



Technische
Universität
Braunschweig

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



Grundlagen der elektrischen Energietechnik

Teil 3: Grundlagen der Leistungselektronik

Vorlesung (6)

Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz

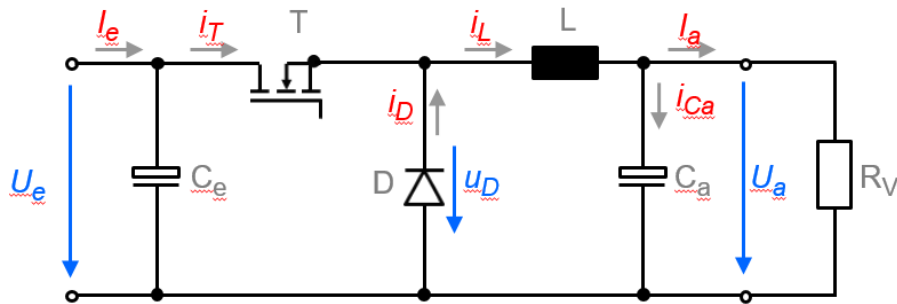
Institut für Elektrischen Maschinen, Antriebe und Bahnen - IMAB

Was machen wir heute ?

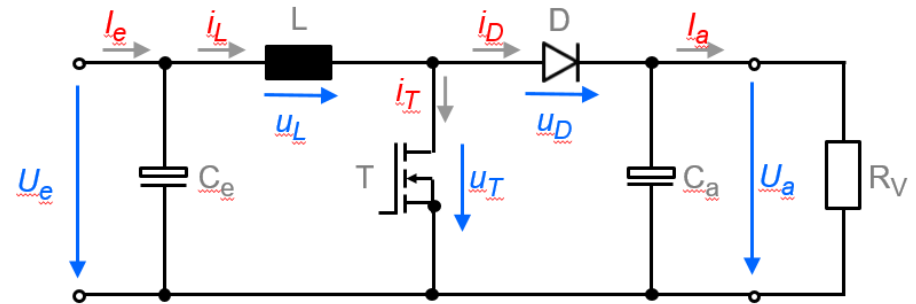
1. Einführung in die Leistungselektronik
 - 1.1. Aufgaben und Komponenten der Leistungselektronik
2. Leistungshalbleiter
 - 2.1. Bipolare Leistungshalbleiter: PN-Übergang, pn-Diode, Bipolartransistor, Thyristor, GTO
 - 2.2. Feldgesteuerte Leistungshalbleiter: MOSFET, IGBT
3. Netzgeführte Stromrichter (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)

Gleichstromsteller

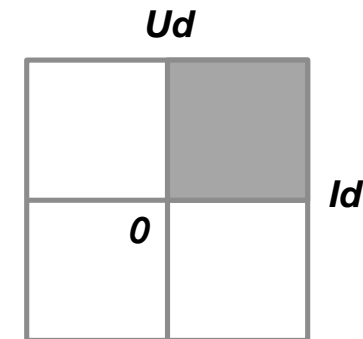
■ Tiefsetzsteller



■ Hochsetzsteller



- Die Ausgangsgrößen Spannung U_d und Strom I_d von **Tiefsetzsteller** und **Hochsetzsteller** werden innerhalb jeweils eines Quadranten gestellt. Sie können als Einquadrantensteller aufgefasst werden.

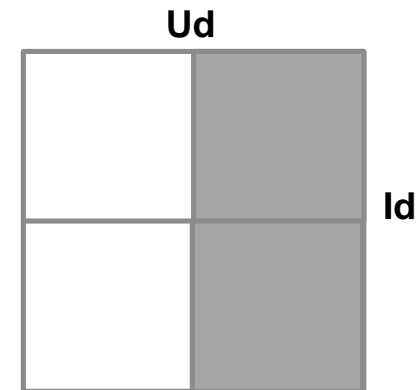


- Besteht die Forderung nach zwei Polaritäten der Spannung oder zwei Stromrichtungen werden **Zweiquadrantensteller** benötigt.

Betriebsarten und Quadranten

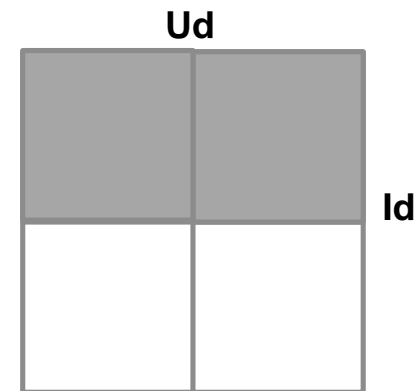
Ein **Zweiquadrantensteller** ermöglicht entweder:

- a) *bei einer gegebenen Stromrichtung eine einstellbare **Spannung unterschiedlicher Polarität** an der Last*

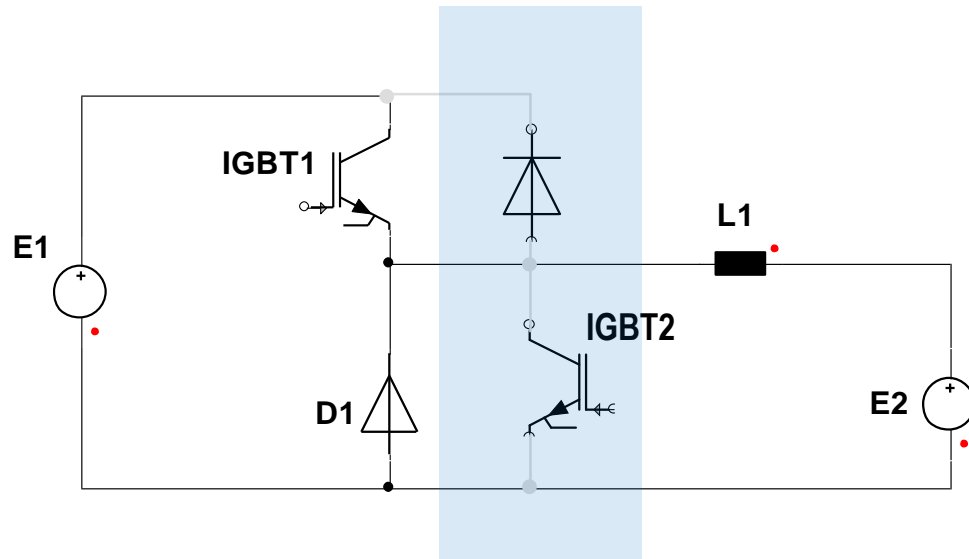


oder:

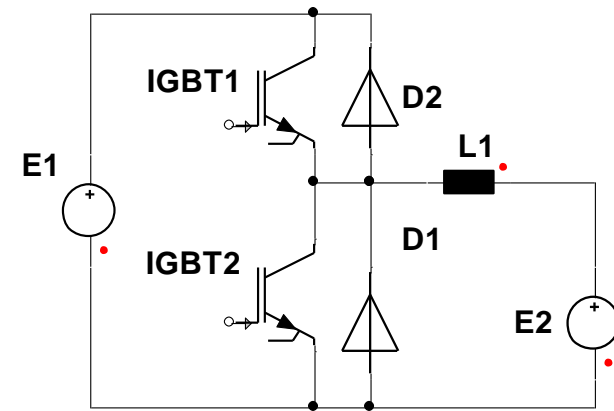
- b) *bei einer gegebenen Spannungsrichtung einen einstellbaren **Strom unterschiedlicher Richtung** an der Last*



Kombination aus Tiefsetzsteller und Hochsetzsteller zum Gleichstromsteller für zwei Stromrichtungen



Typische Darstellung

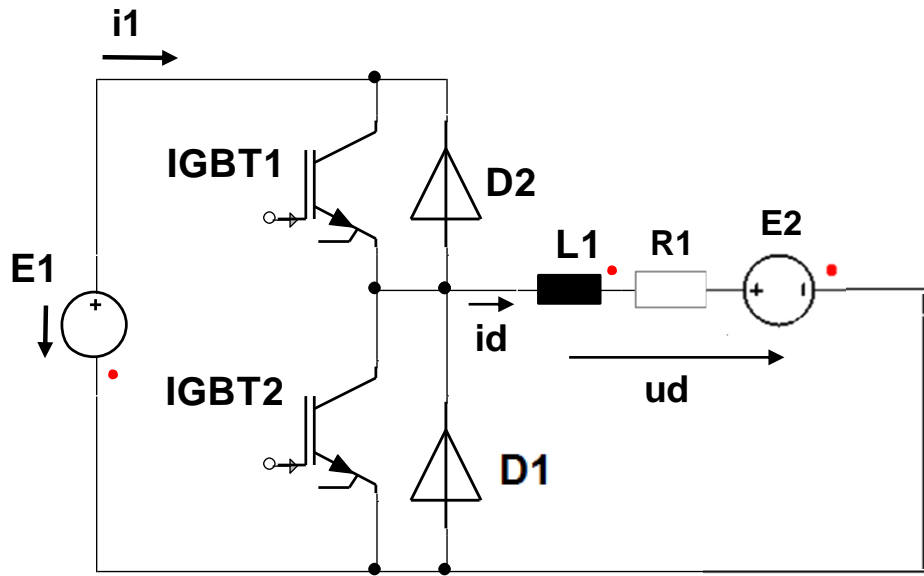


- Durch komplementäres Ansteuern der Schalter wird bidirektionaler Energiefluss möglich.

➤ **Zweiquadrantensteller mit Stromumkehr**

(bi-direktionaler DC/DC-Wandler)

Zweiquadrantensteller mit Stromumkehr

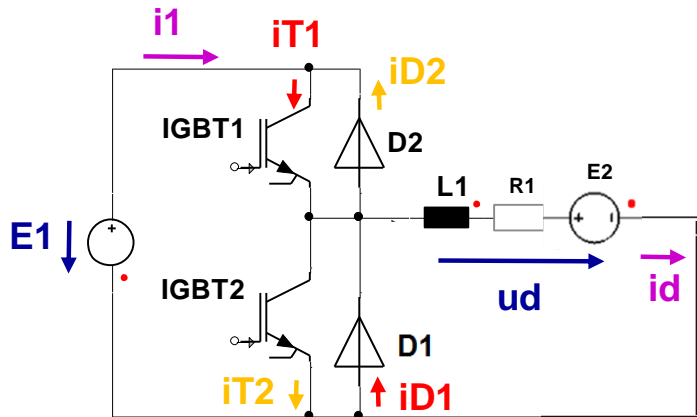


➤ Zwei unterschiedliche Betriebsarten:

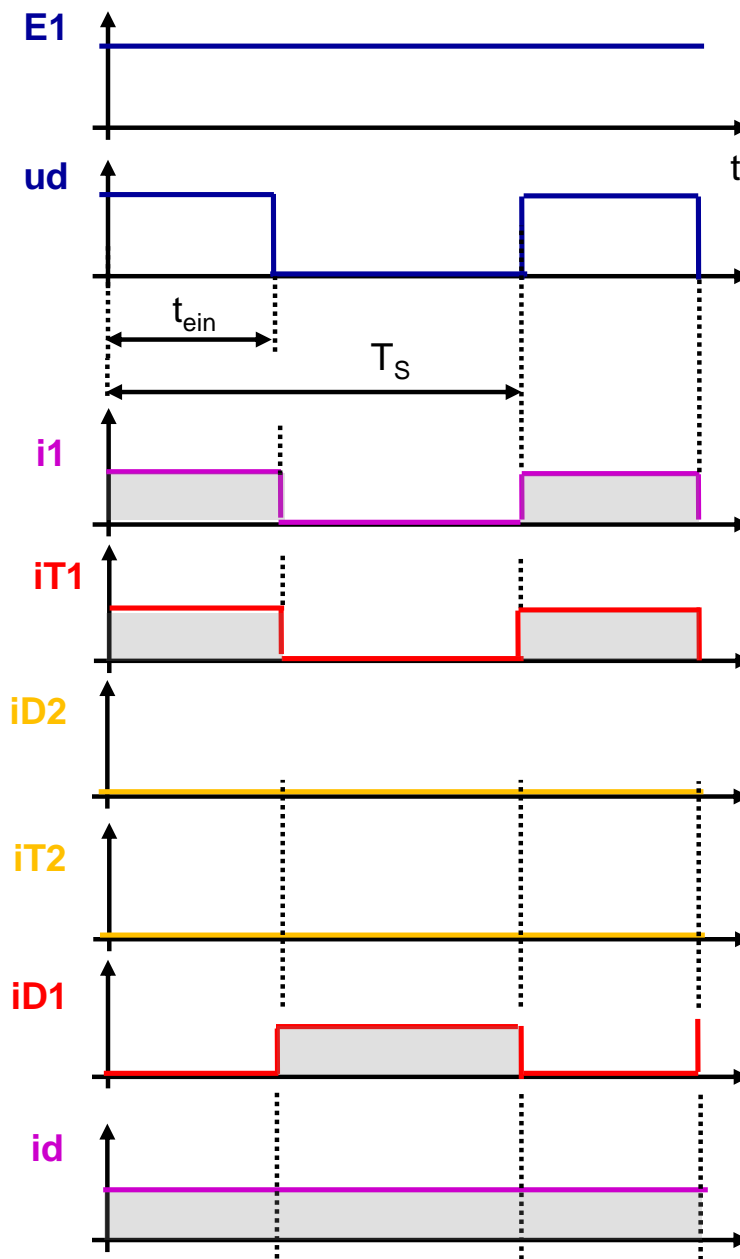
- (1) motorischer Betrieb
- (2) generatorischer Betrieb

Zweiquadrantensteller mit Stromumkehr:

motorischer Betrieb

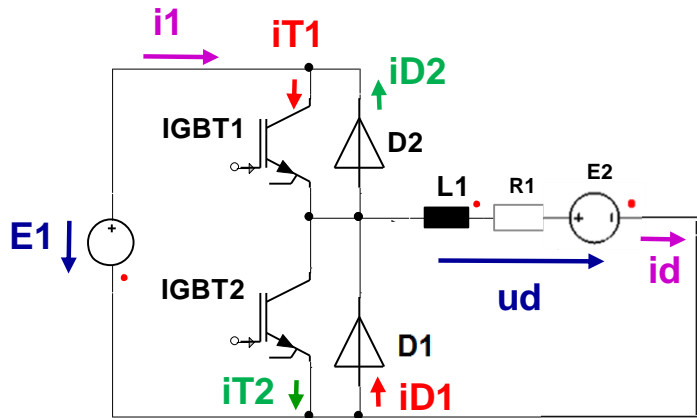


- Schalter T1 und Diode D1 arbeiten als Tiefsetzsteller
 - Schalter T2 und Diode D2 führen keinen Strom
- 1. Quadrant (Antrieb)

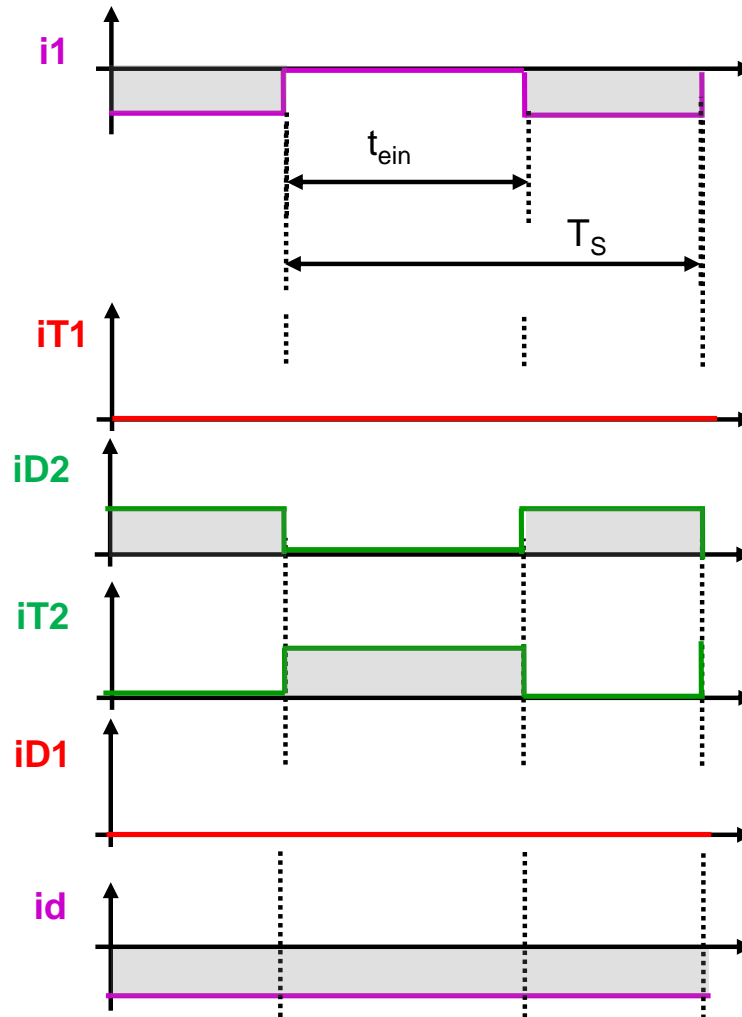


Zweiquadrantensteller mit Stromumkehr:

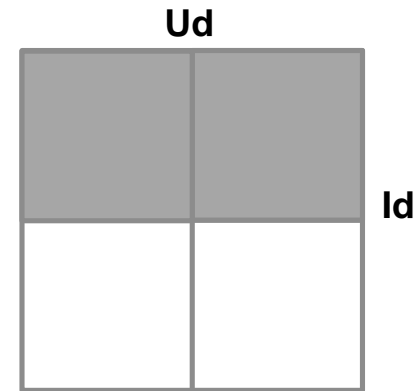
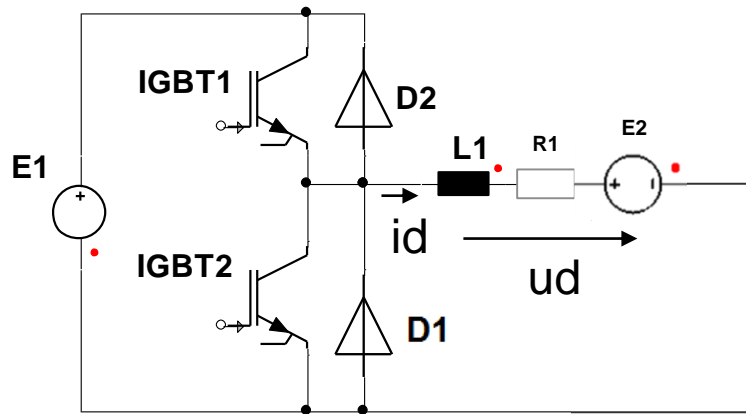
generatorischer Betrieb



- Schalter T2 und Diode D2 arbeiten als Hochsetzsteller
- Schalter T1 und Diode D1 führen keinen Strom
- 2. Quadrant (Bremsen)



Zweiquadrantensteller mit Stromumkehr: Zusammenfassung



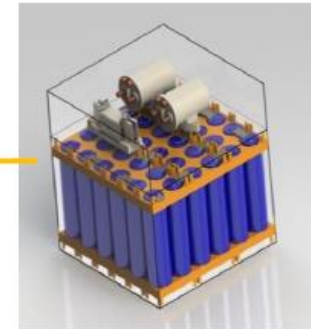
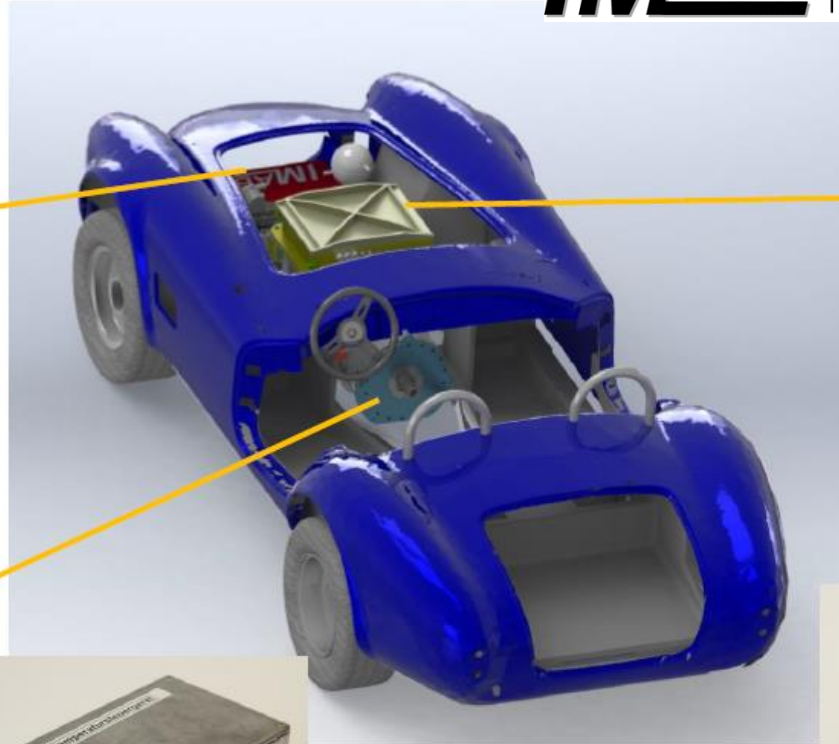
- Der Zweiquadrantensteller mit Stromumkehr ist aus einer Halbbrücke aufgebaut.
- Es handelt sich um einen Zweiquadrantensteller, der im ersten und zweiten Quadranten arbeitet.

Anwendungsbeispiel: Studentisches Projekt IMAB Racer

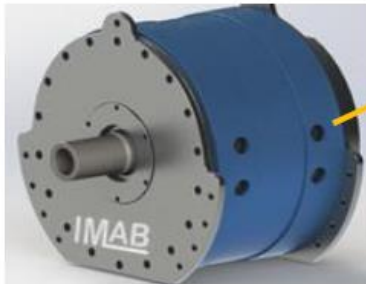
IMAB Institut für Elektrische Maschinen,
Antriebe und Bahnen
TU Braunschweig



Antriebswechselrichter
300 kVA



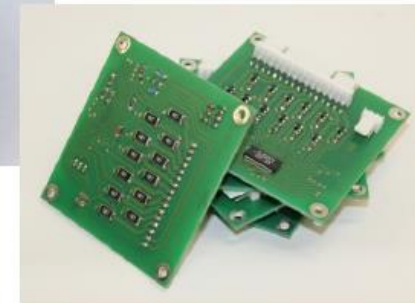
Speichersystem
(Demosystem 3 kWh)



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

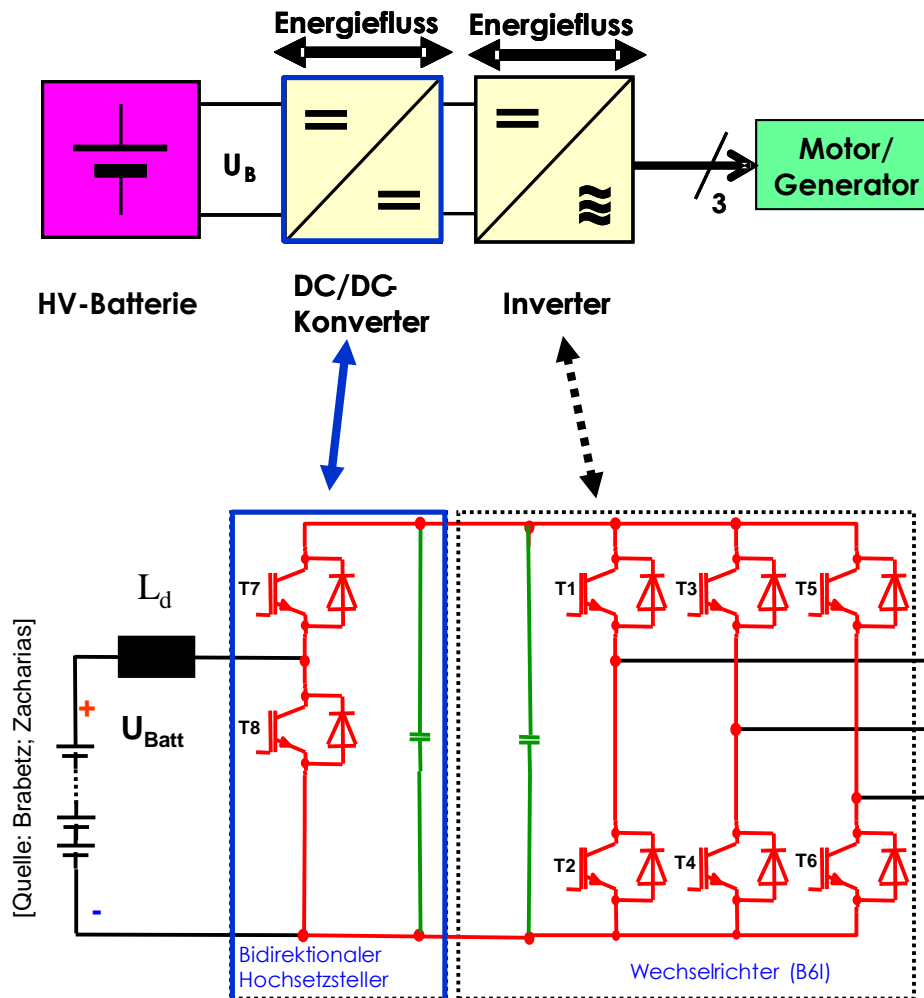


div. Steuergeräte



BMS und Balancing

Zweiquadrantensteller mit Stromumkehr im Antriebsstrang eines e-Fahrzeugs



[Quelle: Brabetz; Zacharias]

Leistungselektronik im Antriebsstrang

- Bidirektionale Topologie erlaubt Antreiben und Rekuperieren
- Einfache Topologie begünstigt hohen Wirkungsgrad
- Aufteilung auf mehrere parallele Stränge
- Modularer Aufbau möglich
- Stromwelligkeiten interferieren bei versetzter Ansteuerung destruktiv

Aufbau des 100 kW-Stacks

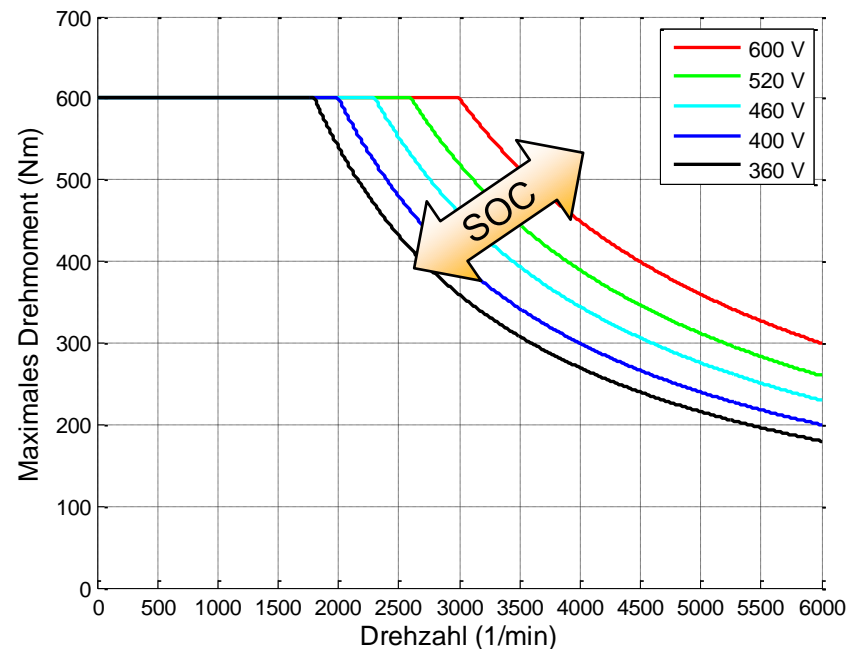
(100kHz Schaltfrequenz, 98% Wirkungsgrad)

Spannungsabhängigkeit des Antriebes

- Maximale M-n-Kennlinie der E-Maschine hängt von der verfügbaren Spannung ab
- Künstliche Begrenzung für konstante Fahreigenschaften notwendig
- Betriebspunkte mit nicht optimalen Wirkungsgraden im Antriebsstrang

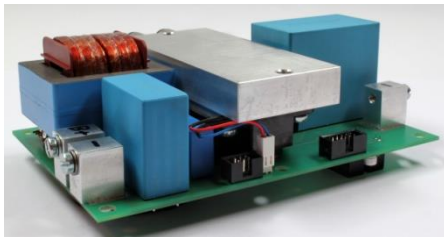
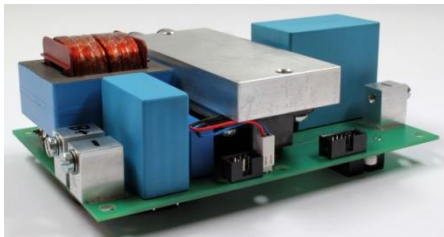
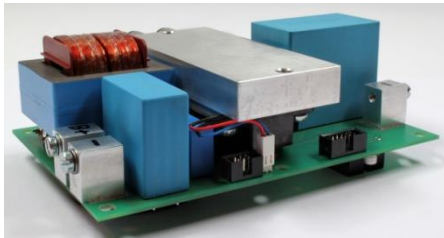
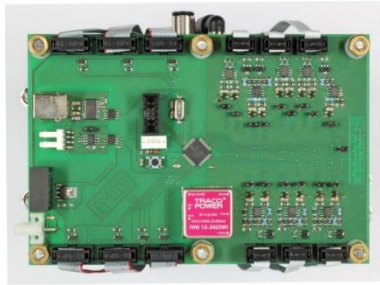


Idealisierte Kennlinien
einer am IMAB
entwickelten PMSM

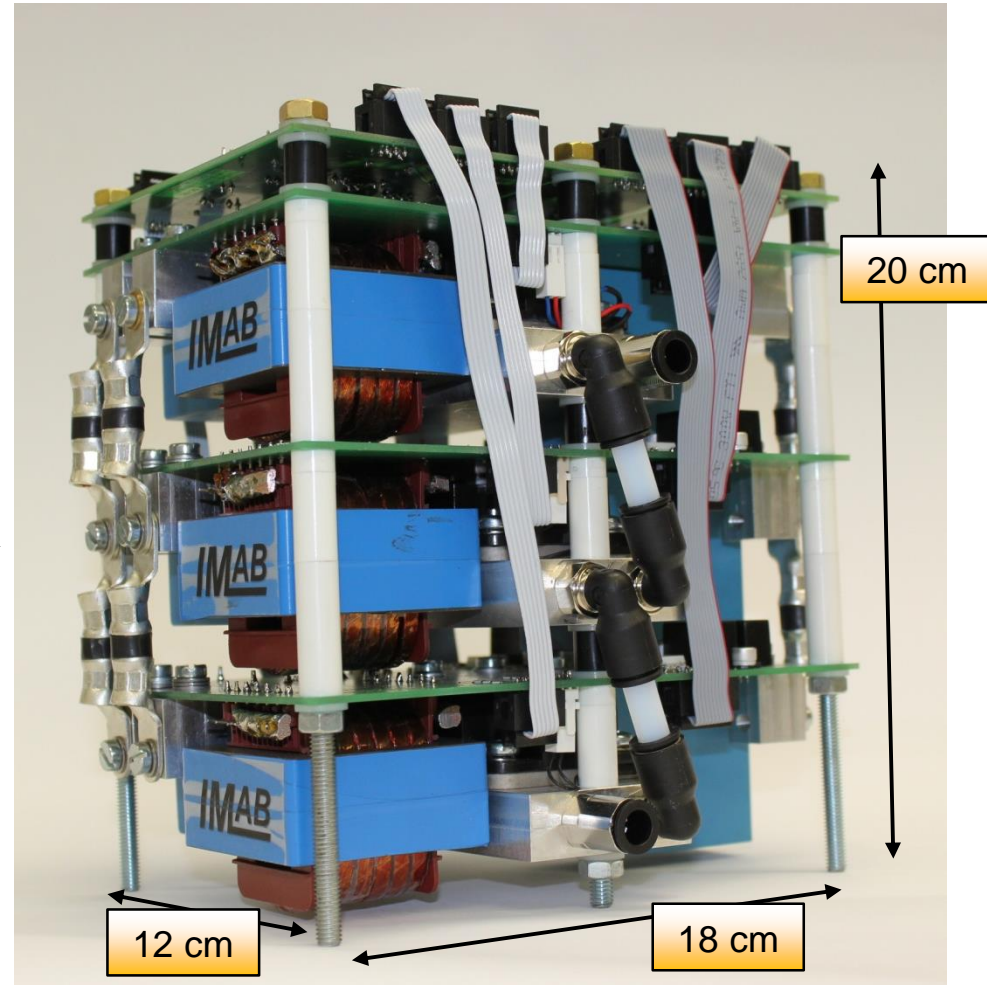


- Antrieb wird vom SOC entkoppelt
- Wechselrichter und Maschine werden optimal ausgenutzt
- Es steht immer maximale Leistung zur Verfügung

Zweiquadrantensteller mit Stromumkehr im Antriebsstrang eines e-Fahrzeugs

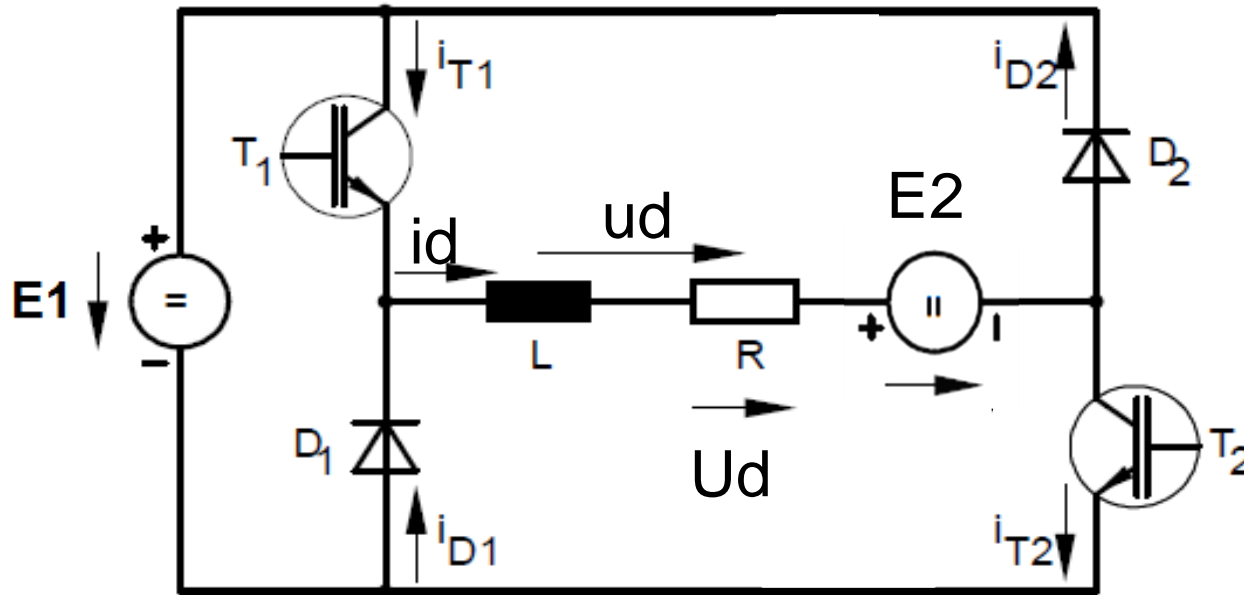


Modulares
Konzept



- Gewicht: < 4 kg / Volumen ohne Gehäuse: < 5 l

Zweiquadrantensteller mit Spannungsumkehr



T_1, T_2 : Schalter

D_1, D_2 : Freilaufdioden

L, R : Last

Verschiedene Ansteuermöglichkeiten:

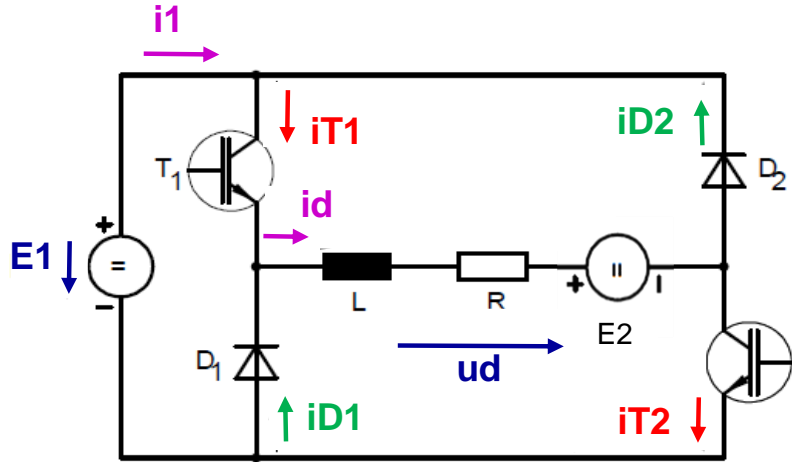
- a) Synchrone Taktung von T_1 und T_2
- b) Zeitlich versetzte Taktung von T_1 und T_2
- c) Taktung nur eines Transistors

Zweiquadrantensteller mit Spannungsumkehr

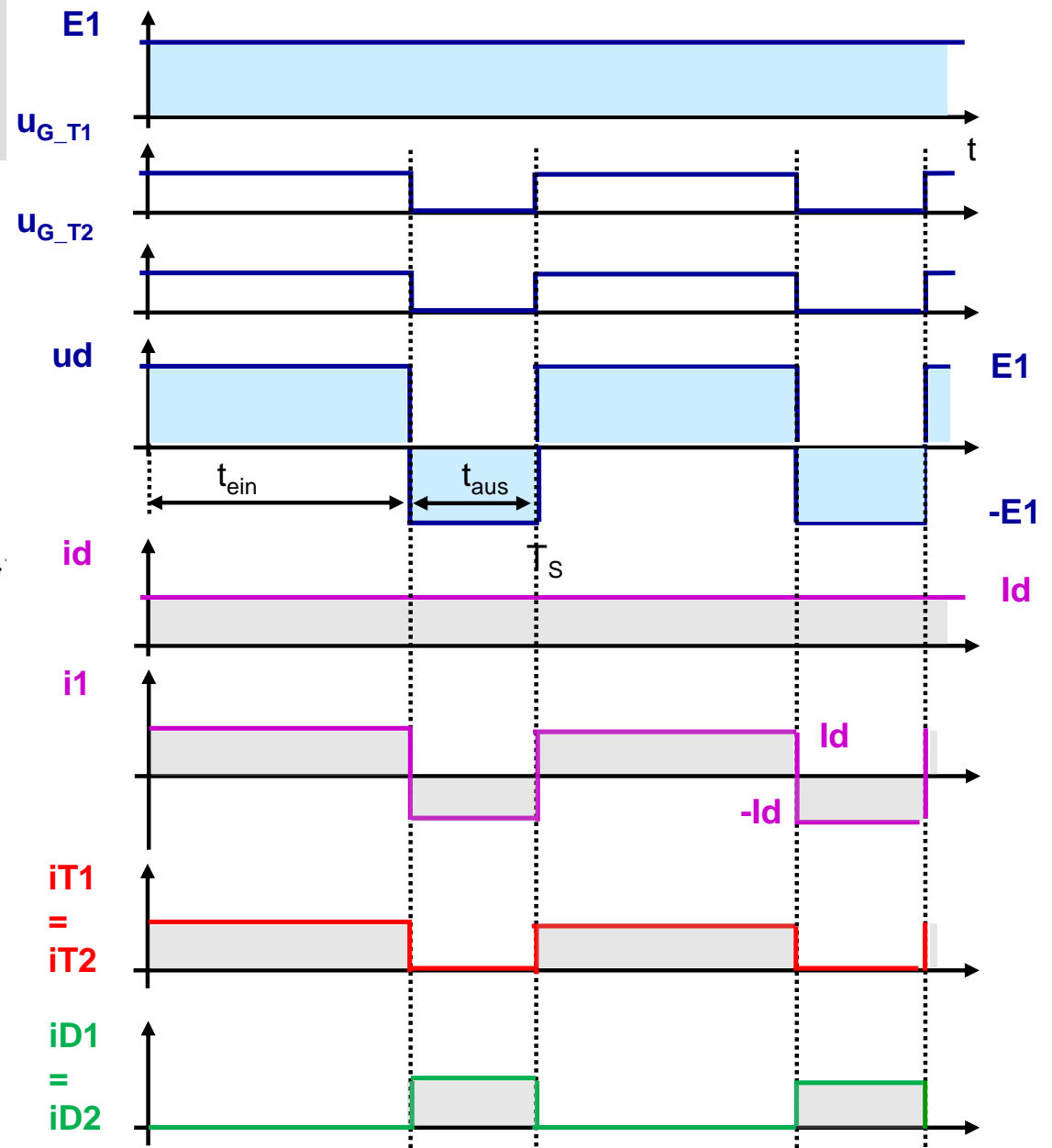
Annahmen für die weiteren Betrachtungen:

- Laststrom $i_d(t)$ = kontinuierlich (nicht lückend)
d.h. beim Öffnen eines Schalters leitet jeweils die zugehörige Freilaufdiode
- Vernachlässigung von Wechselanteilen von $i_d(t)$

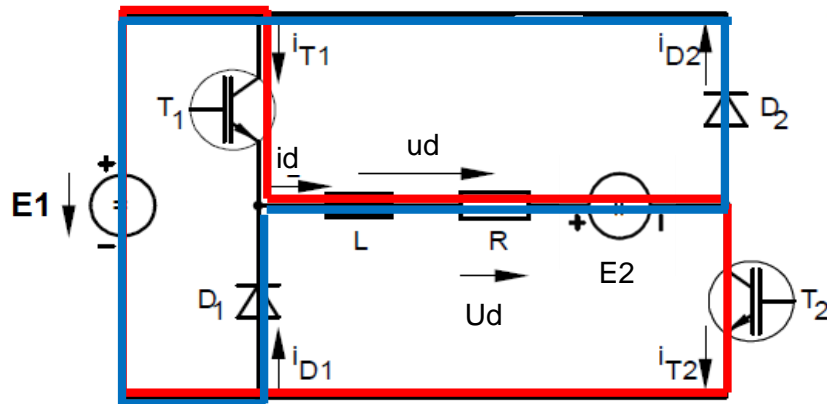
2Q-Steller mit Spannungsumkehr: Synchrone Taktung



- Schalter T1 und T2 geschlossen, Dioden D1 und D2 sperren:
 $u_d(t) = + E1$
- Schalter T1 und T2 geöffnet, Dioden D1 u. D2 übernehmen den Strom und leiten:
 $u_d(t) = - E1$



2Q-Steller mit Spannungsumkehr: Synchrone Taktung

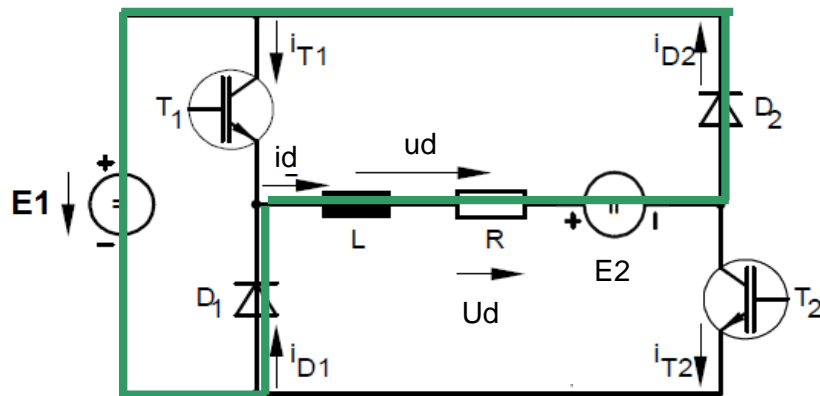
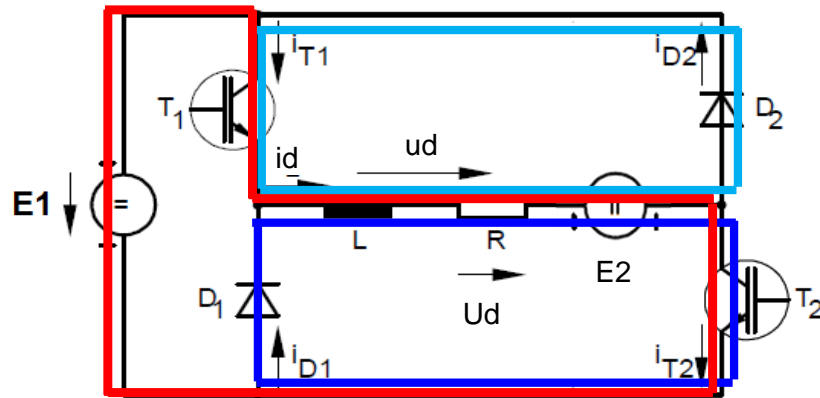


- Schalter T1 und T2 geschlossen,
Dioden D1 und D2 sperren:
 $ud(t) = + E1$
- Schalter T1 und T2 geöffnet,
Dioden D1 u. D2 übernehmen Strom
und leiten:
 $ud(t) = - E1$

➤ **Steuergesetz für den nicht-lückenden Betrieb:** $\frac{U_d}{E_1} = 2 \cdot v_{T_{T1}} - 1$

Zweiquadrantensteller mit Spannungsumkehr: Zeitlich versetzte Taktung

- Die Transistoren werden nicht gleichzeitig getaktet.



- Zeitabschnitte für positive Ausgangsspannung:

(A): T1 und T2 eingeschaltet,
D1 und D2 sperren, $u_d(t) = + E1$

(B): T1 aus-, T2 eingeschaltet,
D1 leitet, D2 sperrt (Freilauf), $u_d(t) = 0$

(C): T1 und T2 eingeschaltet,
D1 und D2 sperren, $u_d(t) = + E1$

(D): T1 ein-, T2 ausgeschaltet,
D1 sperrt, D2 leitet (Freilauf), $u_d(t) = 0$

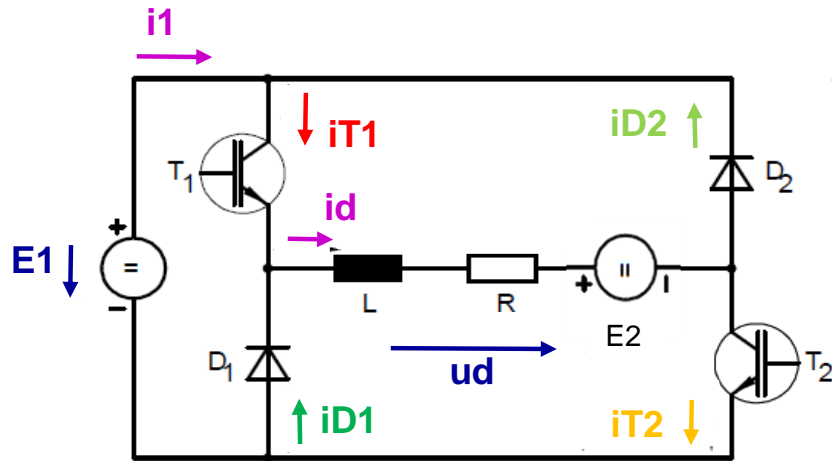
- Für negative Ausgangsspannungen:

(E): T1 und T2 ausgeschaltet,
D1 und D2 leiten, $u_d(t) = -E1$

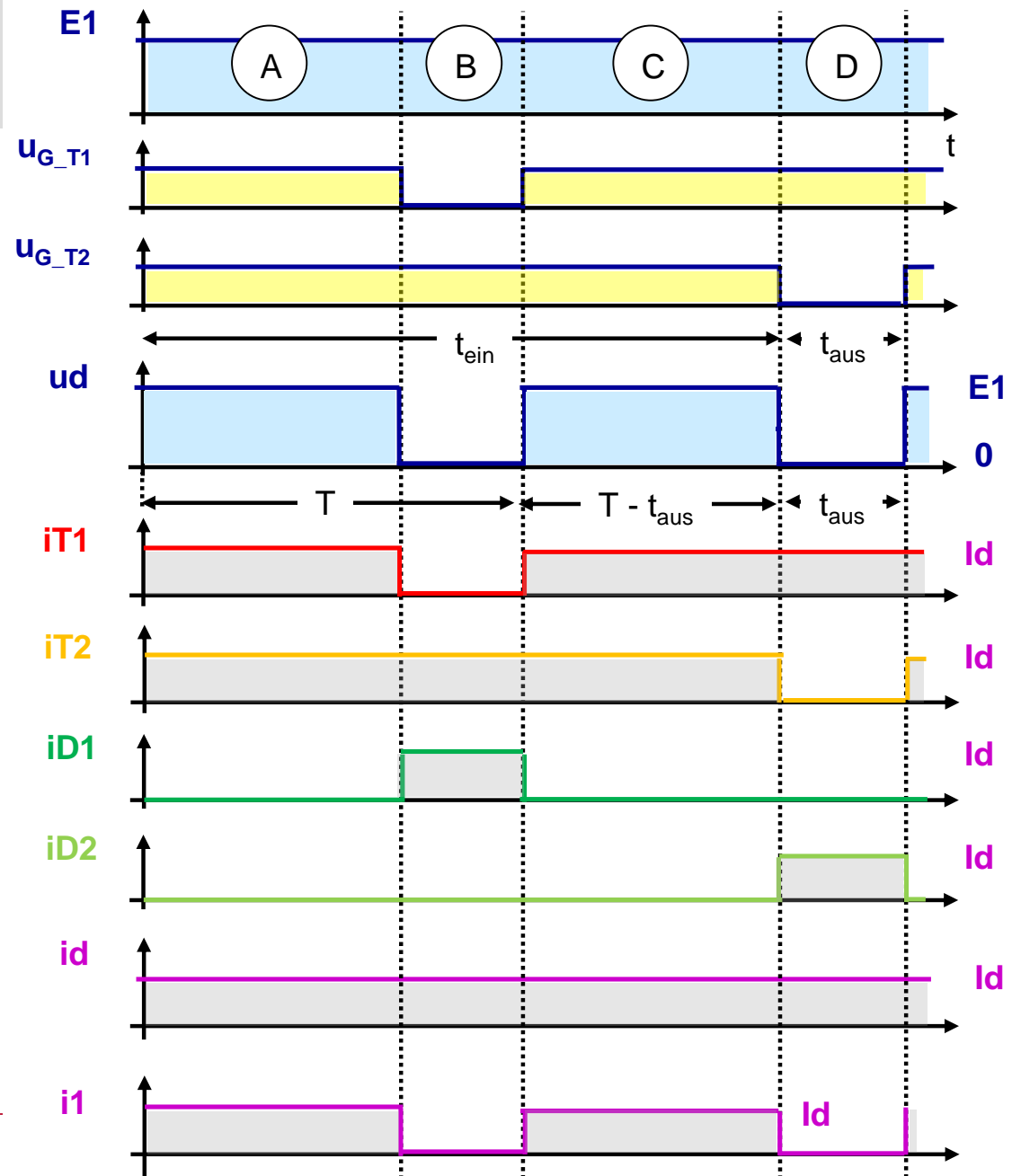
Zweiquadrantensteller mit Spannungsumkehr:

Zeitlich versetzte Taktung

- Steuern im positiven Bereich der Ausgangsspannung



- Wenn nur die oberen (oder unteren) Halbleiter leiten, fließt Strom nicht über Quelle E1 (Freilauf).
- Ausgangsspannung kann werden: $+E1$ / $-E1$ / Null (bei Null leitet nur ein Schalter)



Zweiquadrantensteller mit Spannungsumkehr: Zeitlich versetzte Taktung

- Steuergesetz für den gesamten Ausgangsspannungsbereich:

$$\frac{U_d}{E_1} = v_T - 1$$

mit

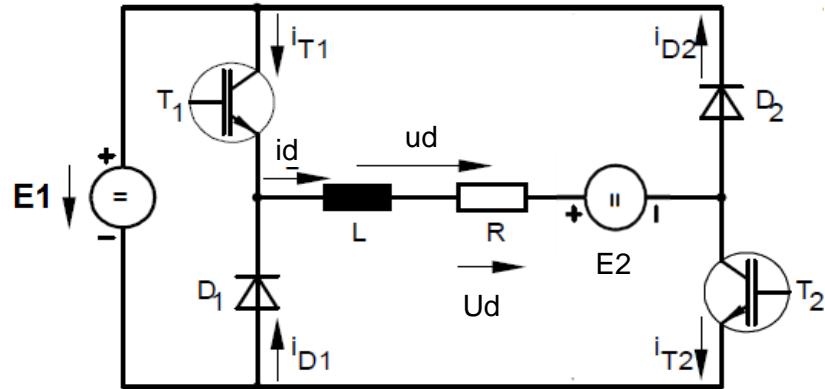
$$v_T = \frac{t_{ein}}{T}$$

und

$$1 \leq v_T \leq 2$$

- Für Tastgrade $v_T < 1$, wird die Ausgangsspannung negativ.

Zweiquadrantensteller mit Spannungsumkehr: Taktung nur eines Transistors

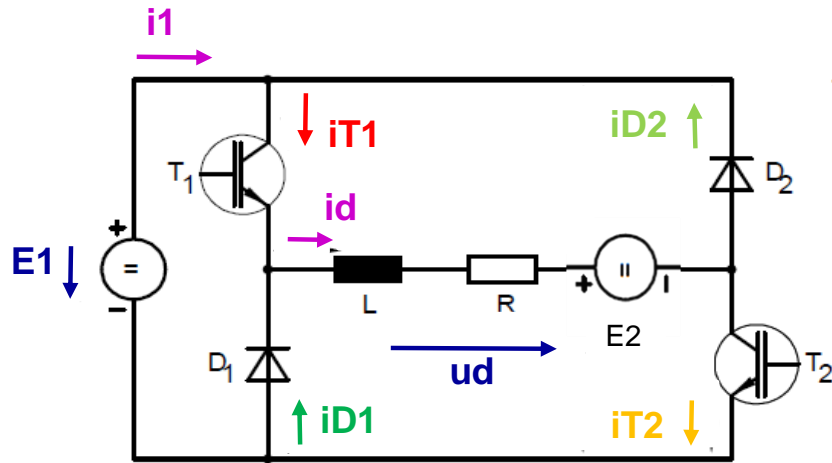


- Ein Transistor ist „dauerhaft“ an bzw. aus, der andere pulst.
- Welcher Transistor „dauerhaft“ an ist, hängt ab von der gewünschten Polarität der Ausgangsspannung:
 - Positiver Mittelwert der Ausgangsspannung: T_1 pulst, T_2 „dauerhaft“ ein.
 - Negativer Mittelwert der Ausgangsspannung: T_1 „dauerhaft“ aus, T_2 pulst.

Zweiquadrantensteller mit Spannungsumkehr:

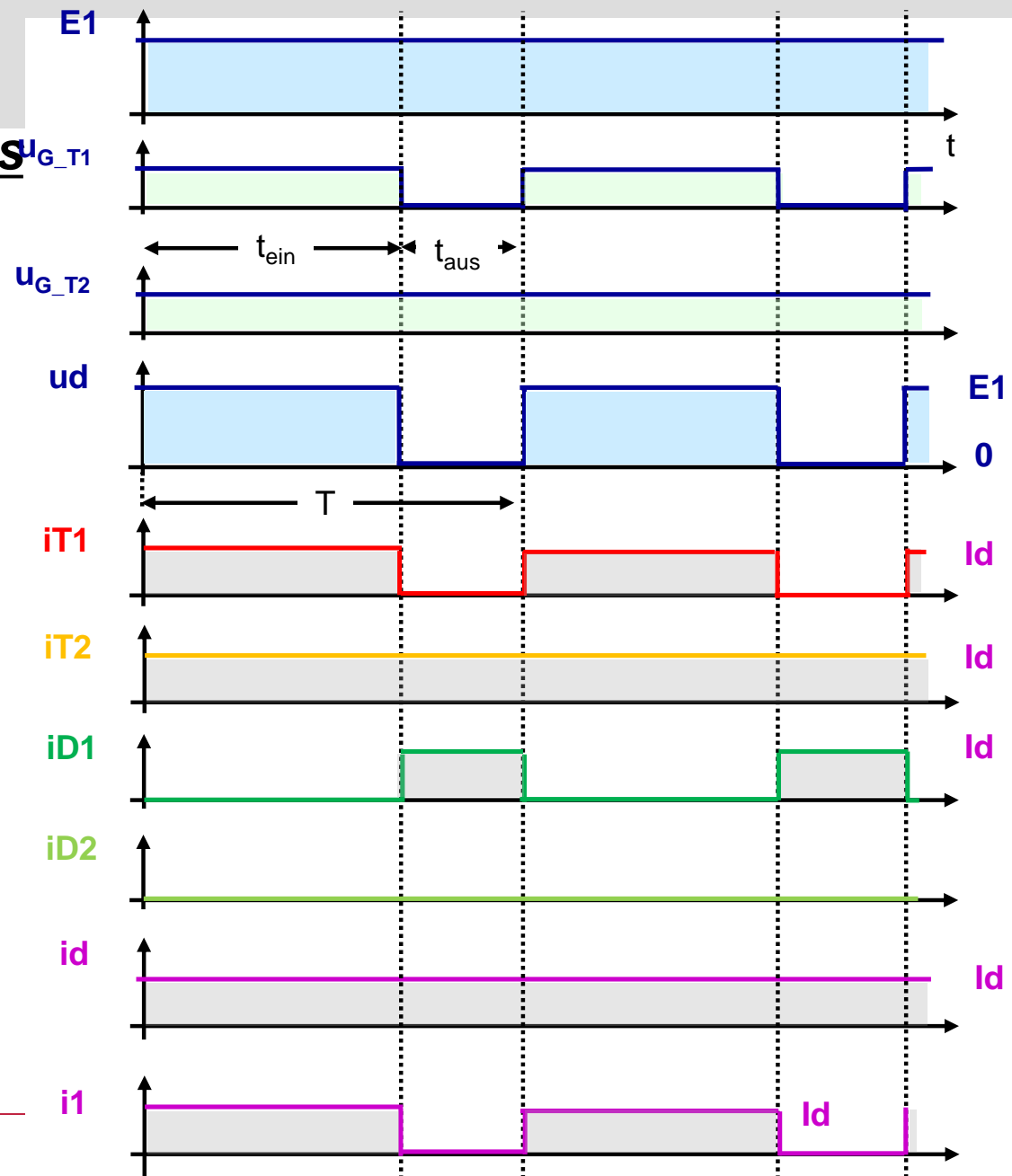
Taktung nur eines Transistors

- Positiver Ausgangsspannung:
T1 pulst, T2 „dauerhaft“ ein.

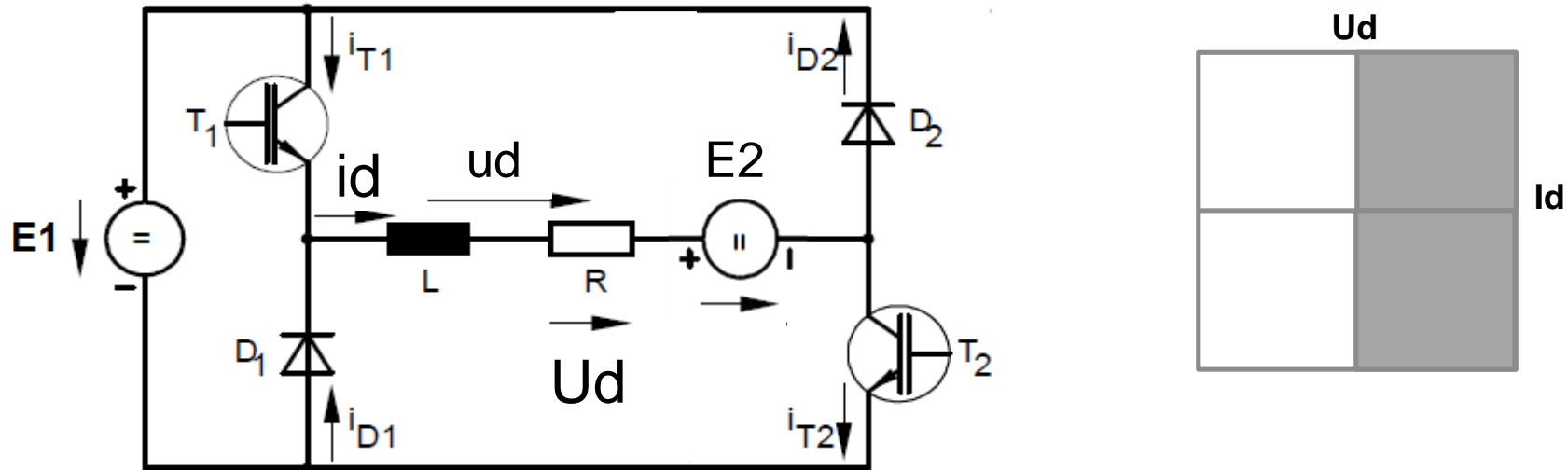


- Steuergesetz für positive Ausgangsspannung :

$$\frac{U_d}{E_1} = v_T$$



Zweiquadrantensteller mit Spannungsumkehr: Zusammenfassung



- Der Zweiquadrantensteller mit Spannungsumkehr unterscheidet sich in der Anordnung der Bauelemente vom Zweiquadrantensteller mit Stromumkehr (nicht jedoch in deren Anzahl).
- Es handelt sich um einen Zweiquadrantensteller, der im ersten und vierten Quadranten arbeitet.
- Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Ansteuerung (von T_1 und T_2).

Zweiquadrantensteller: Anwendungen

- Teil des Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen
- Speisung von Gleichstrommaschinen in der Antriebstechnik

Was haben wir heute gemacht ?

- **Selbstgeführte Stromrichter**
 - Zweiquadrantensteller

Was kommt in der nächsten Vorlesung?

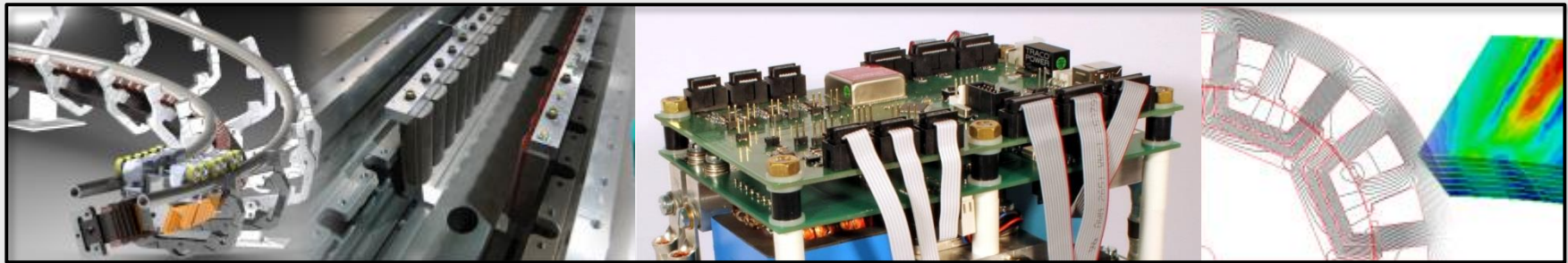
- **Selbstgeführte Stromrichter**
 - Vierquadrantensteller



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. Robert Keilmann

M: r.keilmann@tu-braunschweig.de

T.: + 49 (0)531 3917910

www.imab.de



NIEDERSÄCHSISCHES
FORSCHUNGSZENTRUM
FAHRZEUGTECHNIK