



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**:

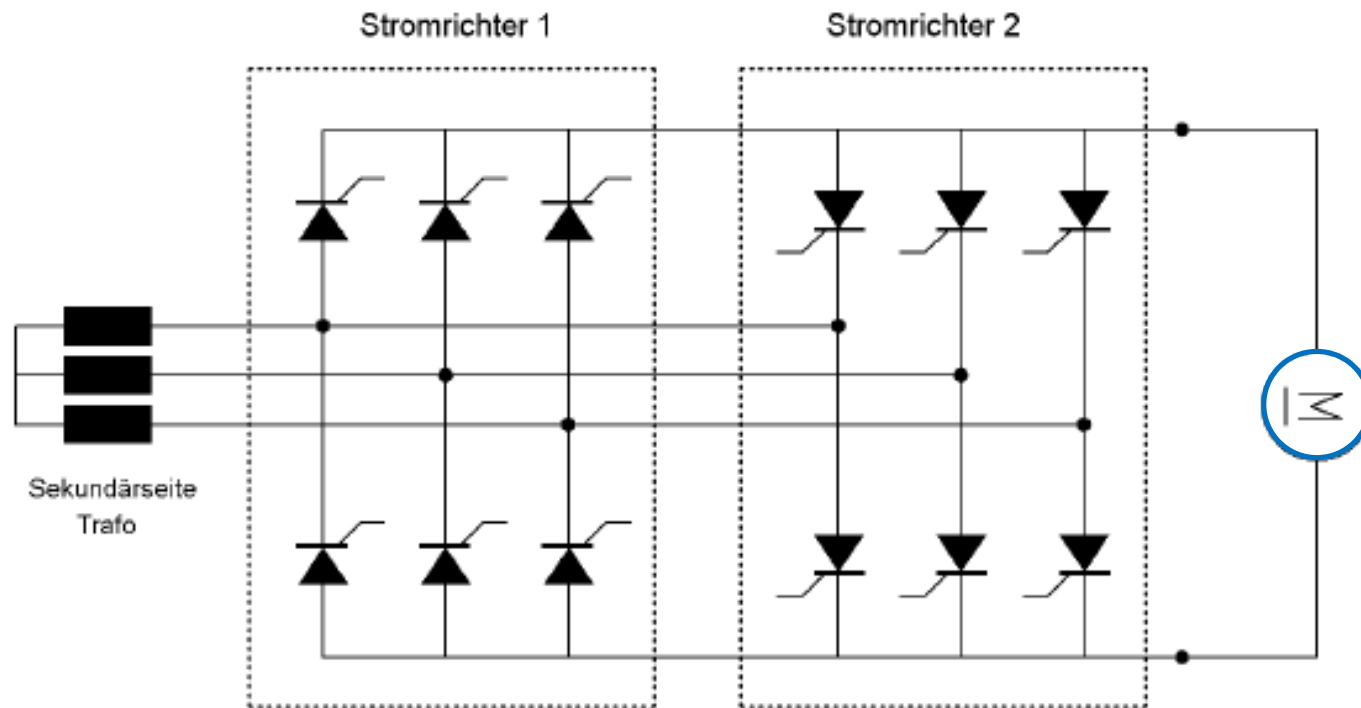
- Bei **Zwischenkreis-Umrichter** (auch: Umrichter mit Zwischenkreis) wird die elektrische Energie zunächst in einem Zwischenkreis gespeichert.

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

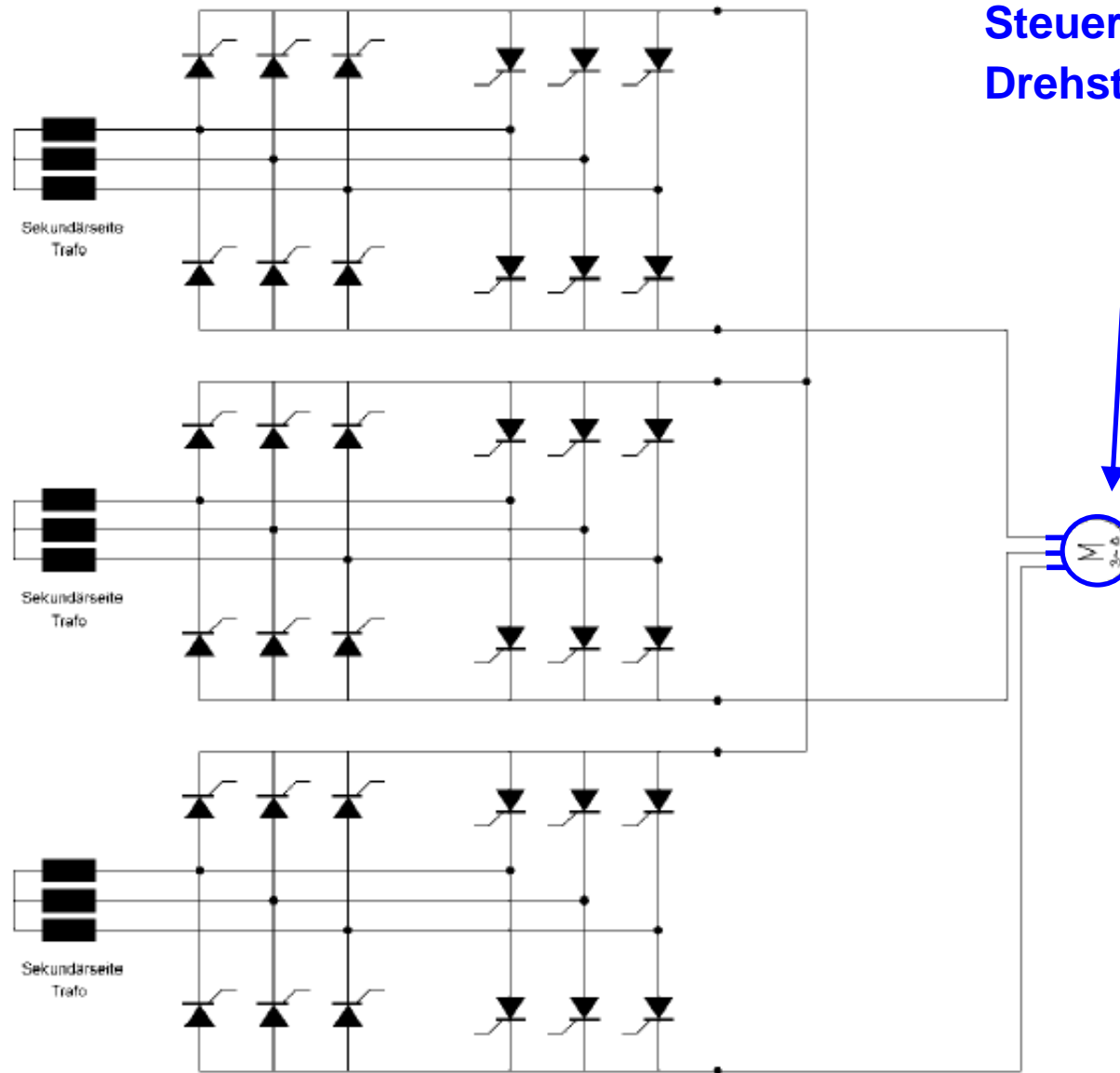
1. einen eingangsseitigen Gleichrichter
2. einen nachgeschalteten Zwischenkreis
3. einen nachgeschalteten Wechselrichter

- 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.)

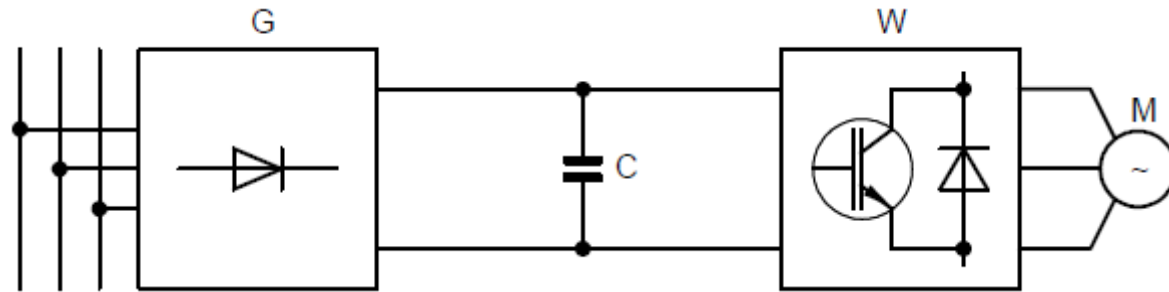


- Pro Motorphase wird ein (steuerbares) Stromrichterpaar benötigt.
- Jedes Stromrichterpaar bedient damit eine Motorphase.
- Transformatoren werden benötigt um Kurzschlüsse zwischen den Phase zu verhindern.

# (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

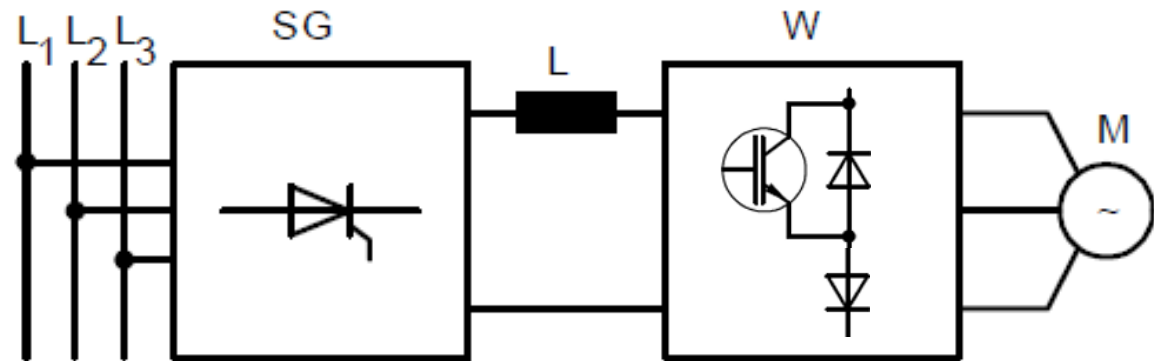


G: ungesteuerter Gleichrichter  
C: Glättung- (Stütz-) Kondensator  
W: Wechselrichter  
M: Drehstrommotor (ASM)

- Merkmal dieses Umrichters-Typs ist, dass im Zwischenkreis eine eingeprägte 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.



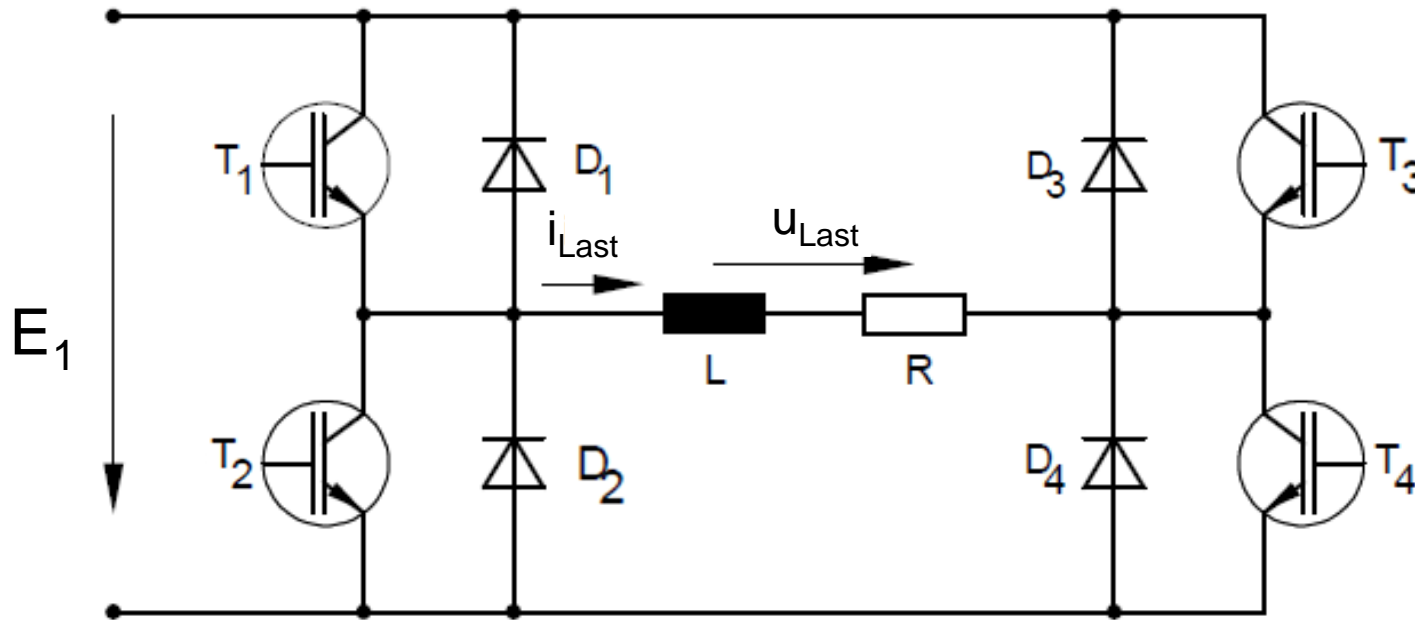
# Umrichter mit Strom- zwischenkreis



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

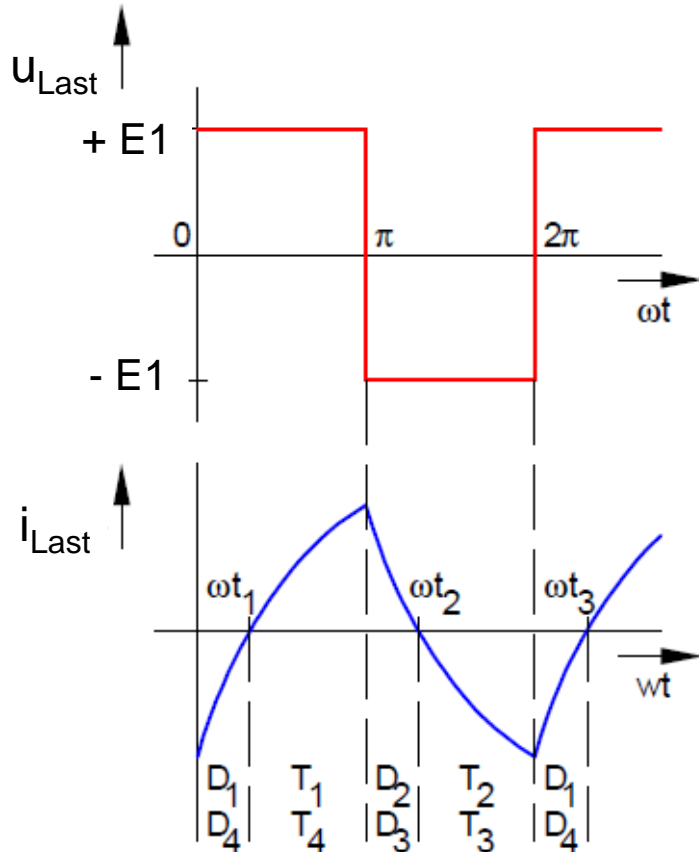
- Kennzeichnend für diesen Umrichter-Typs ist, dass im Zwischenkreis ein eingprägter Gleichstrom fließt. Der Zwischenkreis enthält eine Glättungsinduktivität, die zu einem im Zwischenkreis fließenden eingprägten Strom führt. Ein netzseitig angeordneter steuerbarer Gleichrichter liefert eine einstellbare 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)

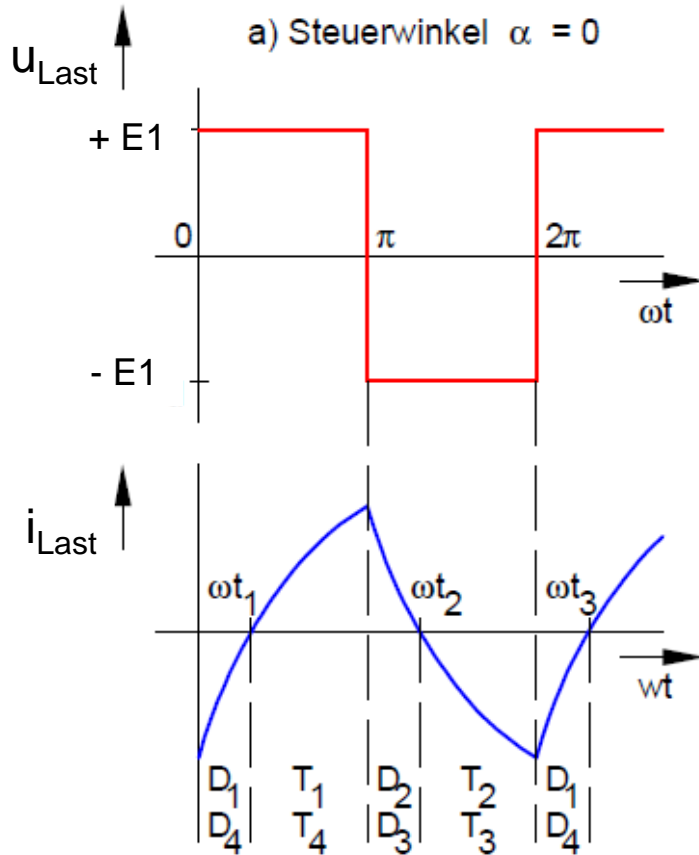


- Die Transistoren T1, T4 werden synchron im Wechsel mit den Transistoren T2, T3 ein- und ausgeschaltet. Die Einschaltzeit  $t_{14}$  des Schalterpaares T1, T4 gleich der Einschaltzeit  $t_{23}$  des Schalterpaares T2, T3.
- Die Ausgangsspannung ist eine aus rechteckigen Blöcken bestehende Wechselspannung 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

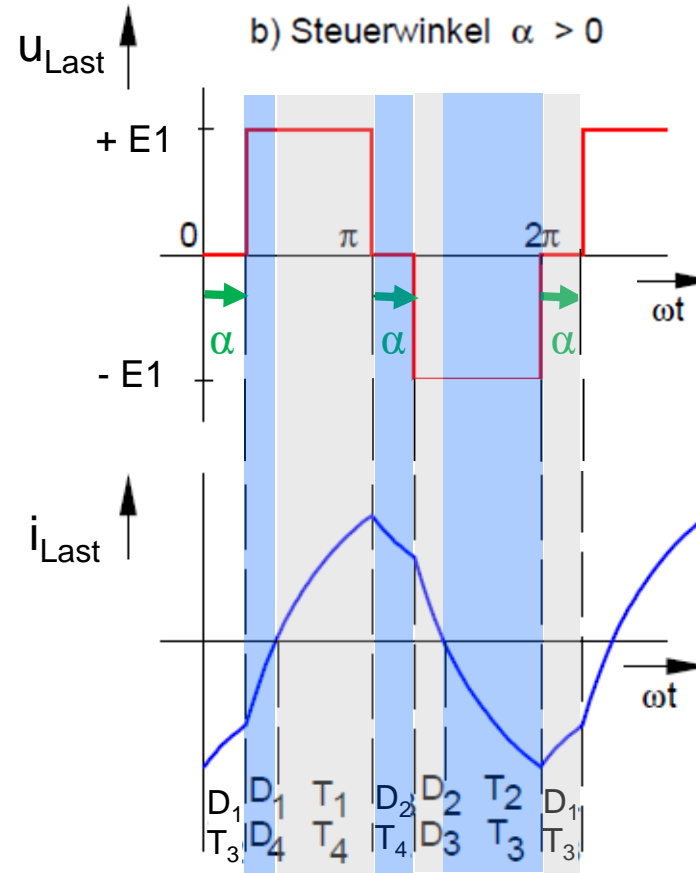
## Blocksteuerung

a) Steuerwinkel  $\alpha = 0$



## Schwenkverfahren

b) Steuerwinkel  $\alpha > 0$



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

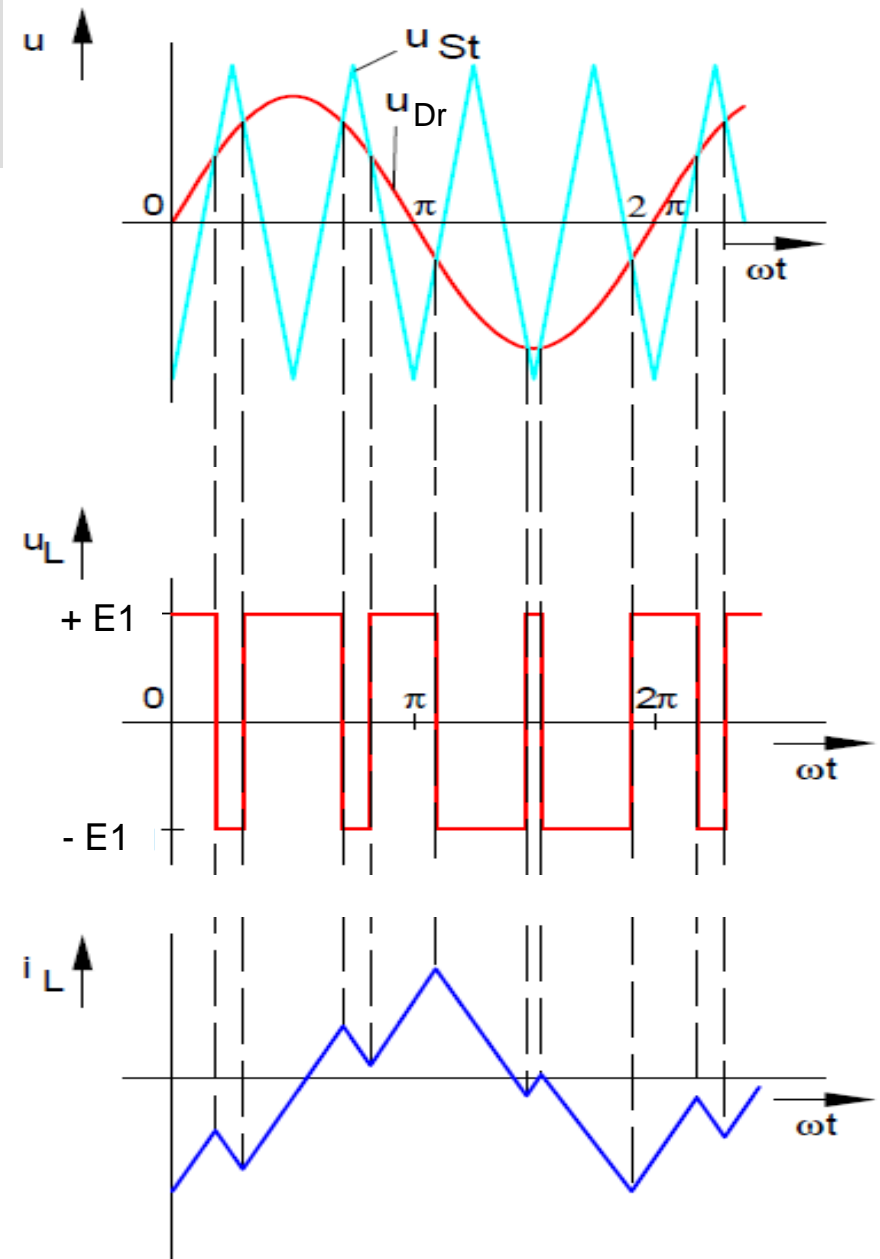
# Unterschwingungsverfahren

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

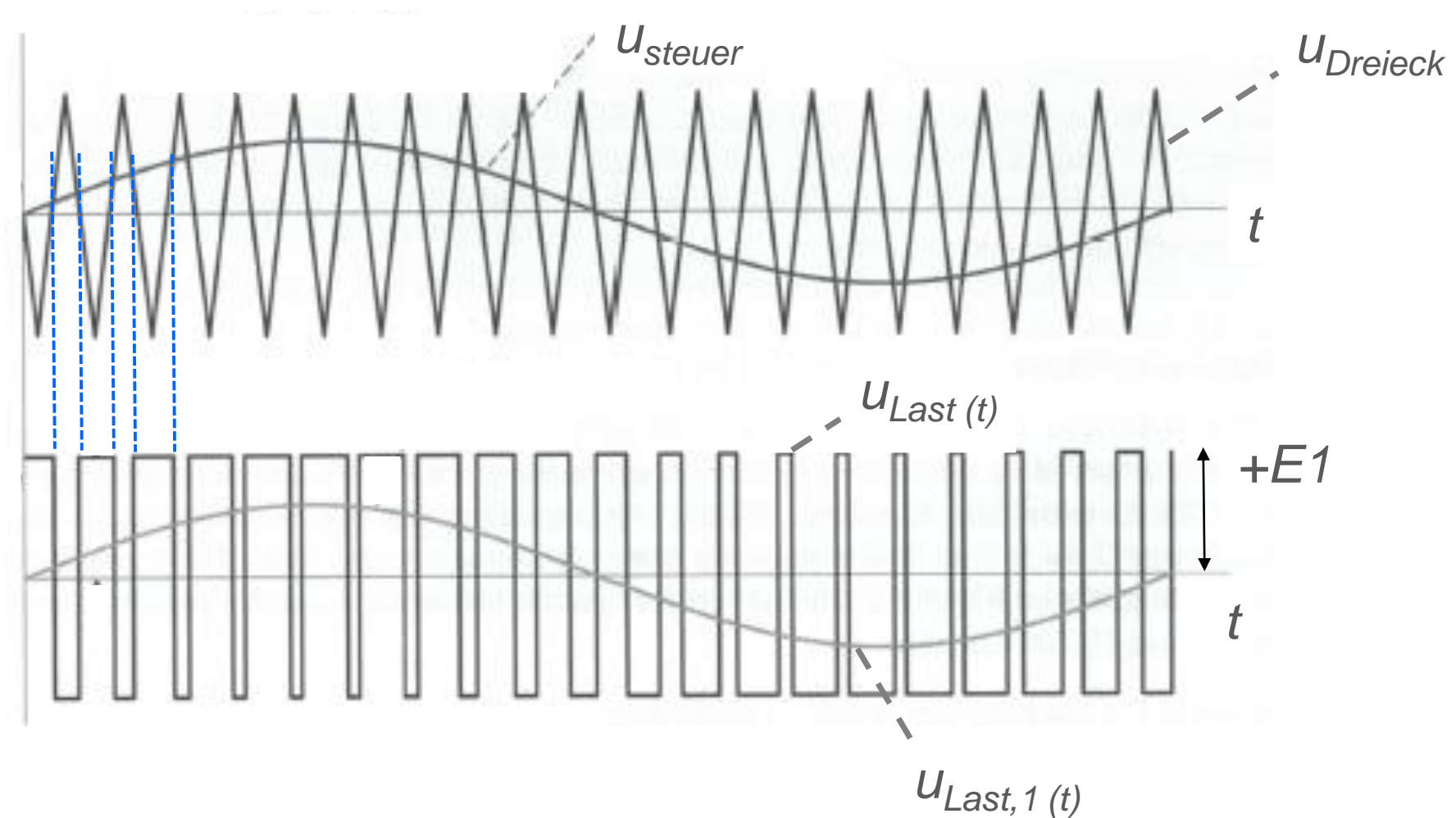
- sinusbewertete Pulsbreitenmodulation (PWM)
- Ausgangsgrößen näher an Sinusform

Die Momentanwerte der Ausgangsspannung schalten zwischen  $u_{Last} = +E1$  und  $u_{Last} = -E1$  hin und her.

- Pulswechselrichter
- Bipolarer Taktung



# Unterschwingungsverfahren



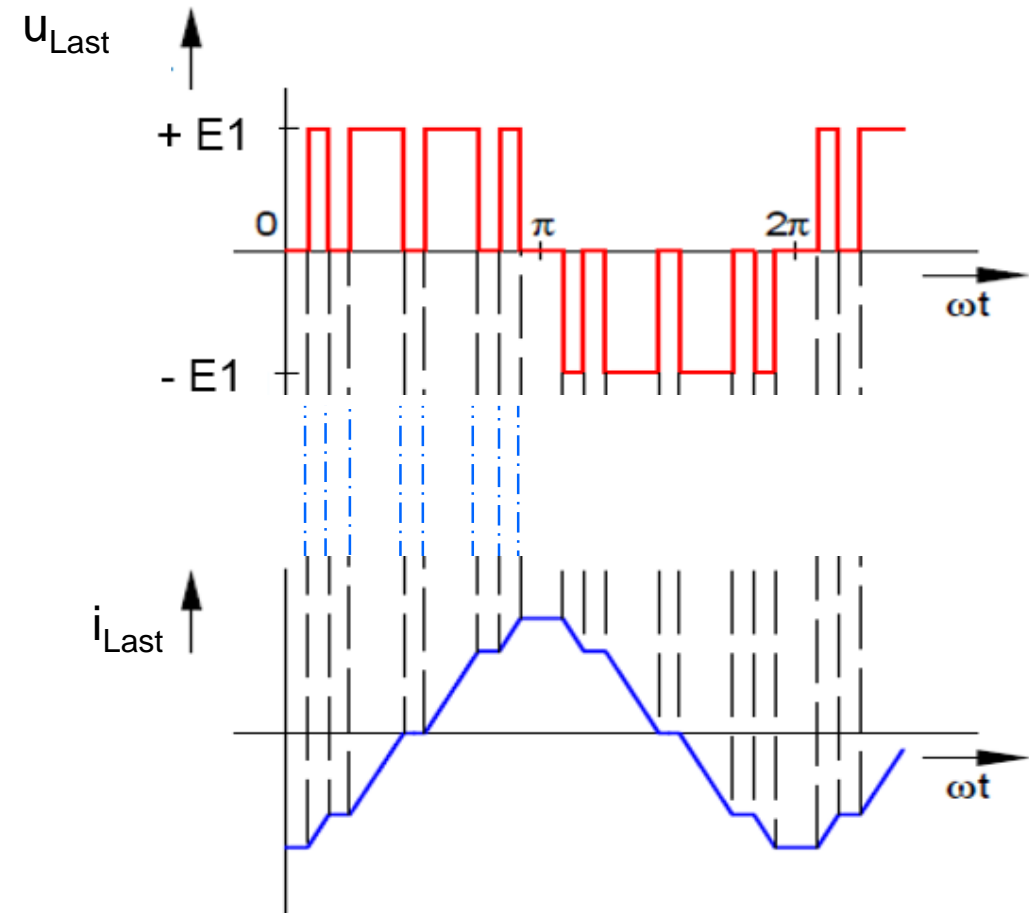
# Dreipunktverfahren

- 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  $\alpha$  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

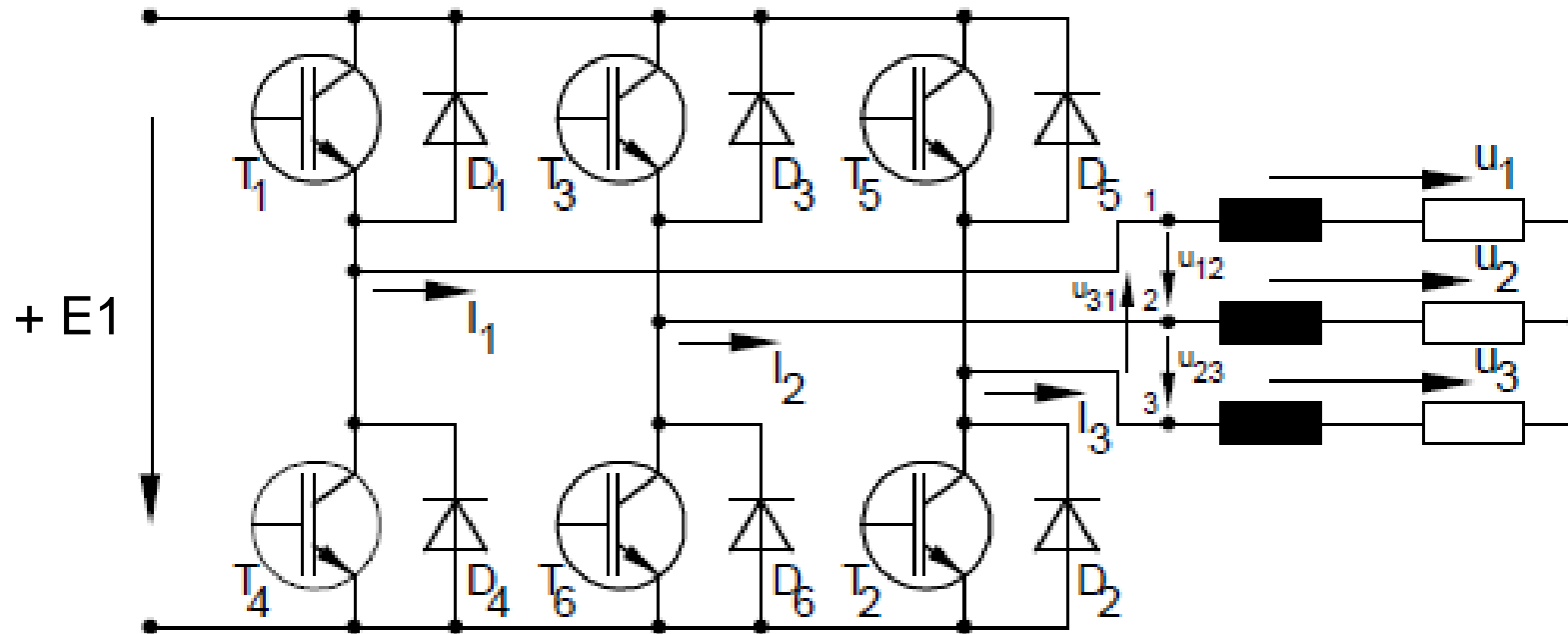
## **III. Dreipunktwechselrichter:**

- 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.

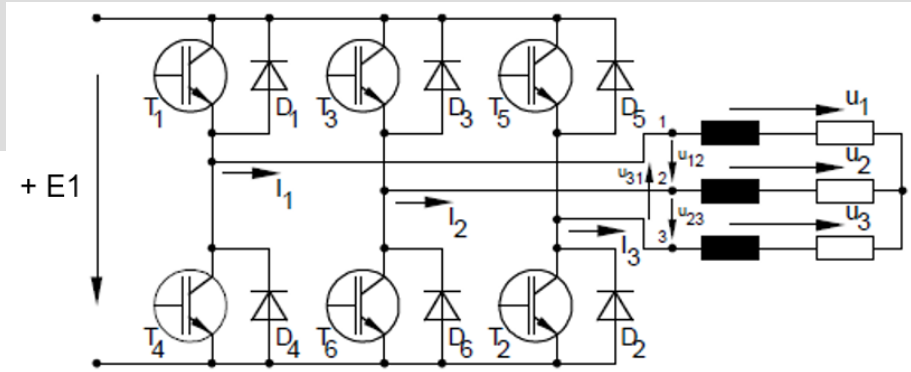
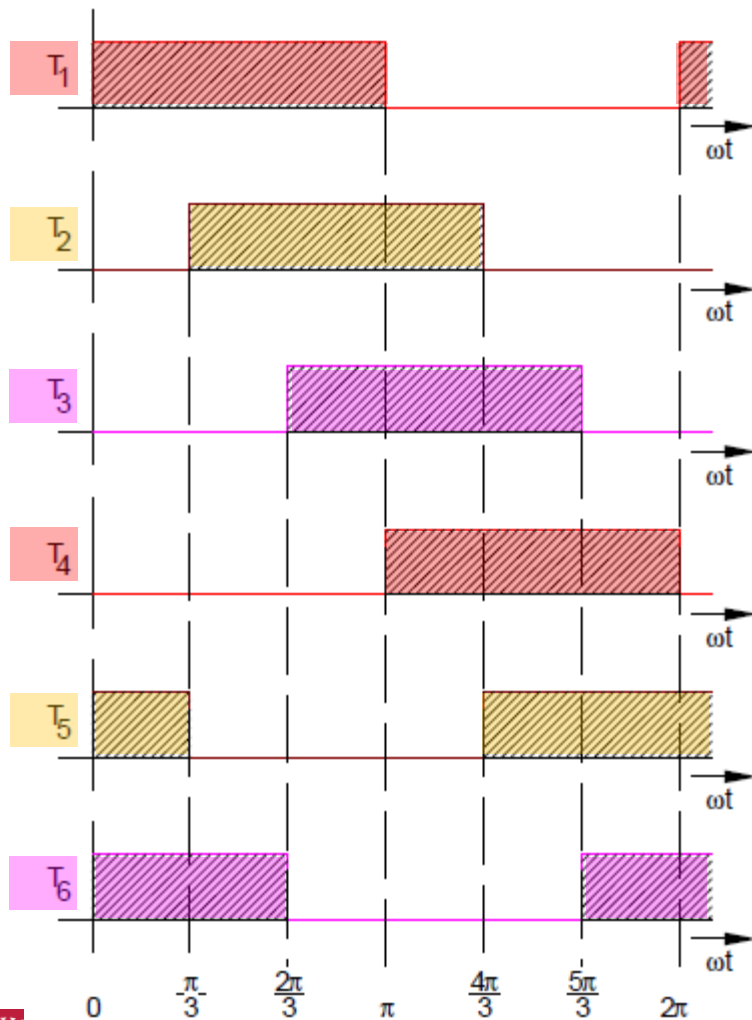
# Dreiphasen-Spannungswechselrichter (B6I)



- 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

Einschaltzeiten



- 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

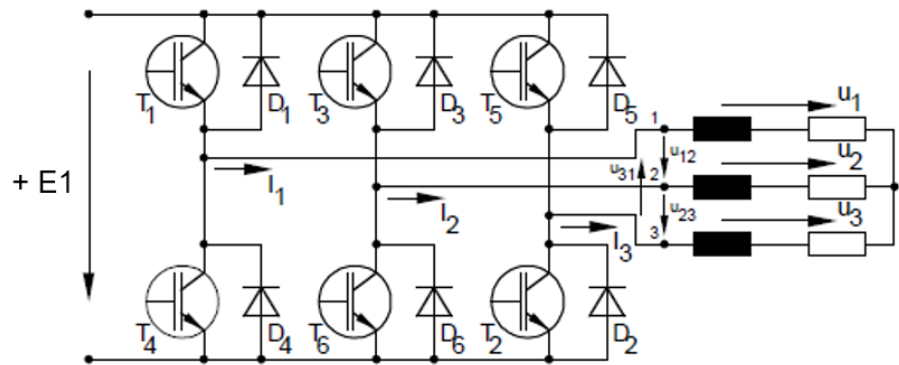
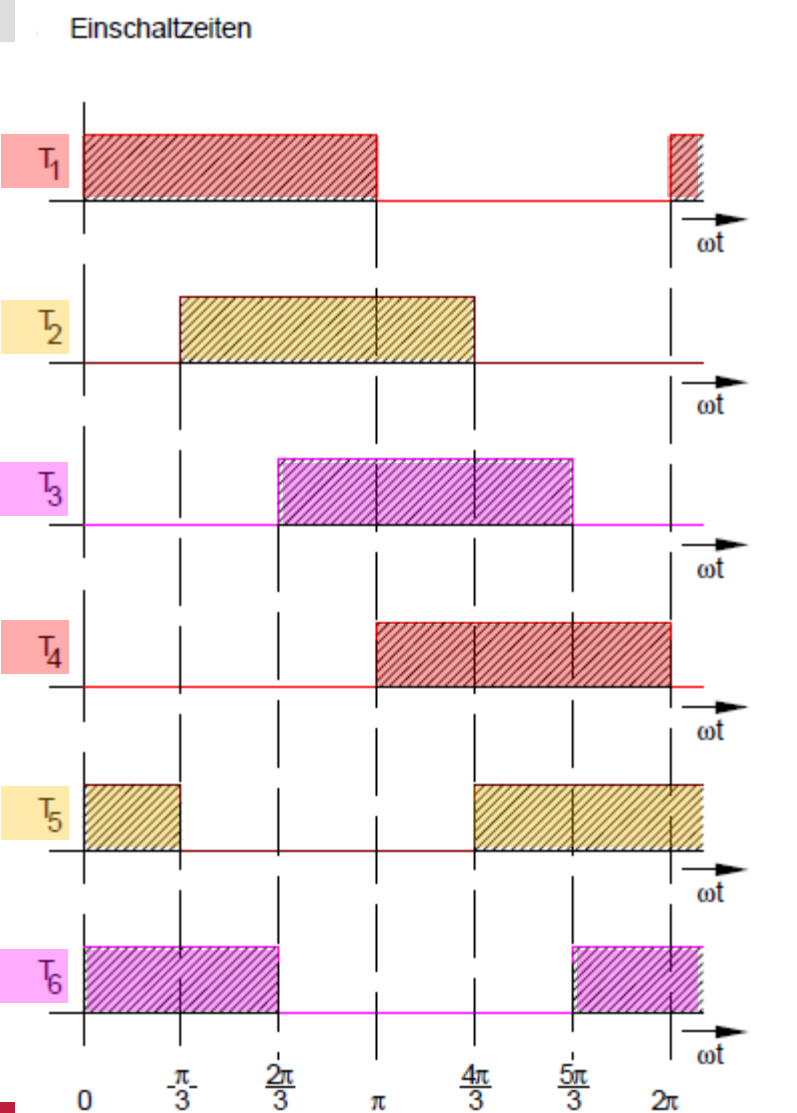
(T1,T4)

(T2,T5)

(T3,T6)

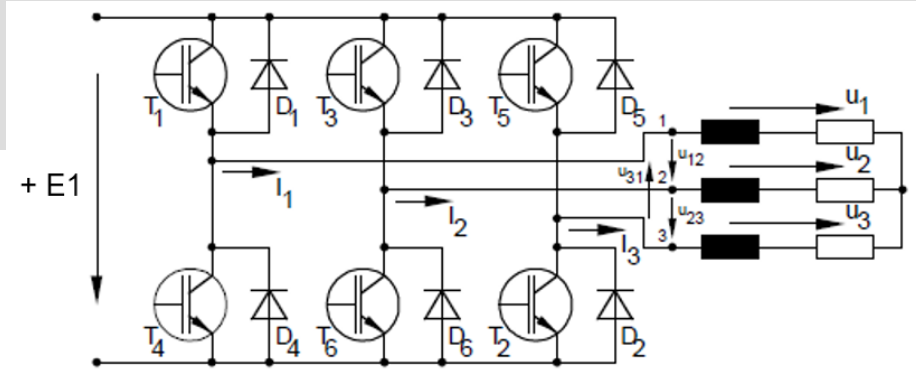
jeweils um  $120^\circ$  phasenversetzt.

# Dreiphasen-Spannungswechselrichter



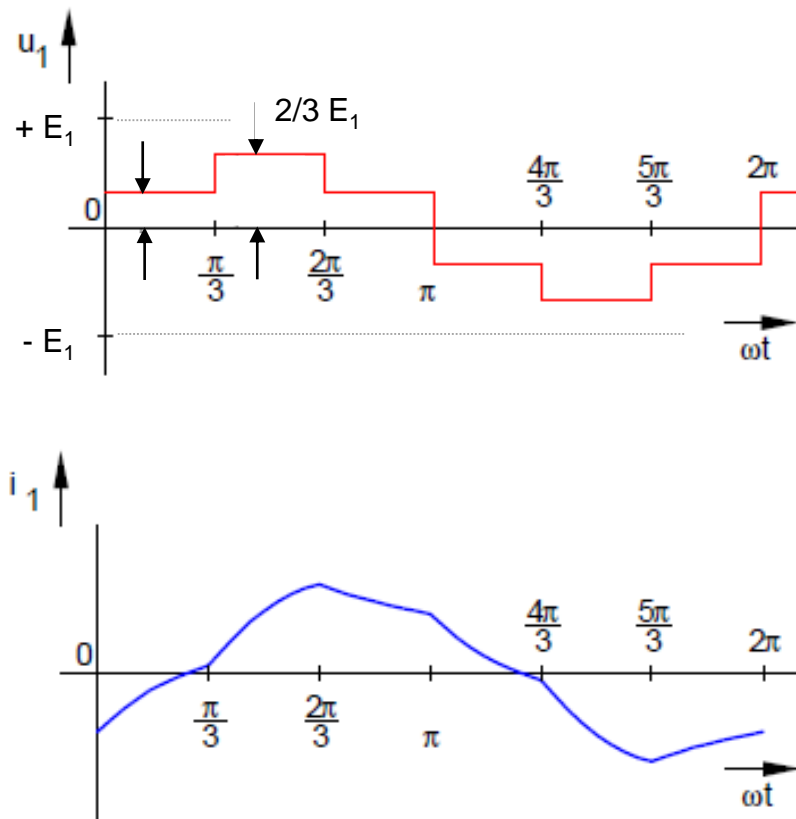
Zustand	Bereich	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	u <sub>1</sub>	u <sub>12</sub>
I.	0 ... 1/3 π	1	0	0	0	1	1	1/3 E <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>
II.	1/3 π ... 2/3 π	1	1	0	0	0	1	2/3 E <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>
III.	2/3 π ... π	1	1	1	0	0	0	1/3 E <sub>1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

# Dreiphasen-Spannungswechselrichter

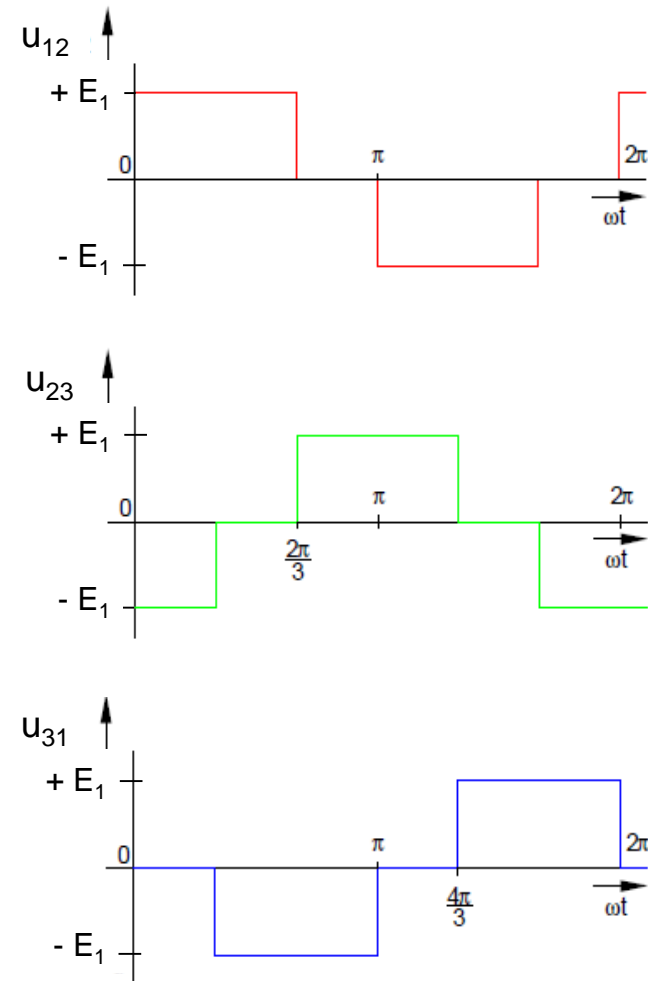


# Dreiphasen-Spannungswechselrichter

## Strangspannung und Strangstrom



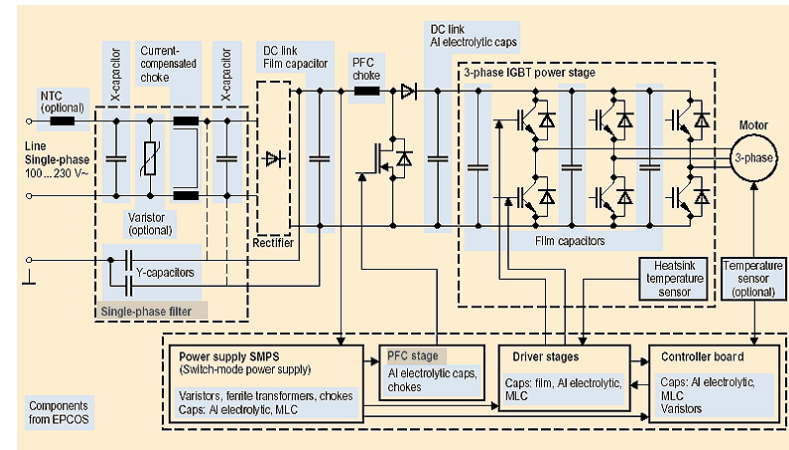
## Verkettete Spannungen



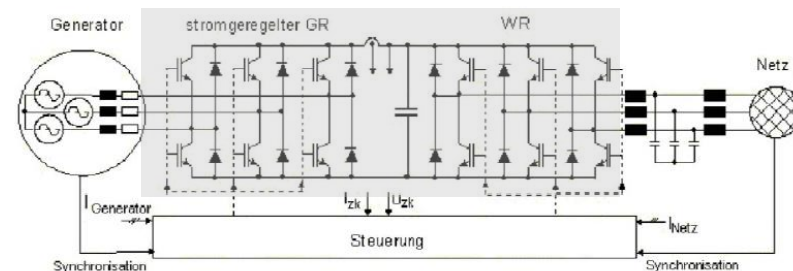
# Dreiphasen-Spannungswechselrichter (B6I)

## Anwendung:

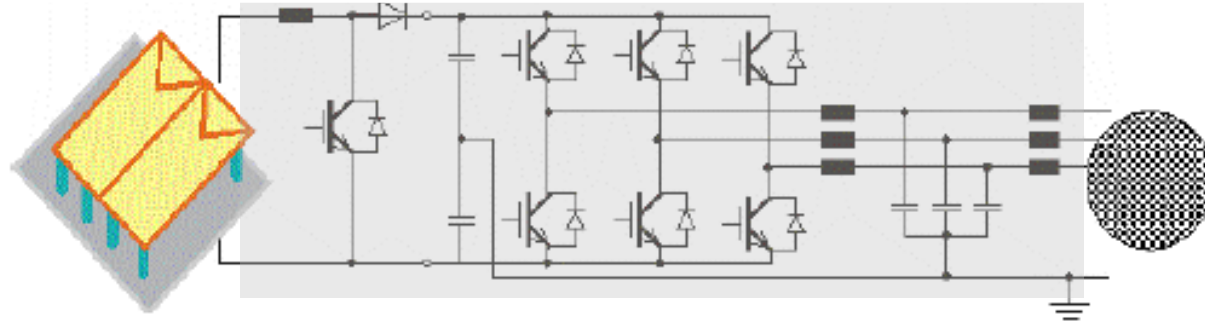
- in Umrichtern zur Drehzahl- und Drehmomentverstellung von Drehstrommotoren
- in Windenergieanlagen zur Wandlung von DC-Energie aus einem DC-Spannungs-Zwischenkreis in AC-Energie zur Einspeisung in ein dreiphasiges Netz
- zur Wandlung von DC-Energie aus einer DC-Quelle (Batterie, Photovoltaik-Zelle)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



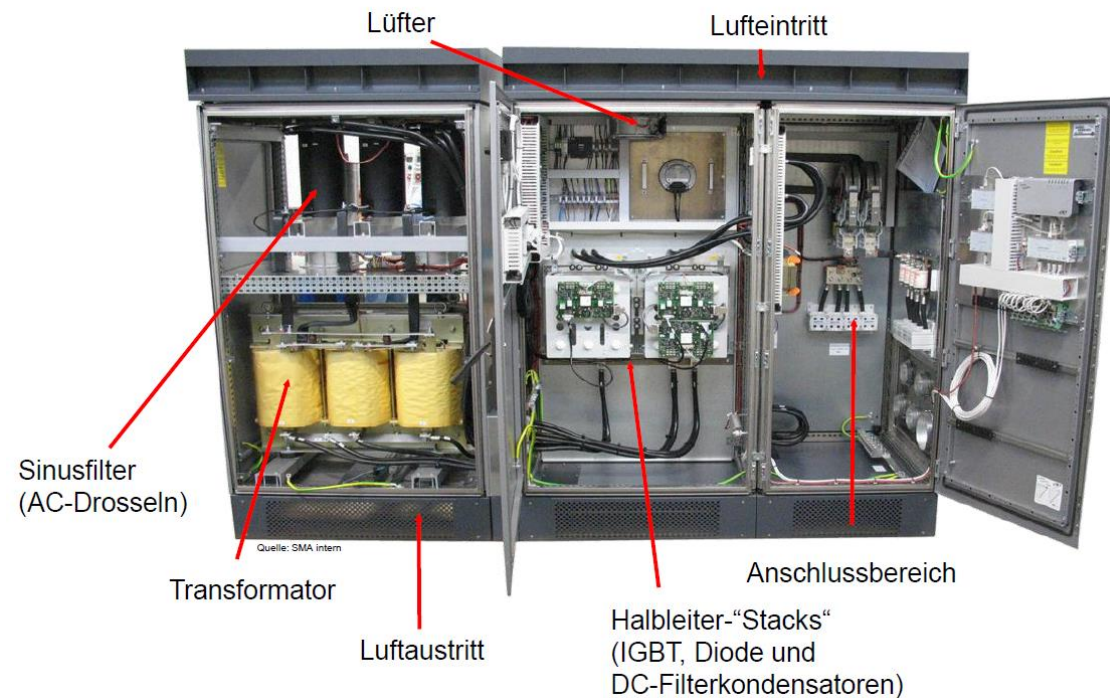
Blockschaltbild des Industrieantriebs



# Anwendungsbeispiel: PV-Wechselrichter



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



[Quelle: SMA]



# Anwendungsbeispiel: Elektrischer Antrieb im E-Fahrzeug



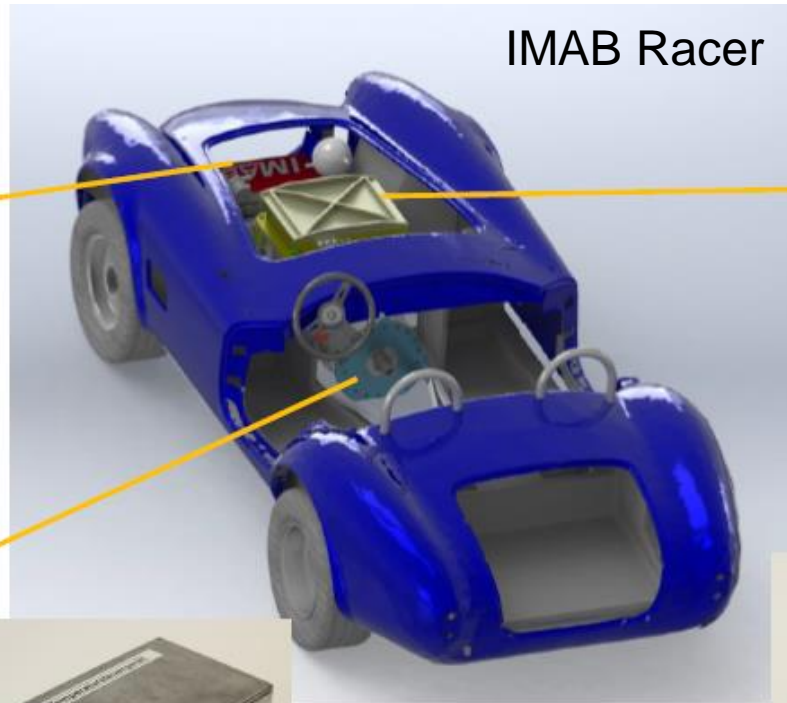
Antriebswechselrichter  
300 kVA



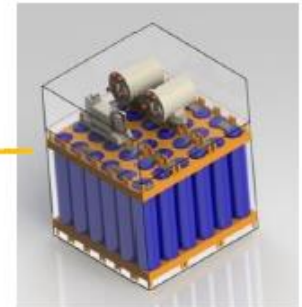
High-Performance  
E-Maschine  
(200 kW, 600 Nm)



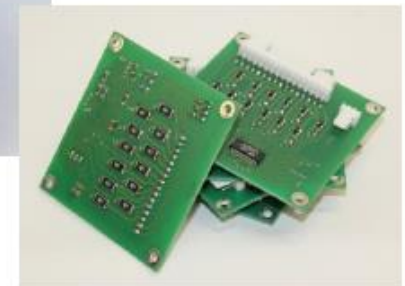
div. Steuergeräte



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 ?

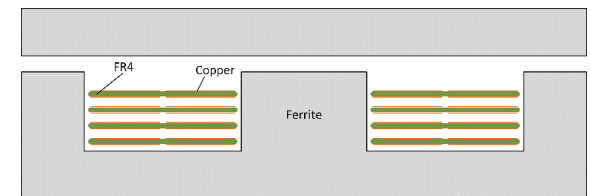
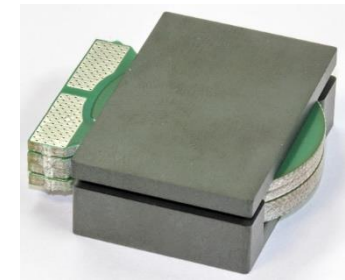
## Wintersemester (5. Semester BA):

- Vorlesung und Übung „**Grundsaltungen 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)



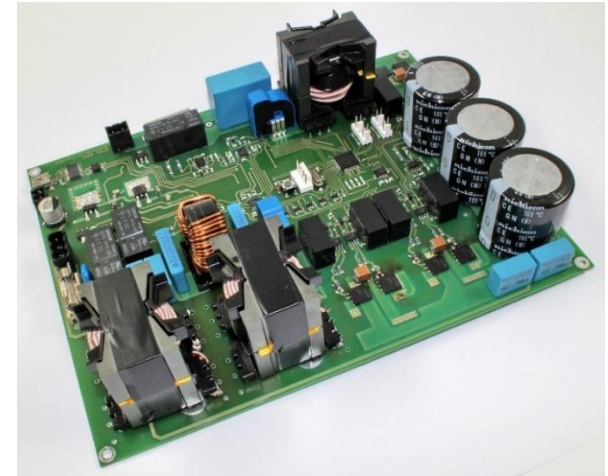
Quelle: IMAB



# Wie geht es im Masterstudium weiter ?

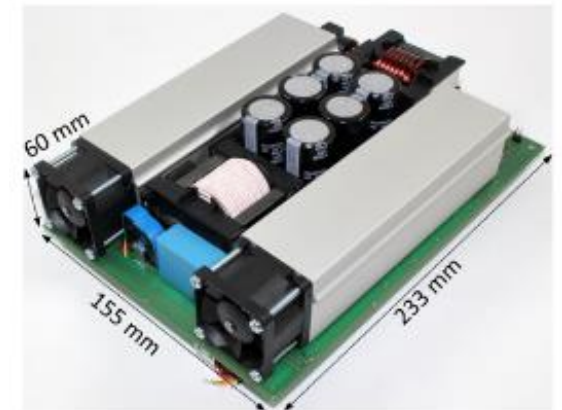
## Wintersemester:

- Vorlesung und Übung „**Erweiterte Leistungselektronik**“
- Inhalt:
  - Spezielle Stromrichter für regenerative Energiesysteme und Elektromobilität (Wind, Photovoltaik, Batterie, Traktion)
  - Eigenschaften und Ansteuerverfahren 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



Quelle: IMAB

2kW-PV-Wechselrichter für Netzeinspeisung



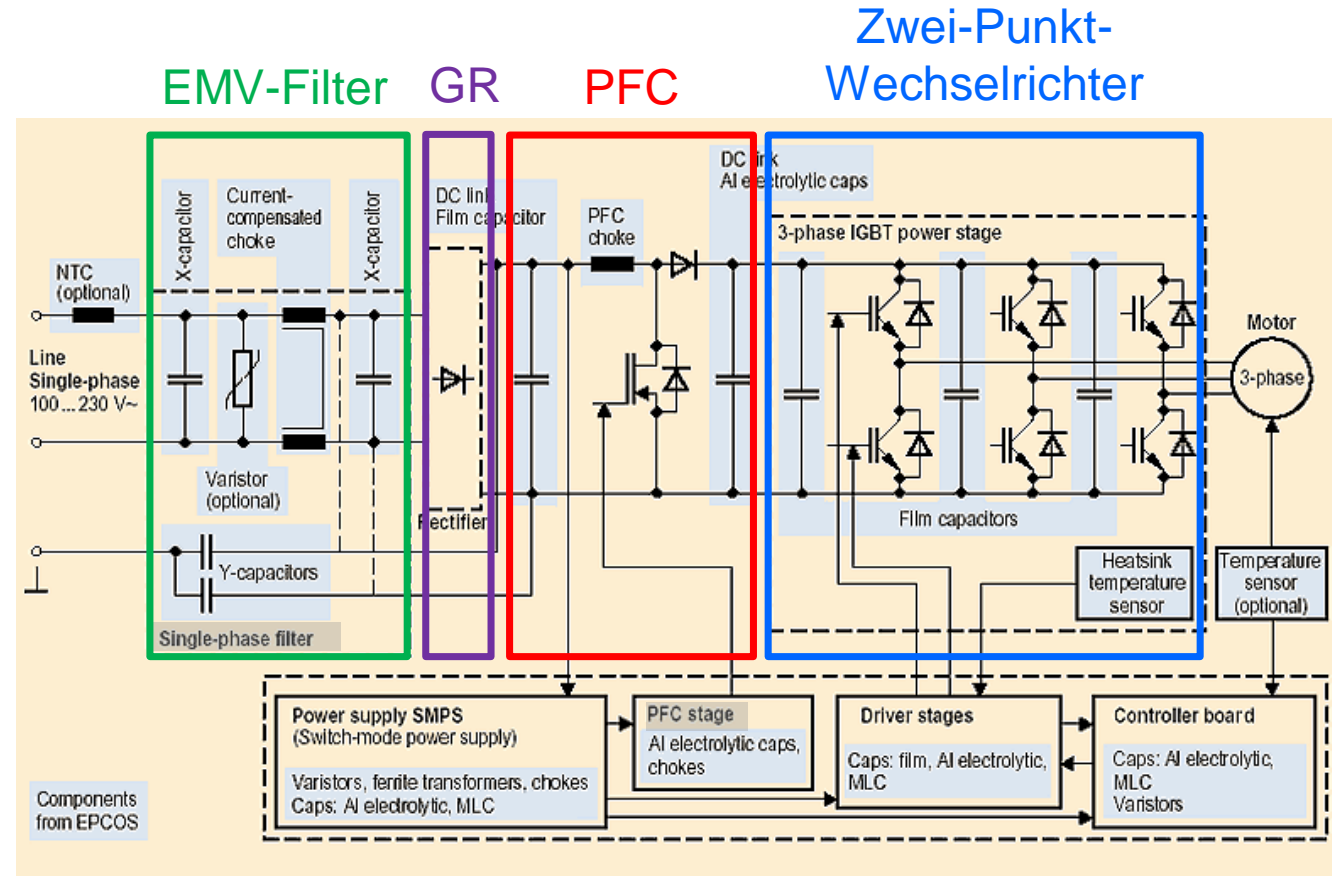
Quelle: IMAB

3kW-on-Board-Batterieladegerät

# 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

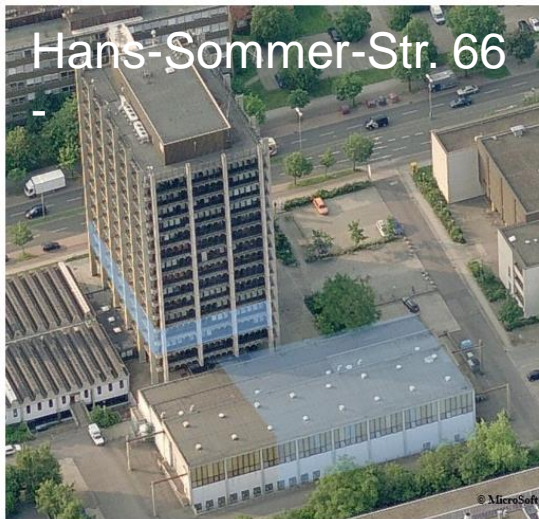


Blockschaltbild des Industrieantriebs



# Tätigkeiten für Studenten am IMAB

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



- siehe auch: [www.imab.de](http://www.imab.de)

🏠 > Struktur > Fakultäten > [Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik](#) > [Institute](#)  
> [Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen](#)

## Studentische Arbeiten

Im Folgenden finden Sie eine Auflistung von aktuell am IMAB angebotenen Bachelor-, Studien- und Masterarbeiten, HiWi-Stellen und Seminarvorträgen. Bitte sprechen Sie die Betreuenden der Themenvorschläge direkt an, um weitere Details zu erfahren.

Abschlussarbeiten, Beschäftigungen als Studentische Hilfskraft und Seminarvorträge können am IMAB jederzeit begonnen werden. Sie sind dabei nicht an die Semesterzeiten gebunden.

### Bachelor-, Studien-, Masterarbeiten und HiWi-Stellen

Folgende wissenschaftliche Themen können im Rahmen einer Bachelor-, Studien-, Masterarbeit oder einer HiWi-Stelle am IMAB bearbeitet werden. Bei Interesse wenden Sie sich gerne direkt an die betreuende Person. Weitere Themen sind gegebenenfalls vorhanden und können erfragt werden.

Art	Thema	Betreuung	Details
HiWi-Stelle	Studentische Mitarbeiterin im Umfeld des elektrischen Fliegens	<a href="#">M. Sc. R. Keilmann</a>	<a href="#">INFO</a>
Masterarbeit	Zuverlässigkeitsanalyse und zuverlässiger Betrieb von ANPC Wechselrichtern für Elektroflugzeuganwendungen	<a href="#">M.Sc. Lukas Radomsky</a>	<a href="#">INFO</a>
Beliebige Abschlussarbeit	Entwicklung eines Predictive Maintenance Ansatzes für die Leistungselektronik	<a href="#">M. Sc. R. Keilmann</a>	<a href="#">INFO</a>
Beliebige Abschlussarbeit	Modellierung von Leistungselektronik hinsichtlich Wirkungsgrad und Leistungsdichte	<a href="#">M. Sc. R. Keilmann</a>	<a href="#">INFO</a>
Beliebige Abschlussarbeit	Entwicklung einer robusten, kryogenen Leistungselektronik zur Versorgung von Raumfahrzeugen oder Kleinstsatelliten	<a href="#">M. Sc. R. Keilmann</a>	<a href="#">INFO</a>
Beliebige Abschlussarbeit	Normen für Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Zustandsüberwachung in der Luftfahrt	<a href="#">M. Sc. R. Keilmann</a>	<a href="#">INFO</a>
Masters Thesis	3-Level Voltage Source Inverter Filter Design for Electric Aircraft Propulsion Systems	<a href="#">M.Sc. Lukas Radomsky</a>	<a href="#">INFO</a>

# IMAB

▼ Institut für Elektrische  
Maschinen, Antriebe und  
Bahnen

Forschung

Mitarbeitende

Lehre

Studentische Arbeiten

Publikationen

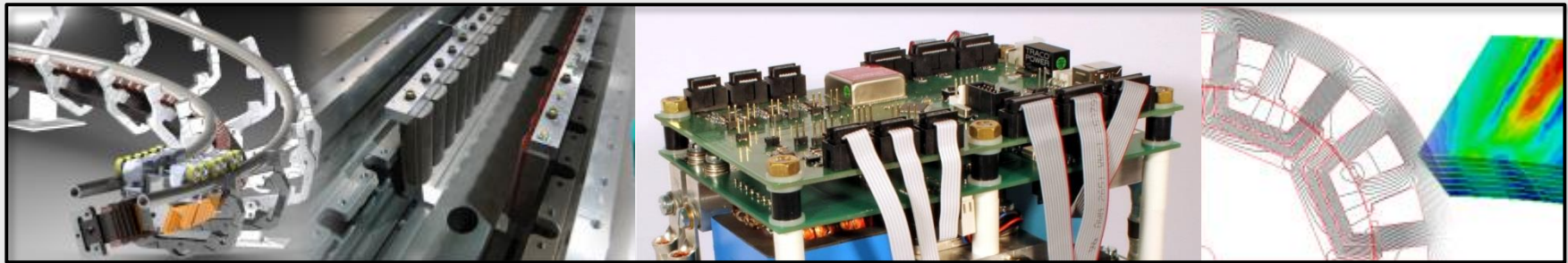
Kontakt & Anfahrt



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](mailto:r.mallwitz@tu-braunschweig.de)

T.: + 49 (0)531 3913901

M.Sc. Robert Keilmann

M: [r.keilmann@tu-braunschweig.de](mailto:r.keilmann@tu-braunschweig.de)

T.: + 49 (0)531 3917910

[www.imab.de](http://www.imab.de)



NIEDERSÄCHSISCHES  
FORSCHUNGSZENTRUM  
FAHRZEUGTECHNIK