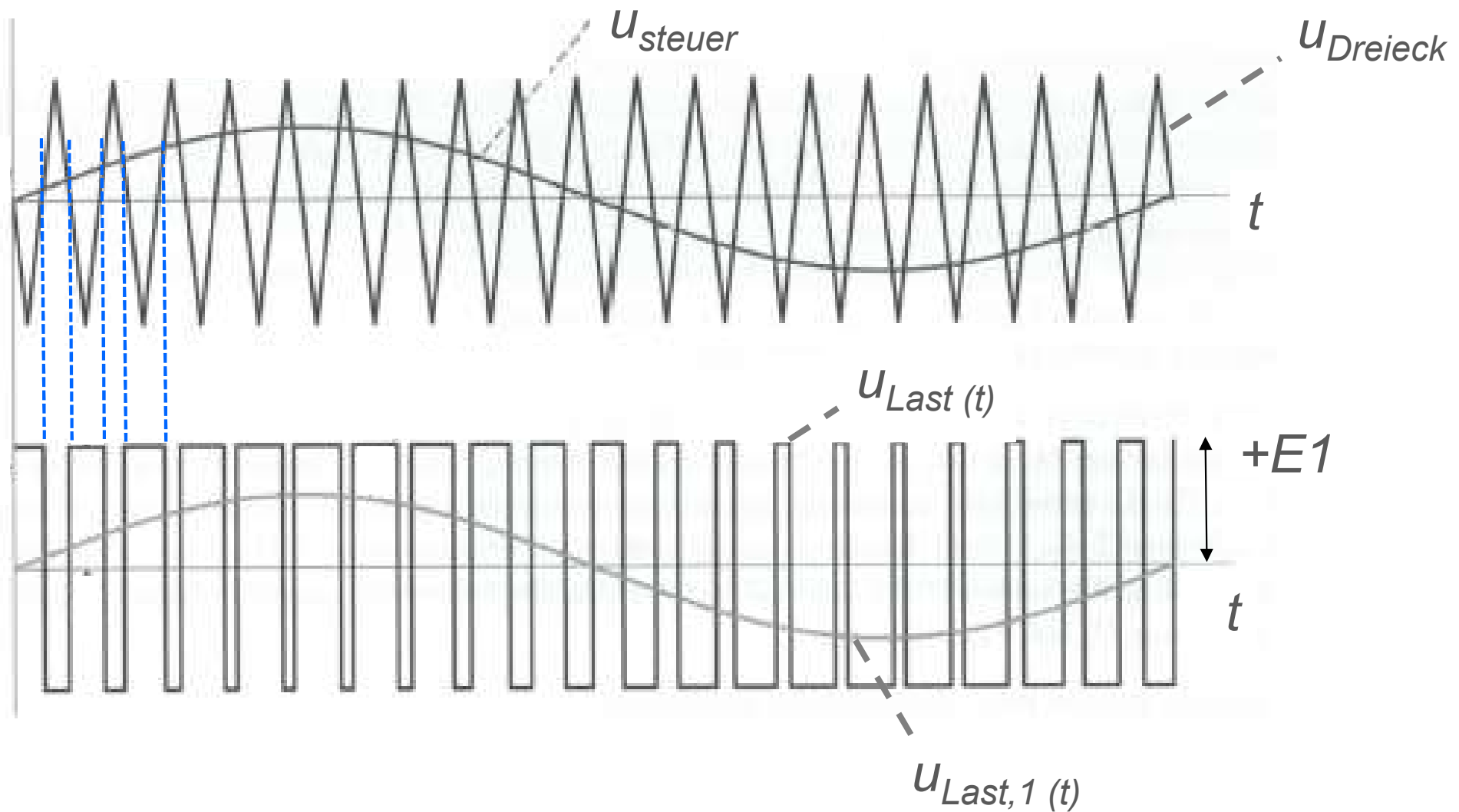
Die Momentanwerte der Ausgangsspannung schalten zwischen $u_{Last} = +E_1$ und $u_{Last} = -E_1$ hin und her.

→ Pulswechselrichter

→ Bipolarer Taktung



Unterschwingungsverfahren



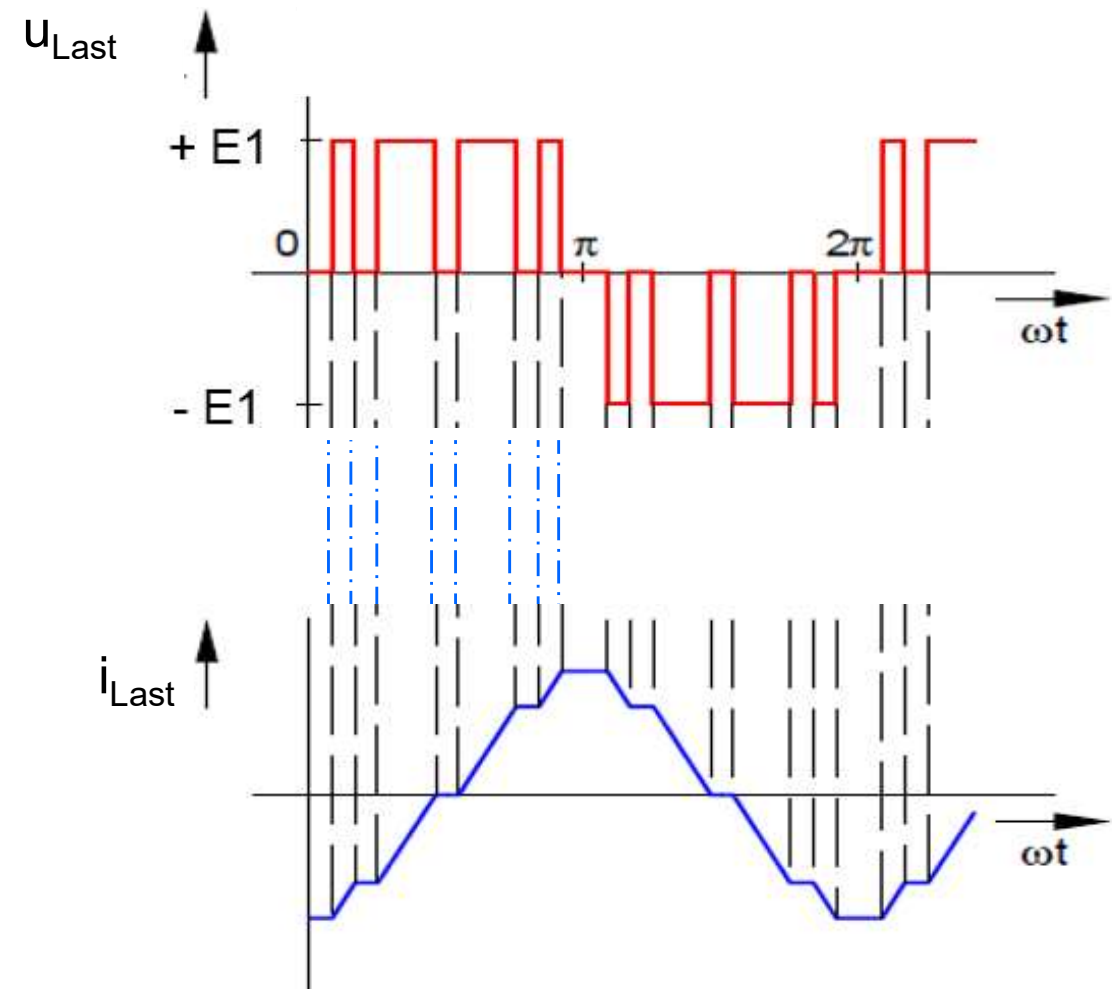
Dreipunktverfahren

- Beim Dreipunkt-Wechselrichter nimmt die Ausgangsspannung einen der drei Zustände $u_{\text{Last}} = +E_1$, $u_{\text{Last}} = 0$ und $u_{\text{Last}} = -E_1$ an.

→ Pulswechselrichter

→ Unipolare Taktung

- Die Ausgangsgrößen nähern sich gut einer Sinusform an.



Einphasen-Spannungswechselrichter: Zusammenfassung Steuerverfahren

I. (Phasen-)Schwenkverfahren:

- Die Transistorpaare (T1, T4) und (T2, T3) werden um den Steuerwinkel α verzögert angesteuert.
- Dadurch kann der Effektivwert der ausgangsseitigen Rechteck-Wechselspannung beeinflusst werden (Steuerwinkel $\alpha = 0.$)

II. Unterschwingungsverfahren:

- Soll die Sinusform der Ausgangsspannung möglichst gut angenähert werden, so stellt das Unterschwingungsverfahren ein geeignetes Verfahren dar.
- Durch eine sinusbewertete Pulsbreitenmodulation wird mit Zweipunktverhalten zwischen den Zuständen $u_{\text{Last}} = +E1$ und $u_{\text{Last}} = -E1$ geschaltet (E1 ... Zwischenkreis-spannung).

Einphasen-Spannungswechselrichter: Zusammenfassung Steuerverfahren

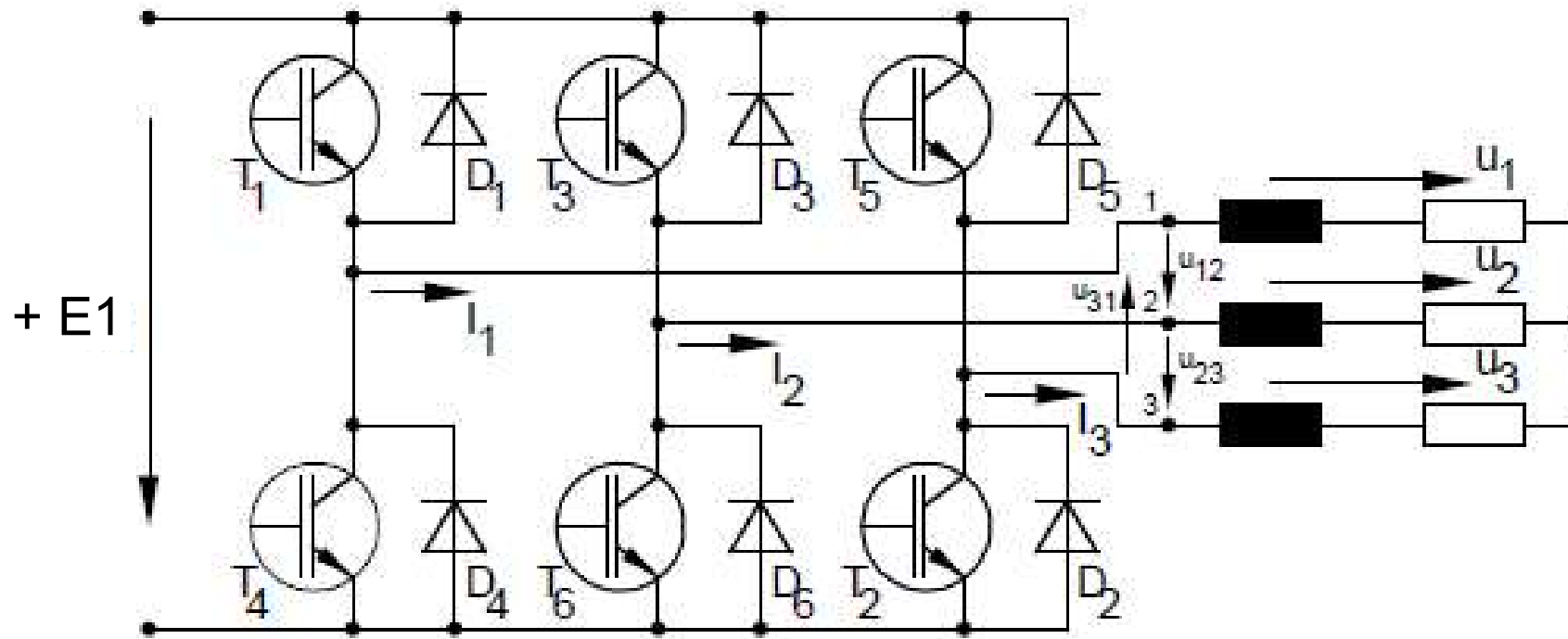
III. Dreipunktwechselrichter:

- Beim Dreipunkt-Wechselrichter wird die Ausgangsspannung zwischen den drei Zuständen $u_{\text{Last}} = +E1$, $u_{\text{Last}} = 0$, $u_{\text{Last}} = -E1$ geschaltet.
- Durch die geeignete Wahl der Schalter-Ansteuerimpulse lassen sich die Ausgangsgrößen gut einer Sinusform nähern.

IV. Variable Zwischenkreisspannung:

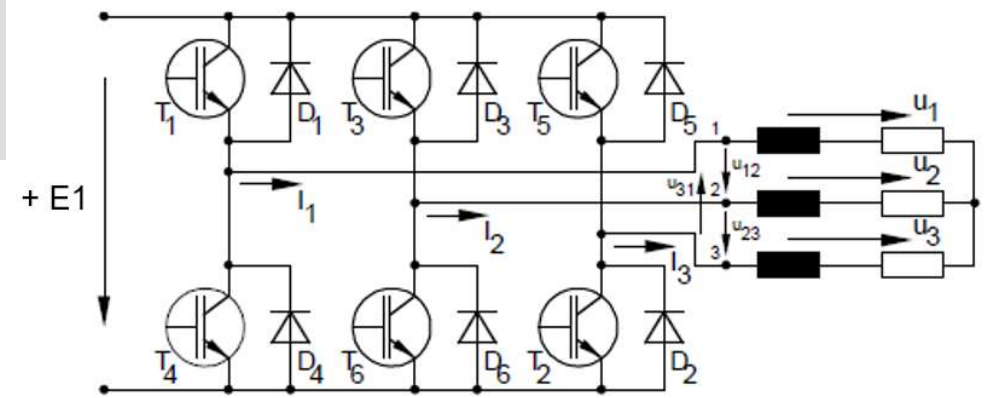
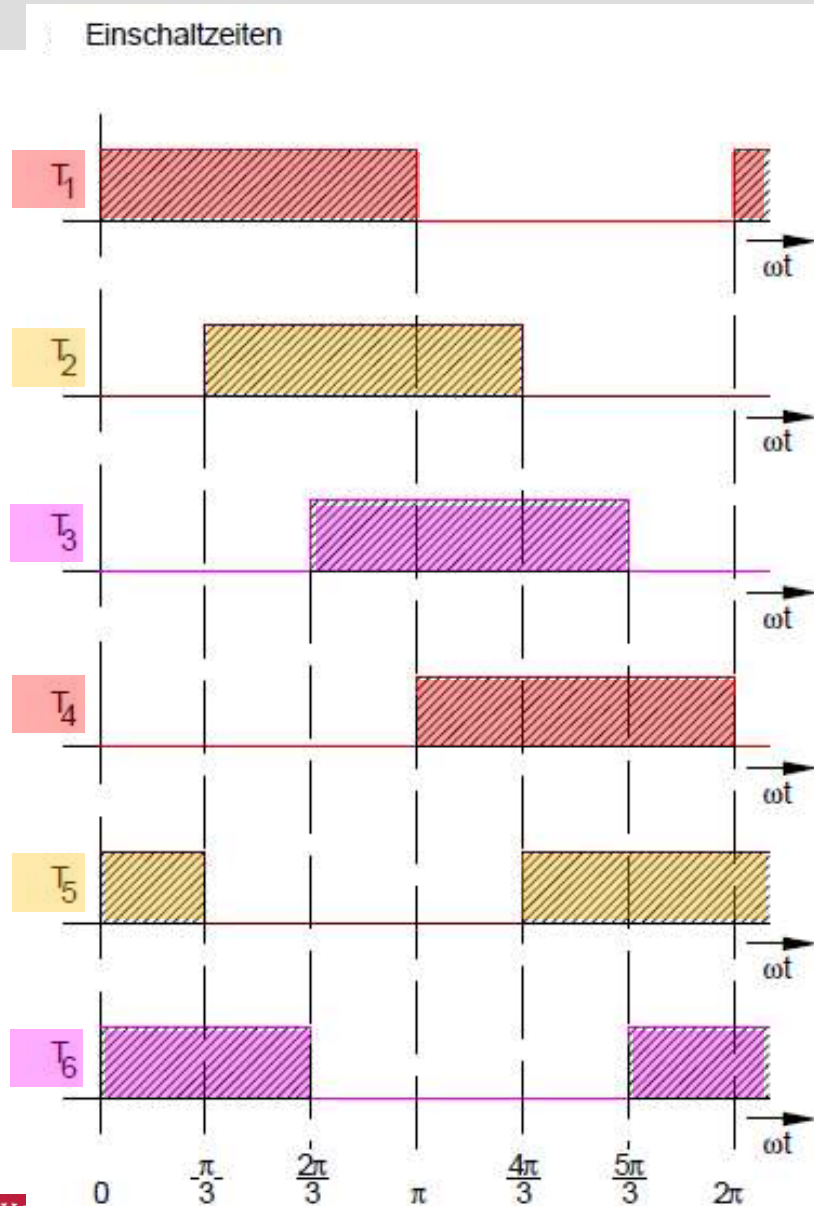
- Die Ausgangsspannungs-Amplitude kann durch Verändern von $E1$ direkt beeinflusst werden.
- In vielen Anwendungen wird $E1$ aber aus einer Festspannungsquelle bereitgestellt.
- Dadurch hat diese Möglichkeit der Amplituden-Beeinflussung nur bei aus dem Netz gespeisten steuerbaren Gleichrichterschaltungen eine praktische Bedeutung.

Dreiphasen-Spannungswechselrichter (B6I)



- Die Speisung von Drehstromverbrauchern erfordert dreiphasige Schaltungen.
- Diese können grundsätzlich aus drei Einphasen-Spannungswechselrichtern, wie sie in unter „Vierquadrantensteller“ beschrieben wurden, gebildet werden.
- Eine einfachere Möglichkeit besteht aus einer Anordnung mit 3 Halbbrücken.

Dreiphasen-Spannungswechselrichter



- Die Ansteuerung kann mit den gleichen Steuerverfahren erfolgen, wie sie im Zusammenhang mit dem einphasigen Wechselrichter beschrieben wurden.
- Das Bild zeigt die Schaltzeiten der einzelnen Transistoren für die Blocktaktung.
- Die Taktung erfolgt für jede Halbbrücke bestehend aus

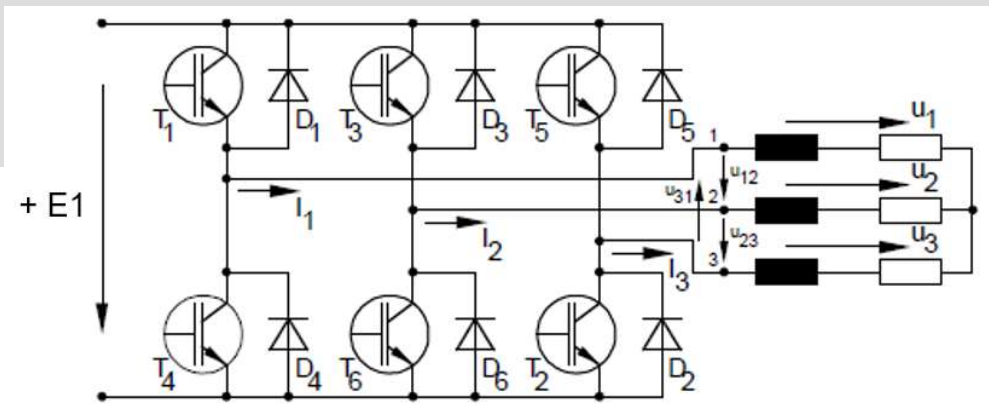
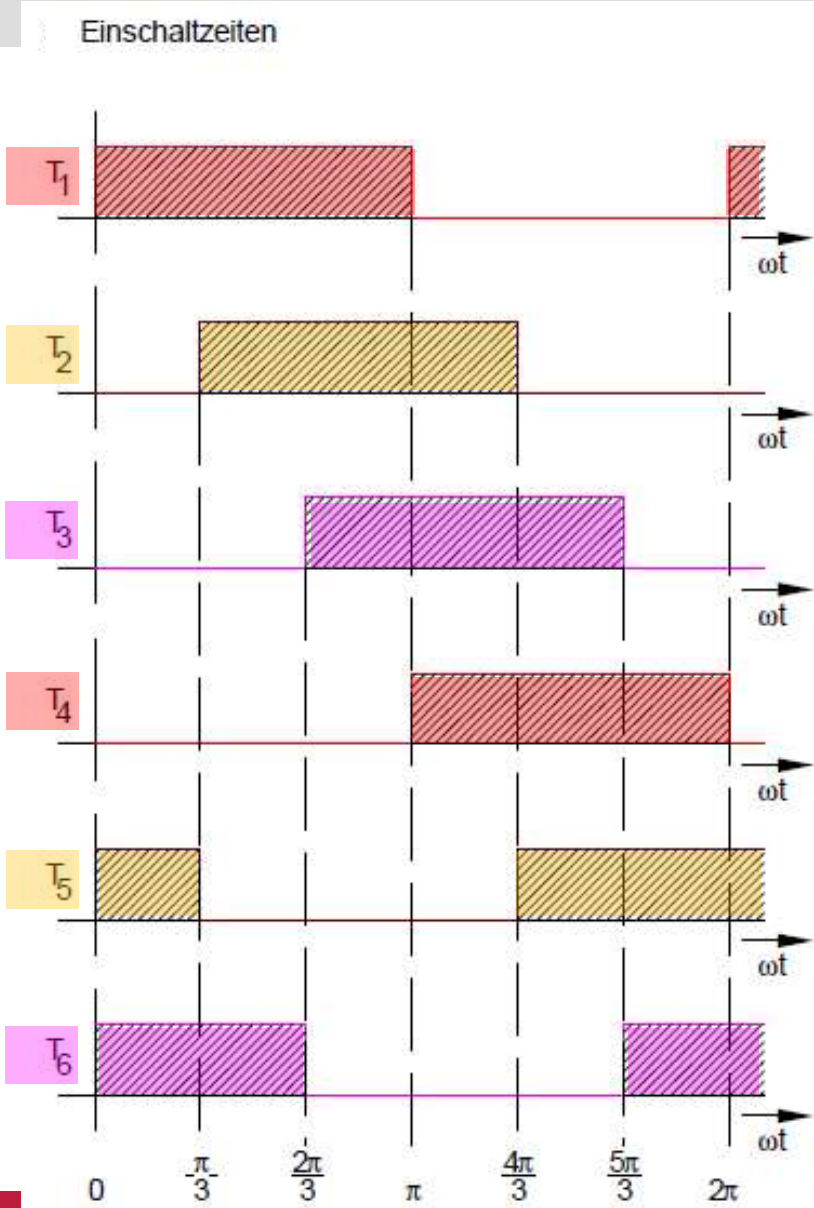
(T1,T4)

(T2,T5)

(T3,T6)

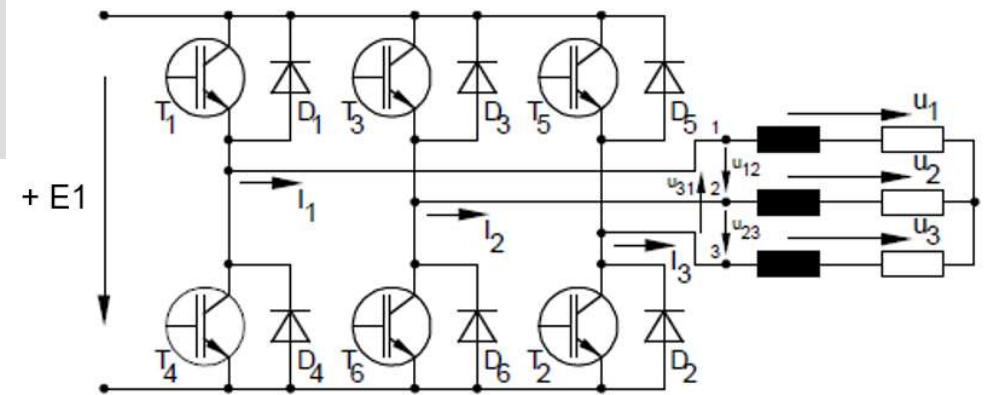
jeweils um 120° phasenversetzt.

Dreiphasen-Spannungswechselrichter



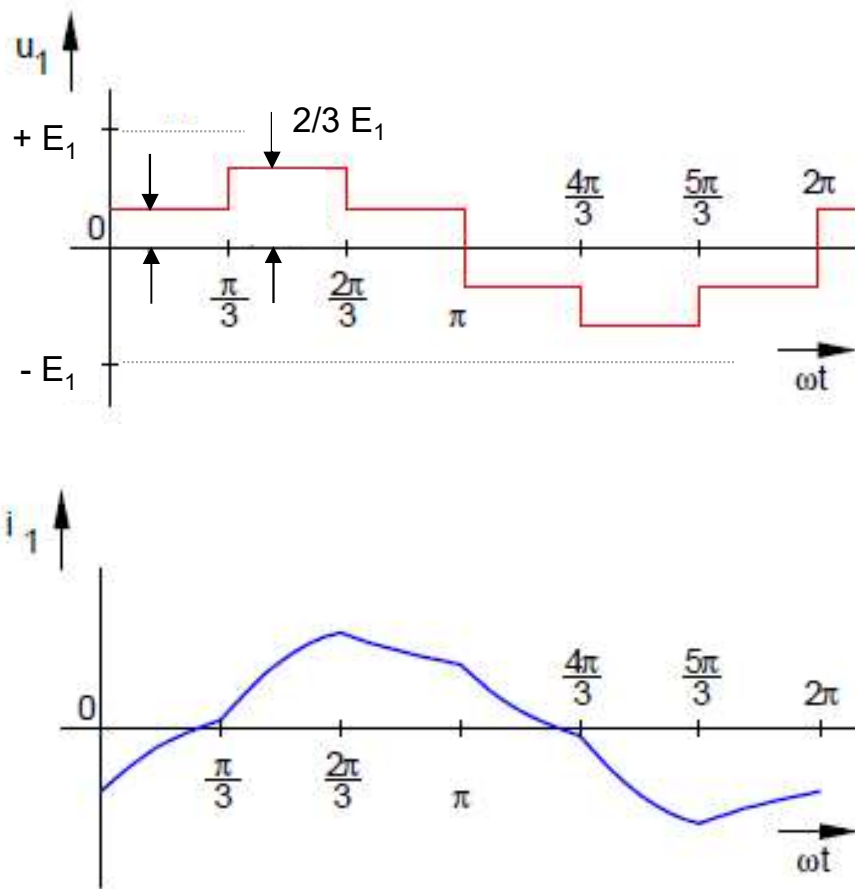
Zustand	Bereich	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	u ₁	u ₁₂
I.	0 ... 1/3 π	1	0	0	0	1	1	1/3 E ₁	E ₁
II.	1/3 π ... 2/3 π	1	1	0	0	0	1	2/3 E ₁	E ₁
III.	2/3 π ... π	1	1	1	0	0	0	1/3 E ₁	0
IV.	π ... 4/3 π	0	1	1	1	0	0	- 1/3 E ₁	- E ₁
V.	4/3 π ... 5/3 π	0	0	1	1	1	0	- 2/3 E ₁	- E ₁
VI.	5/3 π ... 2 π	0	0	0	1	1	1	- 1/3 E ₁	0

Dreiphasen-Spannungswechselrichter

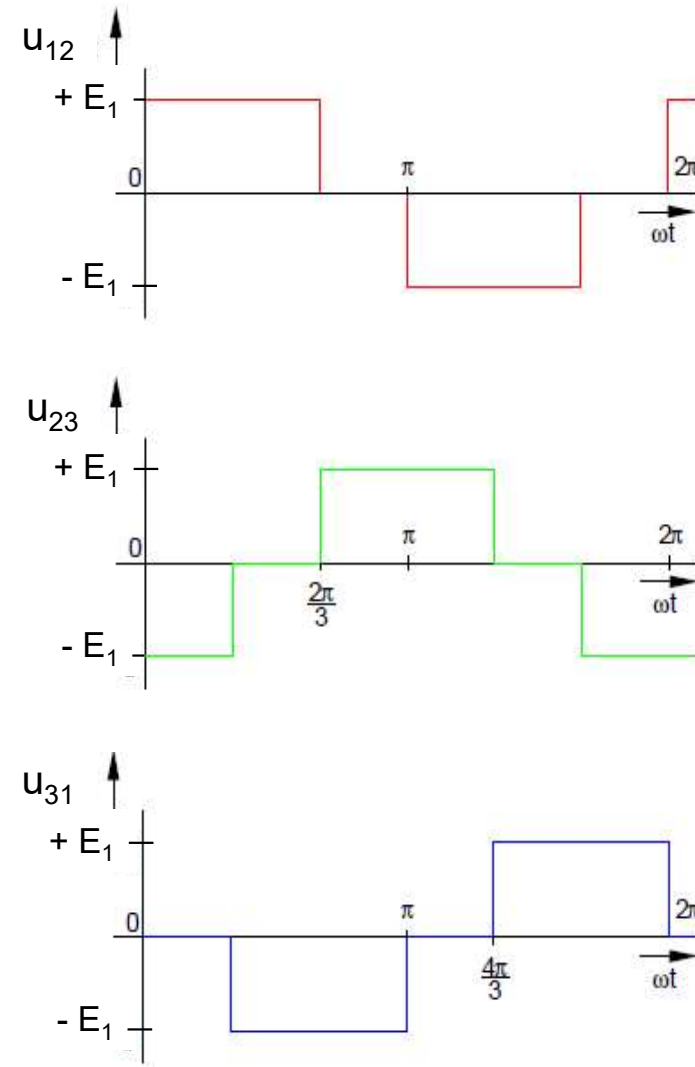


Dreiphasen-Spannungswechselrichter

Strangspannung und Strangstrom



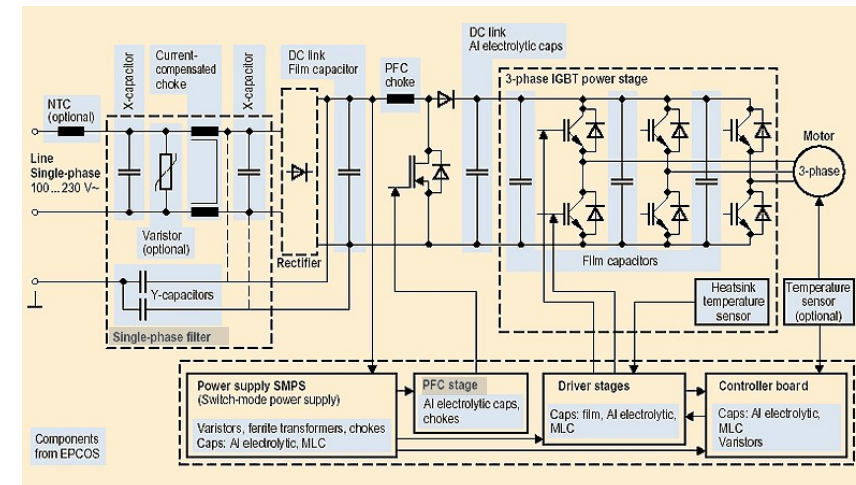
Verkettete Spannungen



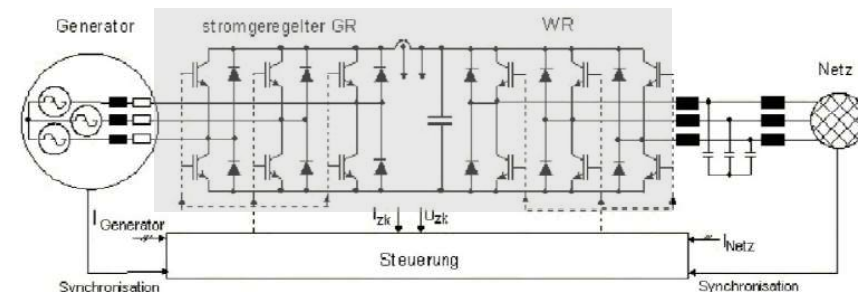
Dreiphasen-Spannungswechselrichter (B6I)

Anwendung:

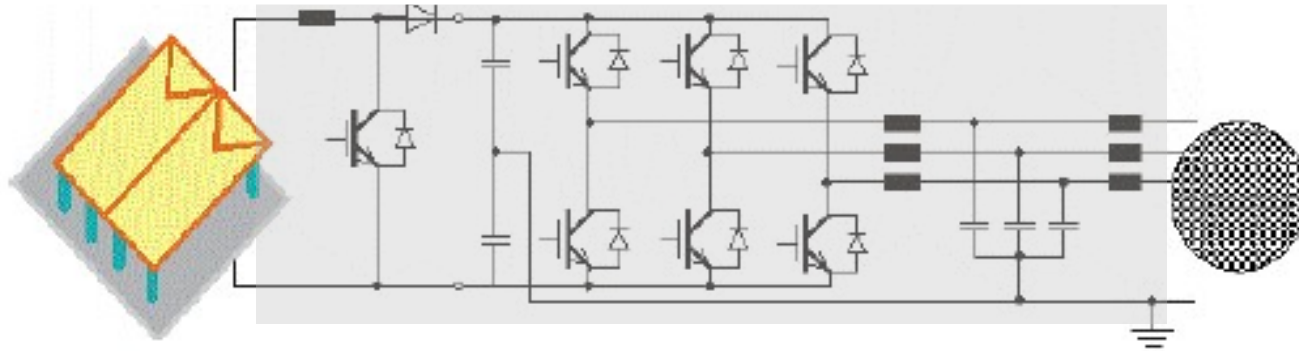
- in Umrichtern zur Drehzahl- und Drehmomentverstellung von Drehstrommotoren
- in Windenergieanlagen zur Wandlung von DC-Energie aus einem DC-Spannungs-Zwischenkreis in AC-Energie zur Einspeisung in ein dreiphasiges Netz
- zur Wandlung von DC-Energie aus einer DC-Quelle (Batterie, Photovoltaik-Zelle) in AC-Energie zur Einspeisung in ein dreiphasiges Netz,
- im elektrischen Antriebsstrang von Hybrid- oder Elektrofahrzeugen.



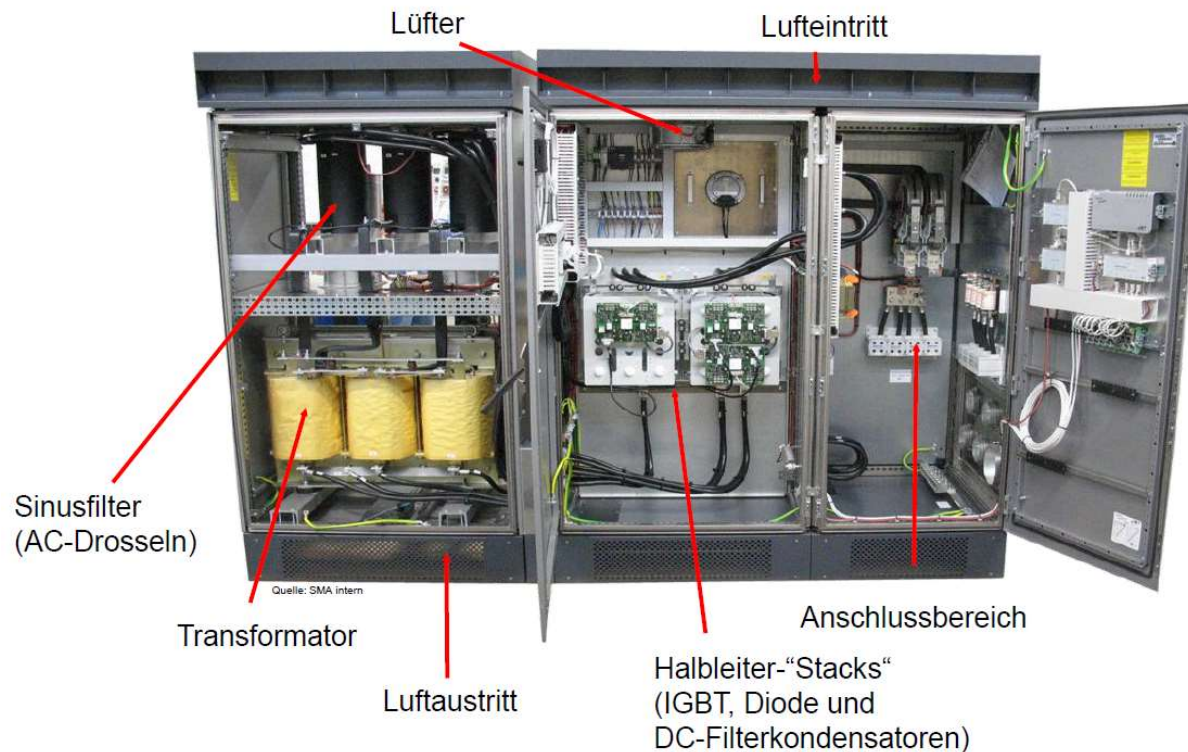
Blockschaltbild des Industrieantriebs



Anwendungsbeispiel: PV-Wechselrichter



Ausführungsbeispiel
PV- Zentral-Wechselrichter (250kVA,
mit Transformator



[Quelle: SMA]

Anwendungsbeispiel: Elektrischer Antrieb im E-Fahrzeug



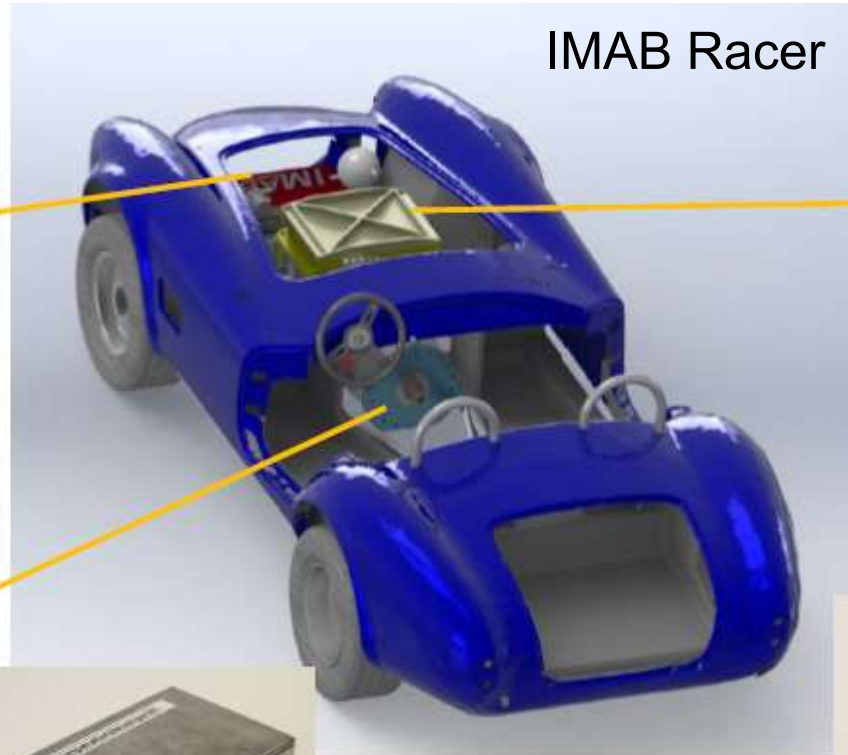
Antriebswechselrichter
300 kVA



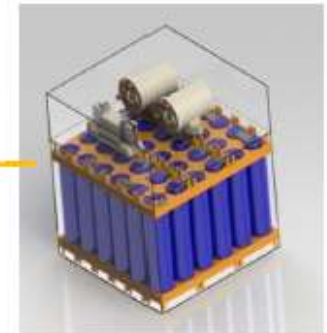
High-Performance
E-Maschine
(200 kW, 600 Nm)



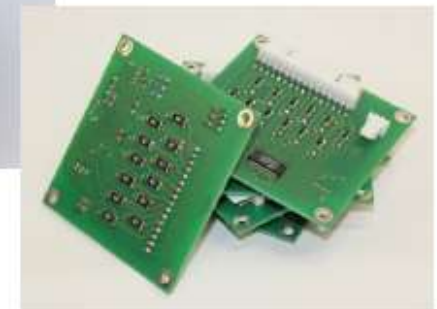
div. Steuergeräte



IMAB Racer



Speichersystem
(Demosystem 3 kWh)



BMS und Balancing

Wie geht es in den folgenden Semestern weiter ?

- **Eine** Vertiefungsveranstaltung im **Bachelor-Studium**: Vorlesung und Übung „**Grundsaltungen der Leistungselektronik**“ (WS)
- **Zwei** Lehrveranstaltungen im **Master-Studium**:
 - Vorlesung und Übung „**Erweiterte Leistungselektronik**“ (WS)
 - Vorlesung und Übung „**Angewandte Leistungselektronik**“ (SS)
- Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IMAB bieten immer Themen für studentische Arbeiten an (Hiwi, Seminarvortrag, Abschlussarbeiten (BA, MA)).

Wie geht es in den folgenden Semestern weiter ?

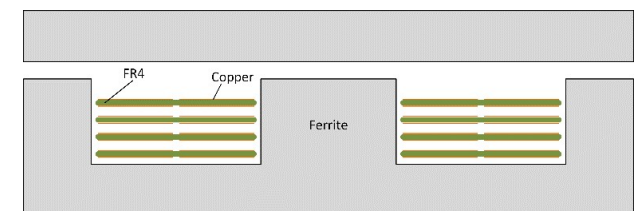
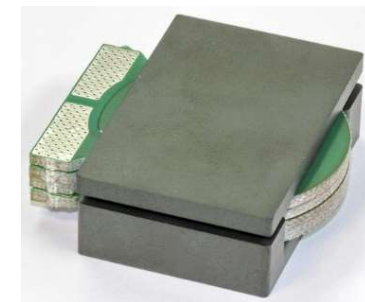
Wintersemester (5. Semester BA):

- Vorlesung und Übung „**Grundschaltungen der Leistungselektronik**“
- Inhalt:
 - Ansteuerung von Leistungsschaltern (Treiberschaltungen)
 - Entwärmung (von Leistungshalbleitern)
 - Aufbau und Auslegung passiver Bauelemente (Drosseln, Transformatoren, Kondensatoren)
 - Gleichstromsteller ohne galvanische Trennung (Inverswandler, SEPIC-Wandler)
 - Gleichstromsteller mit galvanischer Trennung (Sperrwandler, Durchflusswandler, Gegentaktwandler)
 - Aufbau und Regelung von Schaltnetzteilen
 - Dreiphasige Wechselrichter

5kW-Satelliten-Versorgung (DC/DC-Steller)



Quelle: IMAB



Wie geht es im Masterstudium weiter ?

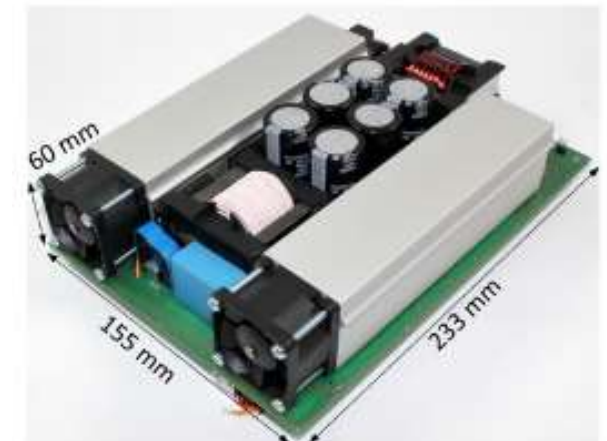
Wintersemester:

- Vorlesung und Übung „**Erweiterte Leistungselektronik**“
- Inhalt:
 - Spezielle Stromrichter für regenerative Energiesysteme und Elektromobilität (Wind, Photovoltaik, Batterie, Traktion)
 - Eigenschaften und Ansteuerungsverfahren von Stromrichtern
 - Verlustbestimmung von aktiven und passiven Bauelementen (Messtechnik, Datenblattanalyse, Beispielapplikationen)
 - Mechanischer Aufbau und thermische Eigenschaften von aktiven und passiven Bauelementen
 - Zuverlässigkeit und Lebensdauer von aktiven und passiven Bauelementen



2kW-PV-Wechselrichter für Netzeinspeisung

Quelle: IMAB



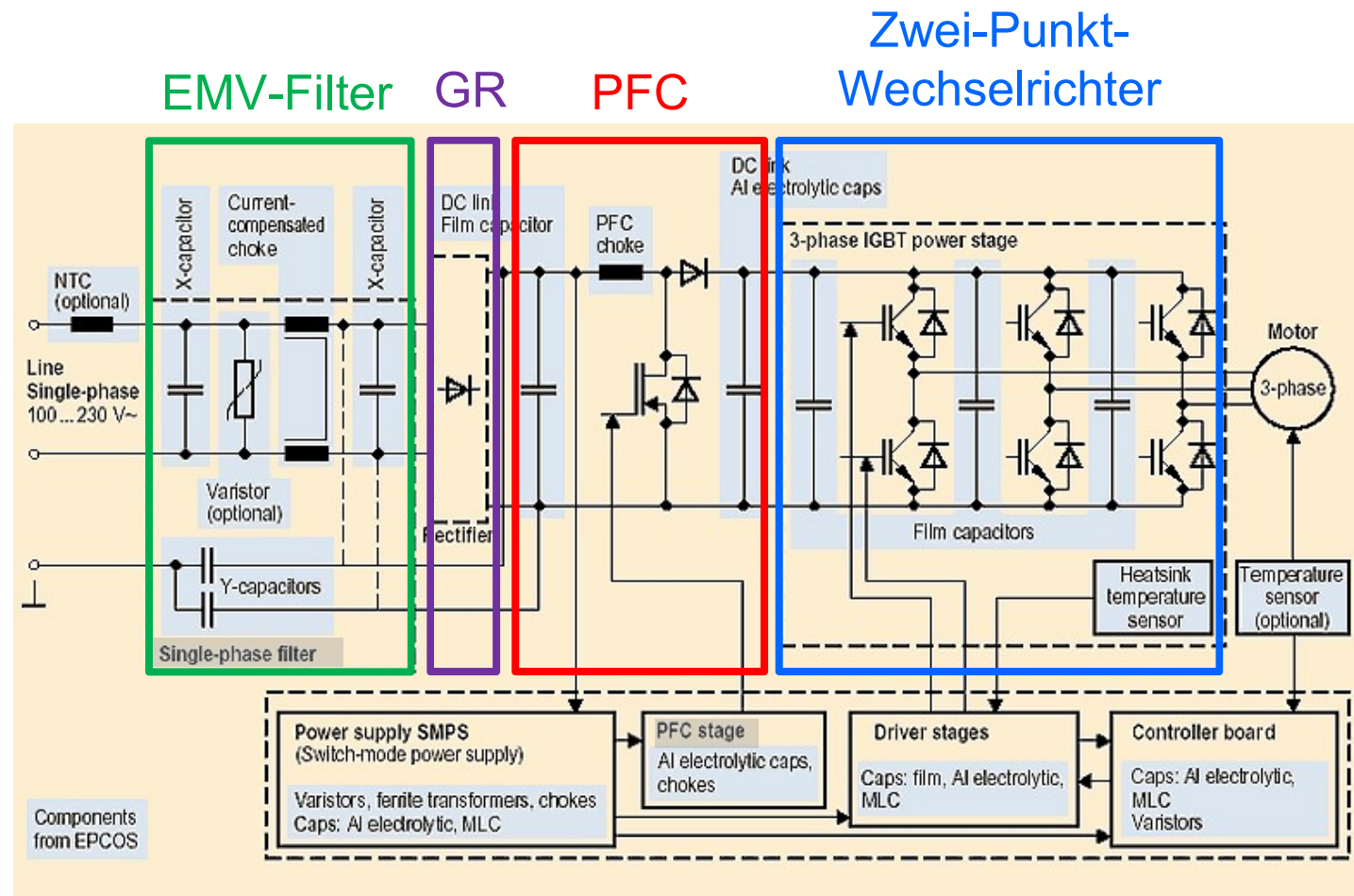
3kW-on-Board-Batterieladegerät

Quelle: IMAB

Wie geht es im Masterstudium weiter ?

Sommersemester MA:

- Vorlesung und Übung
„Angewandte Leistungselektronik“
- Inhalt:
 - Störungsarmes Design
 - Filter: EMV-, du/dt - , Sinus
 - Ein- und dreiphasige Power Factor Correction
 - Resonante und Quasi-resonante Schaltungen
 - Mehrpunkt-Wechselrichter

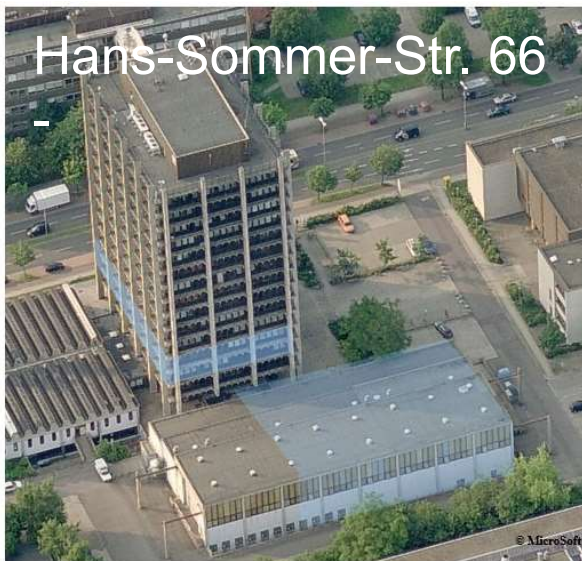


Blockschaltbild des Industrieantriebs

Tätigkeiten für Studenten am IMAB

- Das IMAB bietet Hiwi-Tätigkeiten, Seminarvorträge und Abschluss- arbeiten (BA, MA) an.
- Sie finden in den Räumen des IMAB jederzeit eine Ansprechpartnerin/einen Ansprechpartner, die/der Sie gern berät.
- Auch das Sekretariat (Frau Ottow) hilft Ihnen gern.

- siehe auch: www.imab.de



Art	Thema	Betreuer	Details
Bachelor- oder Masterarbeit	Erstellung von Simulationsmodellen zur Bestimmung der Lebensdauer von Leistungshalbleitern	M. Sc. F. Lippold	INFO
Bachelor- oder Masterarbeit	Optimierung und Inbetriebnahme eines Prüfstands für Lastwechseltests	M. Sc. F. Lippold	INFO
Bachelor- oder Masterarbeit	Entwicklung eines Wechselrichters zur Untersuchung von supraleitenden Spulen unter Wechselstromeinfluss	Dipl.-Ing. N. Langmaack	INFO
Bachelor- oder Masterarbeit	Weiterentwicklung eines SiC-Hochsetzstellers für den Einbau in ein Forschungsfahrzeug	Dipl.-Ing. N. Langmaack	INFO
Bachelorarbeit	Untersuchung verschiedener Zwischenkreisanordnungen	M. Sc. Tobias Fricke	INFO
Bachelorarbeit	Untersuchung verschiedener Kondensatoren für Zwischenkreisanwendungen	M. Sc. Tobias Fricke	INFO
HiWi-Stelle	Studentische Hilfskraft im Bereich induktive Ladetechnik	M. Sc. Hendrik Marks	INFO
Masterarbeit	Design und Optimierung der Anbindung eines verteilten Zwischenkreises	M. Sc. Dirk Fischer	INFO
Masterarbeit	Lebensdaueranalyse von einphasigen, bidirektionalen Onboard-Chargern	M. Sc. F. Lippold	INFO
Bachelor- oder Masterarbeit	Vergleichende Bewertung und Modellierung fortschrittlicher Wechselrichtertopologien unter Berücksichtigung motorseitiger Filter	M. Sc. L. Radomsky	INFO
Bachelor- oder Masterarbeit	Aufbau von Simulationsmodellen verschiedener Multilevel-Invertertopologien für den Einsatz in der hybrid-elektrischen Luftfahrt	M. Sc. L. Radomsky	INFO

▼ Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen

News

Institut

Forschung

Kontakt & Anfahrt

Lehre

MitarbeiterInnen

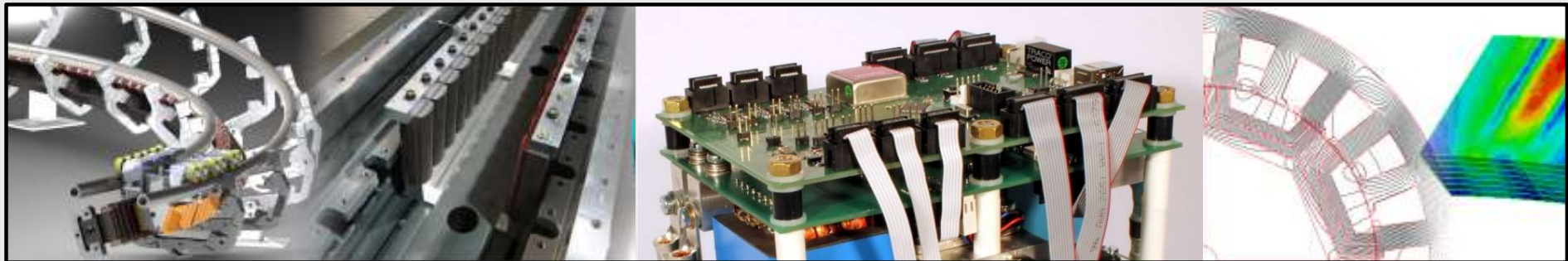
Studentische Arbeiten und HiWi-Stellen



Technische
Universität
Braunschweig



Institut für Elektrische Maschinen,
Antriebe und Bahnen
TU Braunschweig



Leistungselektronik @ Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen

Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz (Leistungselektronik)

M: r.mallwitz@tu-braunschweig.de

T.: + 49 (0)531 3913901

M.Sc. Cengiz Uzlu

M: c.uzlu@tu-braunschweig.de

T.: + 49 (0)531 3913917

M.Sc. Robert Rohn

M: r.rohn@tu-braunschweig.de

T.: + 49 (0)531 3918165

www.imab.de