



Technische
Universität
Braunschweig

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



Grundlagen der Energietechnik

Teil 3: Grundlagen der Leistungselektronik

Vorlesung (5)

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)

Netzgeführte und selbstgeführte Stromrichter

1. Netzgeführte Stromrichter

(auch: **fremdgeführte Stromrichter**):

- Bei den **netzgeführten Stromrichterschaltungen** wird die periodische **Kommutierung des Stromes von einem Ventil auf das andere durch die äußere Spannung** (i.d.R. durch die **Netzspannung**) beeinflusst.
- Die für die Kommutierung erforderliche Kommutierungsspannung wird von außen - hier dem Netz - geliefert und hat bei den nicht durch Steuerbefehle abschaltbaren Ventilen (**Dioden, Thyristoren**) zum Abschalten geführt.
- Ein solcher fremdgeführter Betrieb ist jedoch nicht möglich, wenn eine solche Wechsellspannung nicht zur Verfügung steht oder eine Zündung bzw. Löschung von Ventilzweigen erforderlich wird, die unabhängig von der Frequenz des speisenden Netzes sein muss.

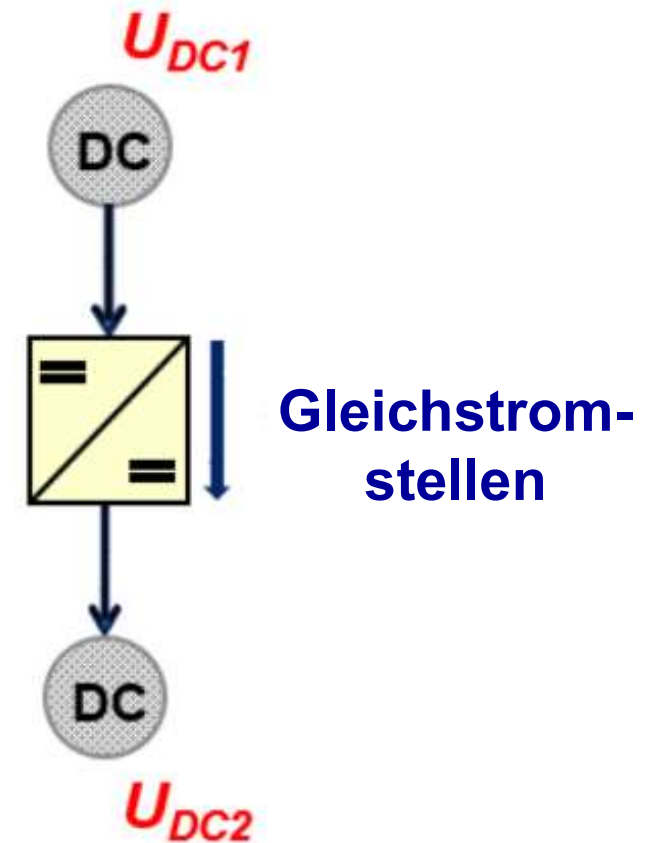
Netzgeführte und selbstgeführte Stromrichter

2. Selbstgeführte Stromrichter

- Wird eine Stromrichterschaltung von einer Gleichspannung gespeist, so ist die für eine Kommutierung erforderliche Kommutierungsspannung nicht vorhanden.
- In **selbstgeführten Stromrichtern** werden daher grundsätzlich **ein- aber auch wieder abschaltbare Ventile** benötigt:
 - **Bipolartransistoren** und **MOSFET** (für kleine bis mittlere Leistungen)
 - **IGBT** (für mittlere bis hohe Leistungen)
 - **GTO** (für sehr hohe Leistungen)
 - *(Thyristoren, die mit Hilfe spezieller Löschsaltungen abgeschaltet werden).*
- Diese Schalter schalten zwischen leitendem und sperrenden Zustand mit **hoher (Schalt-)Frequenz** um. Der Schaltvorgang muss sehr schnell erfolgen (Schaltfrequenz, Verluste).
- Da keine äußere (Netz-)Wechselspannung für die Kommutierung benötigt wird, werden diese Anordnungen selbstgeführte Stromrichter genannt.

Gleichstromsteller

- Gleichstromsteller sind selbstgeführte Stromrichter, die eine Gleichspannung in eine (andere) Gleichspannung umwandeln.
- Gleichstromsteller werden eingesetzt, um einen Verbraucher aus einer (*meist konstanten*) Gleichspannungsquelle mit einer anderen (*konstanten oder einer variablen*) Gleichspannung zu versorgen.

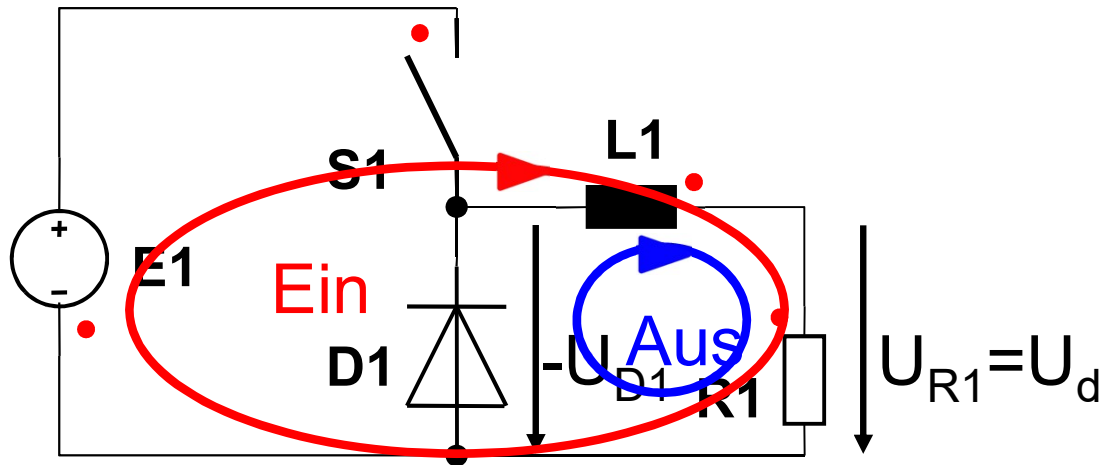


- Es gibt eine Vielzahl von Schaltungen für Gleichstromsteller.

Tiefsetzsteller

- Bezeichnung:
 - deutsch: Tiefsetzsteller, Abwärtswandler
 - engl.: Buck Converter, Step-Down Converter
- Prinzip:
 - Der Tiefsetzsteller stellt den Mittelwert der Ausgangsspannung durch Ein- und Ausschalten eines Schalters.
 - Der Mittelwert der Ausgangsgleichspannung liegt unterhalb der Eingangsgleichspannung.

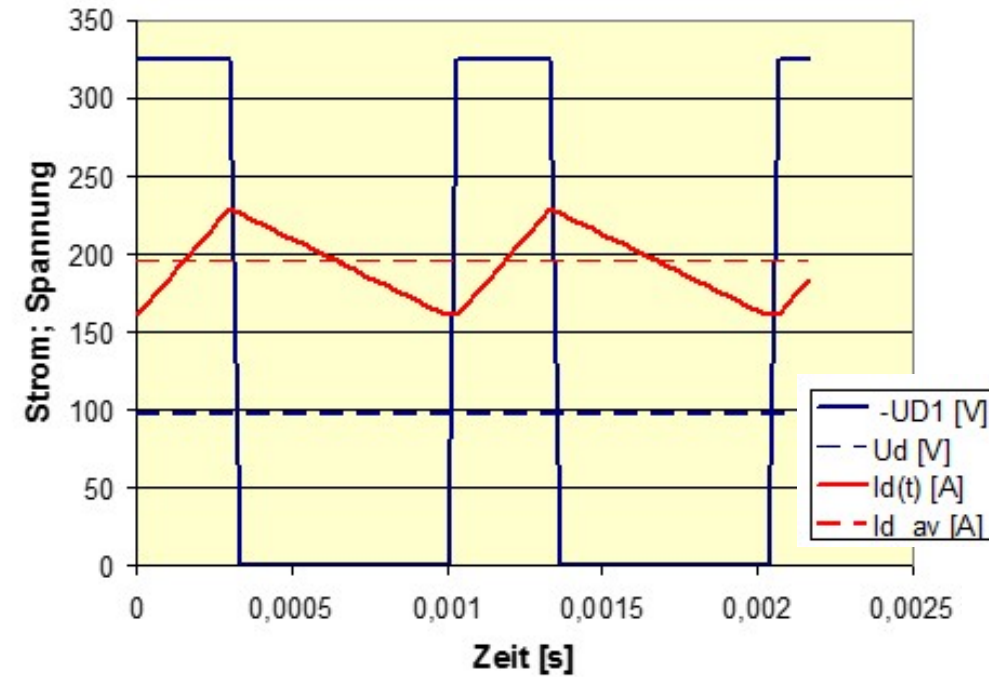
Tiefsetzsteller



$$U_d = \left(\frac{t_{\text{ein}}}{T} \right) \cdot E1 = v_T \cdot E1 \quad \longrightarrow \quad \frac{U_d}{E1} = v_T$$

$$I_d = \frac{U_d}{R1}$$

$$\Delta I_d = I_{d \max} - I_{d \min} = \frac{(E1 - U_d)}{L1} \cdot t_{\text{ein}}$$



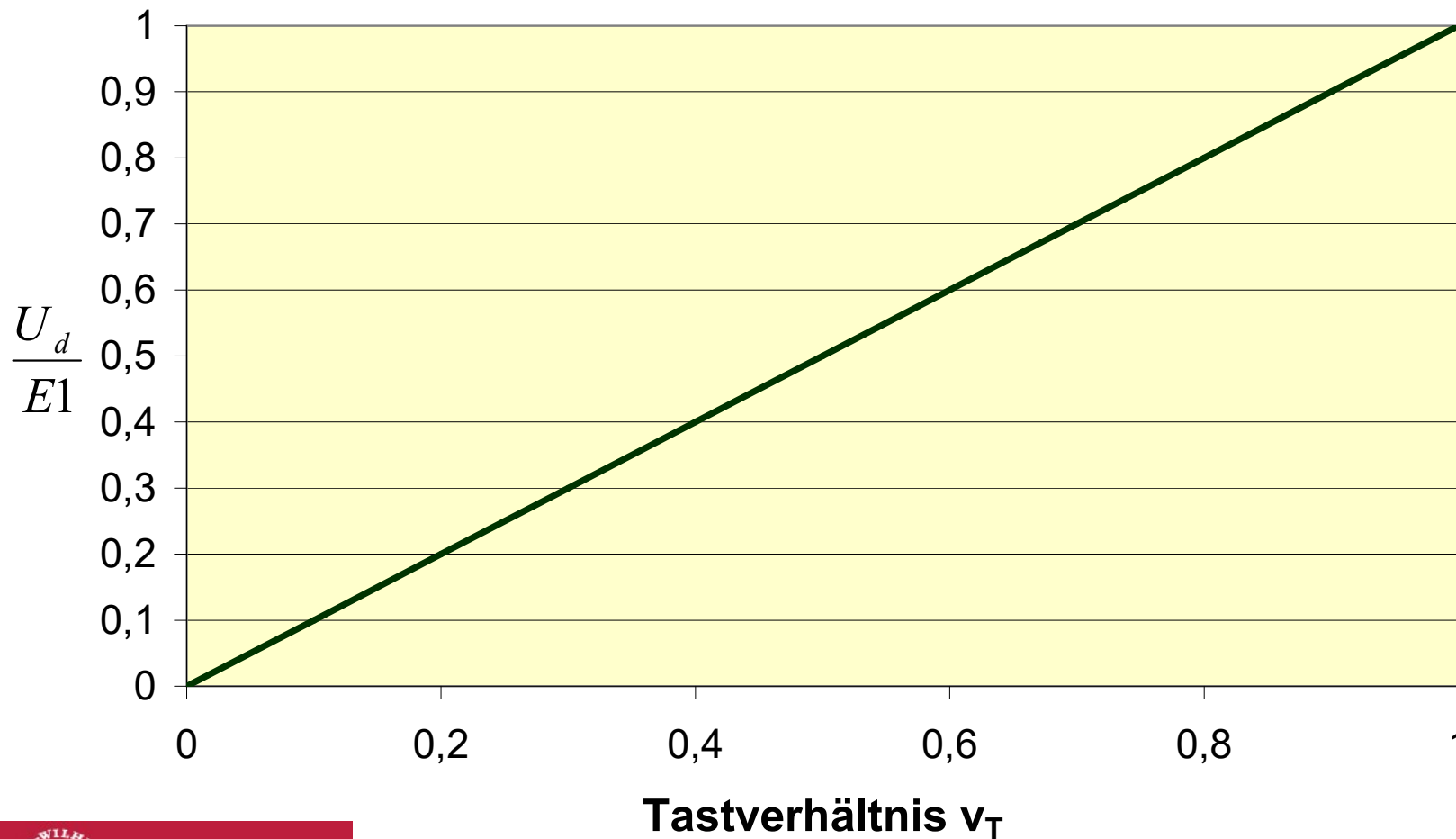
Verläufe für

R1=	0,5 Ohm
L1=	0,001 H
Periodendauer	1,00E-03 s
Tastverhältnis	0,3
E1=	325 V

Id=	195 A
delta Id=	68,25 A
Idmin=	160,875 A
Idmax=	229,125 A
Ud=	97,5 V

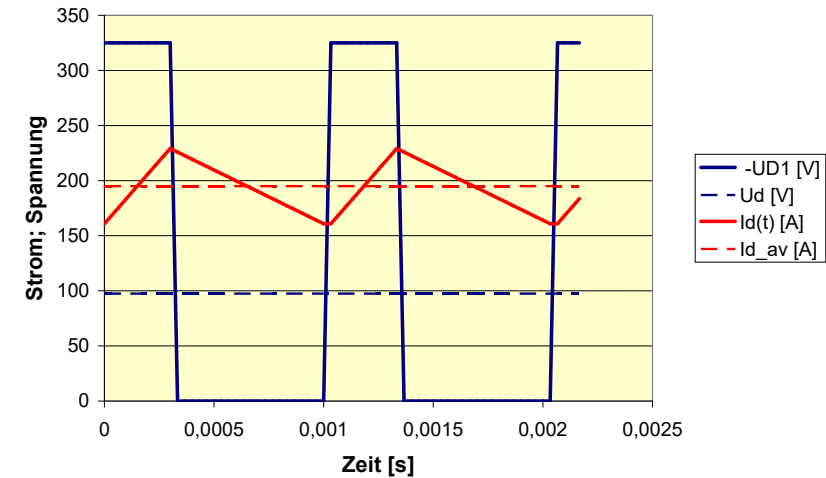
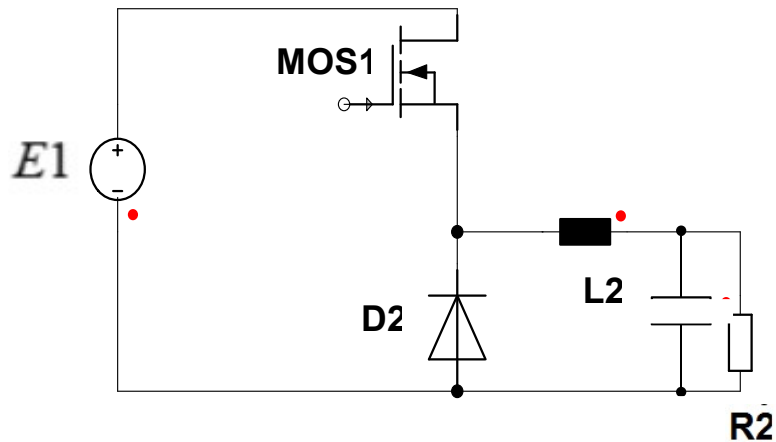
Tiefsetzsteller: Steuerkennlinie U_d / E_1

$$U_d = \frac{t_{\text{ein}}}{T} \cdot E_1 = v_T \cdot E_1 \quad \longrightarrow \quad \frac{U_d}{E_1} = v_T$$



Tiefsetzsteller

Belastung der Bauelemente eines Tiefsetzstellers:



MOSFET:

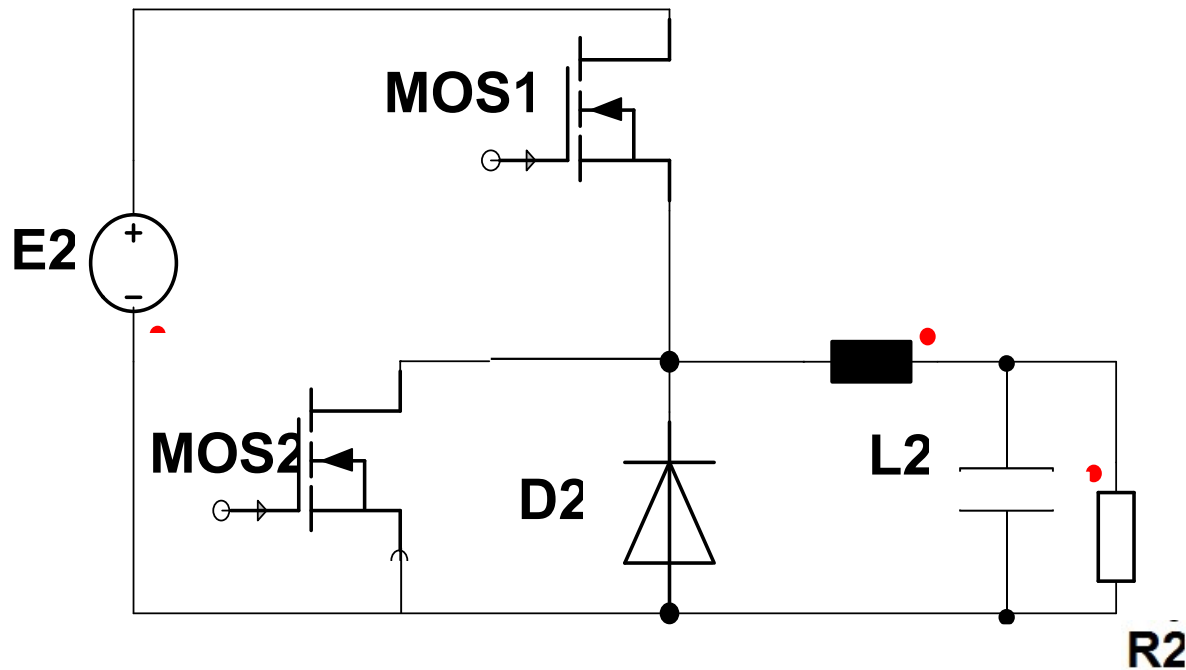
$$U_{DS.\max} = E1 + U_{f.D2} \approx E1$$

Diode

$$-U_{AK.\max} = E1$$

Tiefsetzsteller

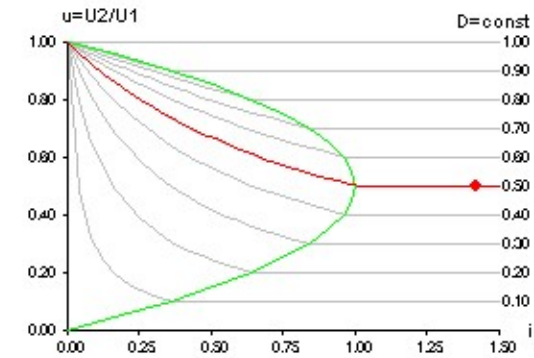
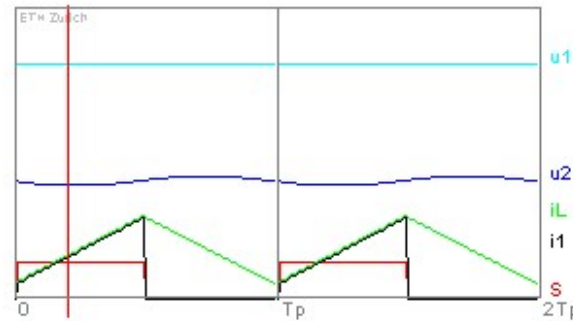
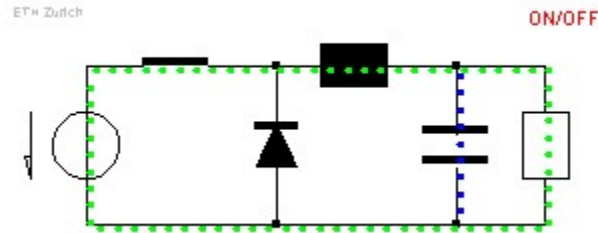
- Schaltung mit realen Bauelementen: Beispiel MOSFET



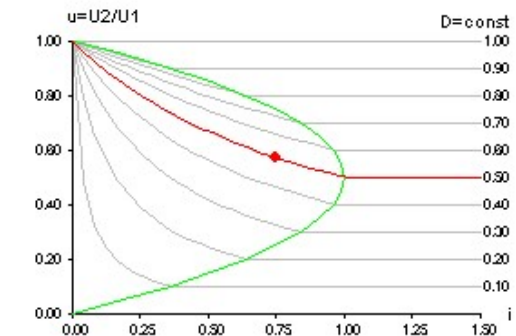
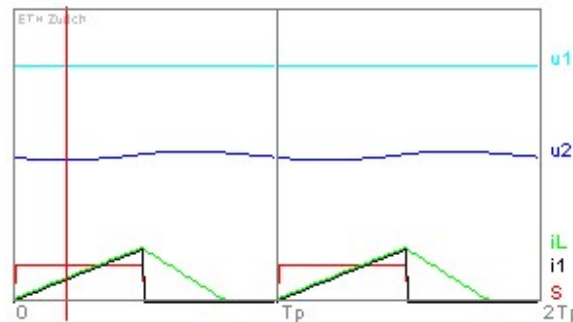
Bei sehr kleinen Spannungen (z. B. für Prozessoren) wird in der Leitphase die Freilaufdiode durch einen 2. MOSFET überbrückt

Tiefsetzsteller: Betrieb bei lückendem und nicht-lückendem Strom

- Buck-Converter - (1): Constant Input Voltage, Variable Duty Cycle -

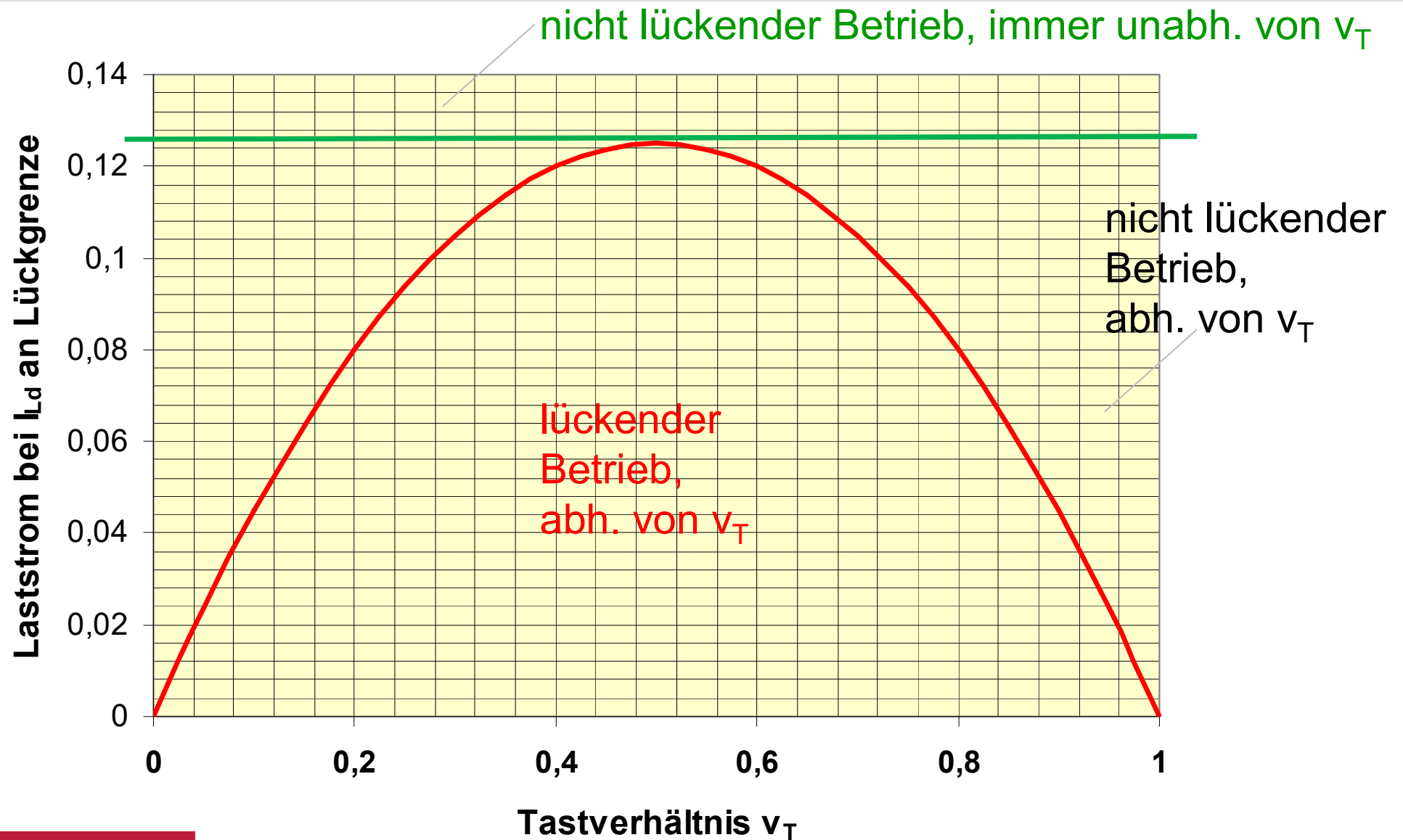


- nicht lückender Betrieb: Der Drosselstrom ist immer größer als Null, die Induktivität der Drossel ist hinreichend groß.

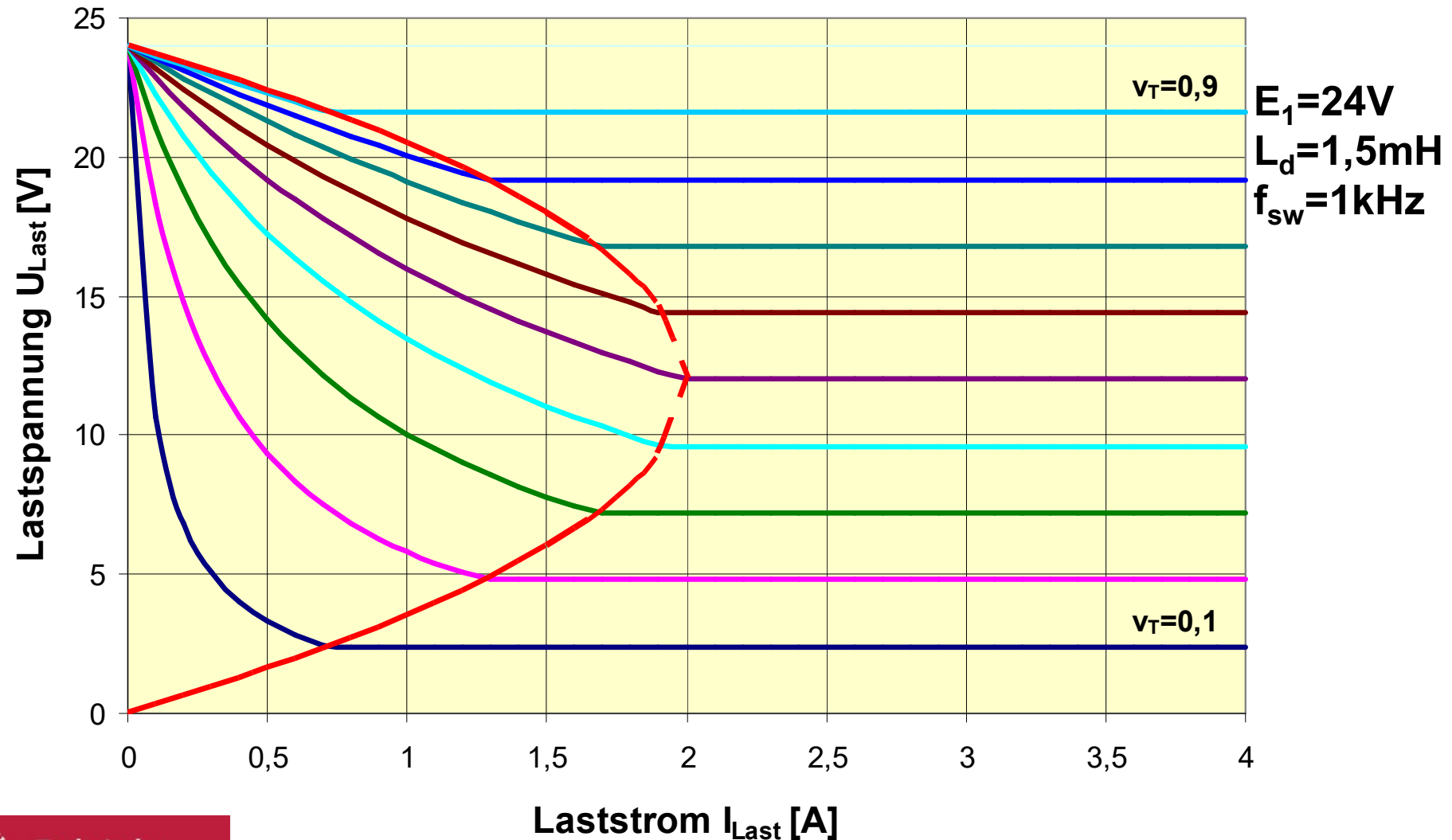


- lückender Betrieb: Der Drosselstrom wird zu Null. Er lückt, die Induktivität der Drossel ist vergleichsweise klein.

Tiefsetzsteller



Tiefsetzsteller: Ausgangskennlinienfeld für feste Tastverhältnisse v_T (mit Lückgrenze des Drosselstroms):



Tiefsetzsteller: Steuerverfahren

- **Pulsbreitensteuerung**

- Periodendauer T ist fest, Einschaltdauer t_{ein} ist variabel,
- d.h. die Schaltung arbeitet mit fester Taktfrequenz.

- **Pulsfolgesteuerung**

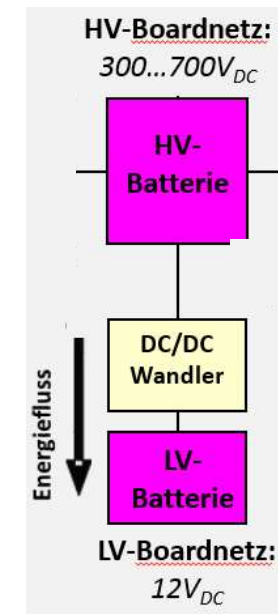
- Periodendauer T ist variable, t_{ein} ist fest,
- d.h. die Schaltung arbeitet mit fester Einschaltdauer aber variabler Frequenz.

- **Zweipunktregelung**

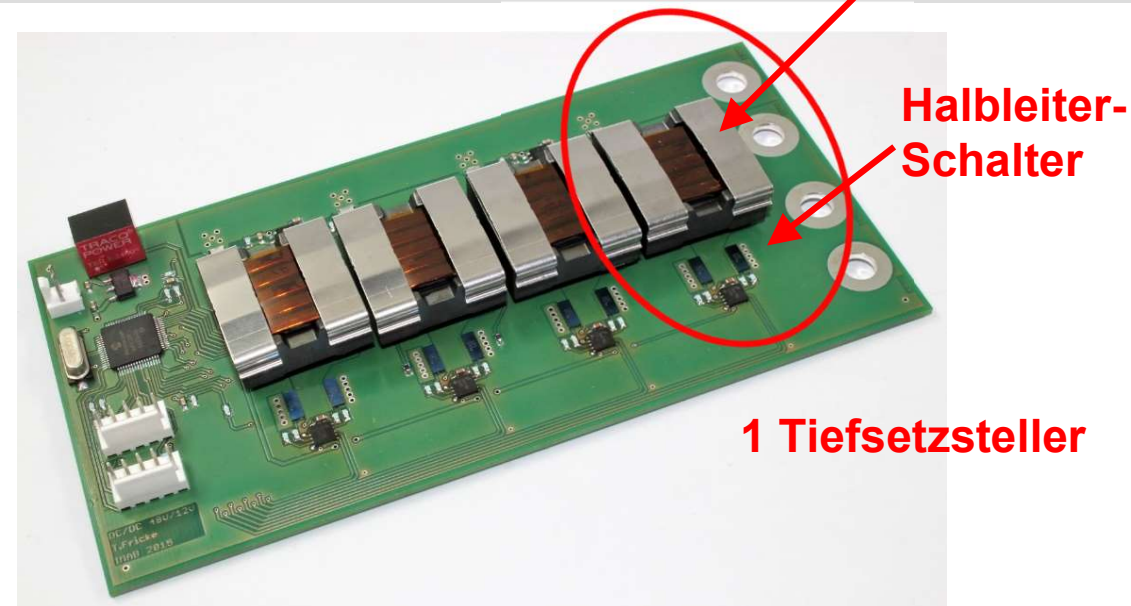
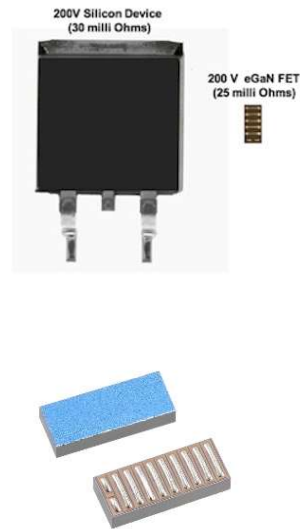
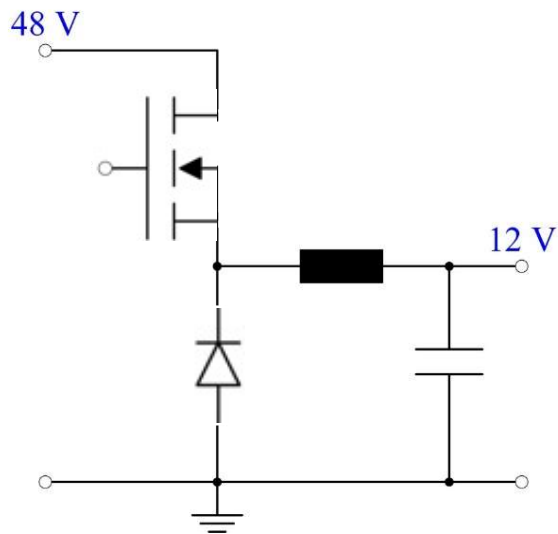
- Periodendauer T und t_{ein} sind variabel,
- d.h. die Schaltzeitpunkte werden aus dem Überschreiten von $i_{L\text{max}}$ (oder $u_{L\text{max}}$) und dem Unterschreiten von $i_{L\text{min}}$ (oder $u_{L\text{min}}$) bestimmt.
- Die Einschaltdauer t_{ein} sowie die Schaltfrequenz T stellen sich bei diesem Verfahren frei ein.

Tiefsetzsteller: Anwendungen

- Schaltnetzteile
- Gleichstrom-Antriebe
- Gleichstrom-Versorgungen , z.B. in Elektro-Fahrzeugen zwischen HV- und NV-Bordnetz
Batterieladung (z.B. $400V \rightarrow 12V$):



Tiefsetzsteller: Beispiel



Abschluss-Arbeit am IMAB:

- Aufbau eines DC/DC-Wandlers zur **Kopplung der Bord-Netze im Mild-Hybrid-Fahrzeug**
- Eingangsspannung 48 V
- Ausgangsspannung 14,4 V
- Ausgangsstrom 20A
- Verwendung von neuartigen Leistungstransistoren auf Basis von Galliumnitrid (GaN)
- Vier Tiefsetzsteller parallel

Hochsetzsteller

- **Bezeichnung:**

- deutsch: Hochsetzsteller, Aufwärtswandler
- engl.: Boost Converter, Step-Up Converter

- **Prinzip:**

- Der Hochsetzsteller stellt den Mittelwert der Ausgangsspannung durch Ein- und Ausschalten eines Schalters.
- Der Mittelwert der Ausgangsgleichspannung liegt oberhalb der Eingangsgleichspannung.

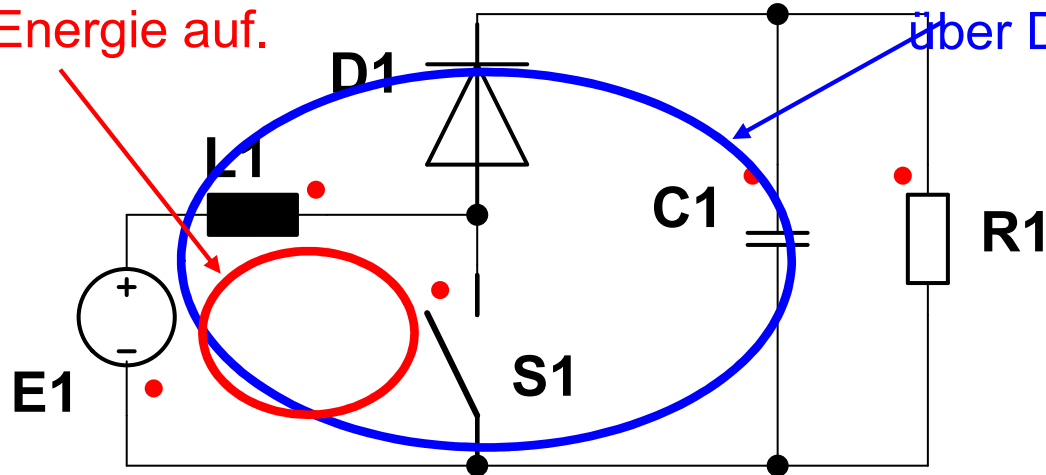
Hochsetzsteller

• Einschalten:

Die Drossel nimmt Energie auf.

• Ausschalten:

Die Drossel gibt die Energie ab - über D1 an die Last.



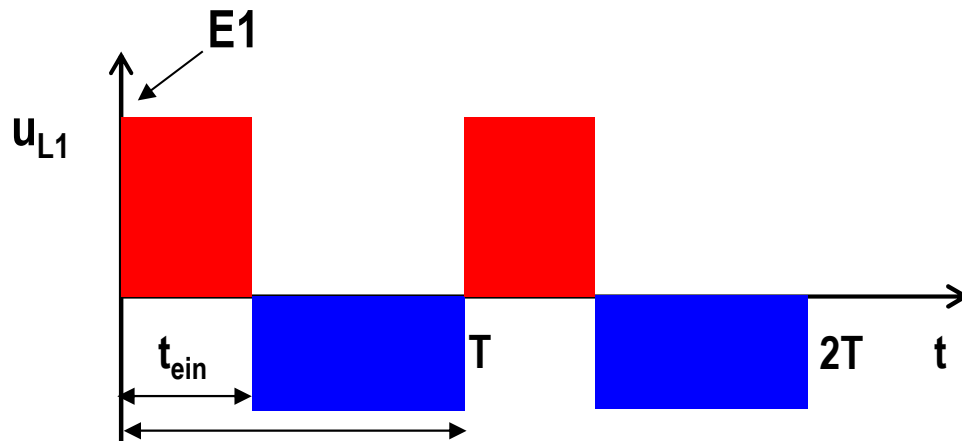
Die Funktionsweise kann einfach über Bilanzgleichungen abgeleitet werden:

$$\int_t^{t+T} u_{L1} dt = 0$$

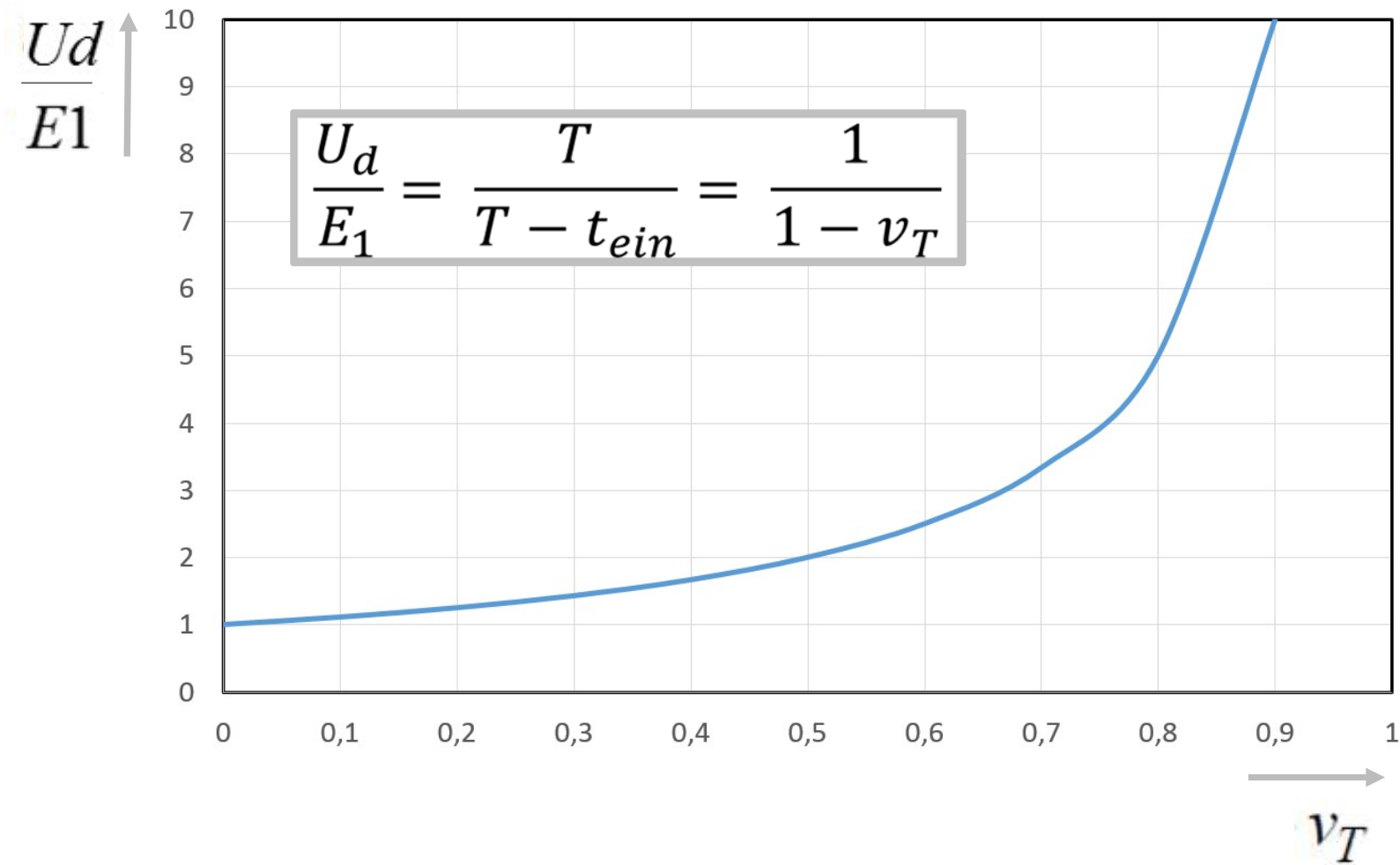
$$E1 \cdot t_{\text{ein}} = (U_d - E1) \cdot (T - t_{\text{ein}})$$

$$U_d = \frac{T}{T - t_{\text{ein}}} \cdot E1 = \frac{1}{1 - v_T} \cdot E1$$

→ Steuercharakteristik



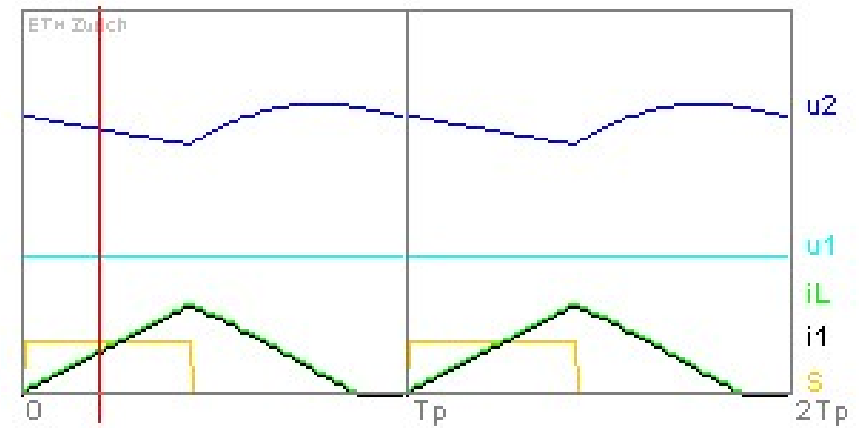
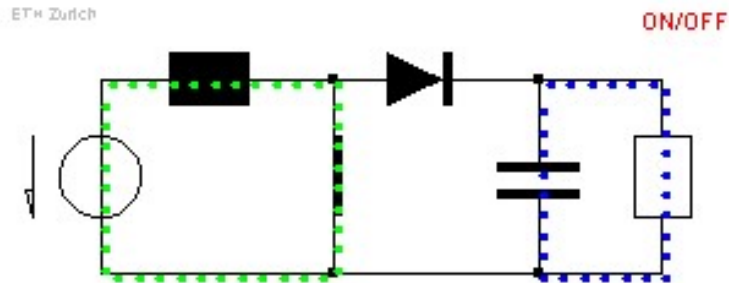
Hochsetzsteller: Steuerkennlinie



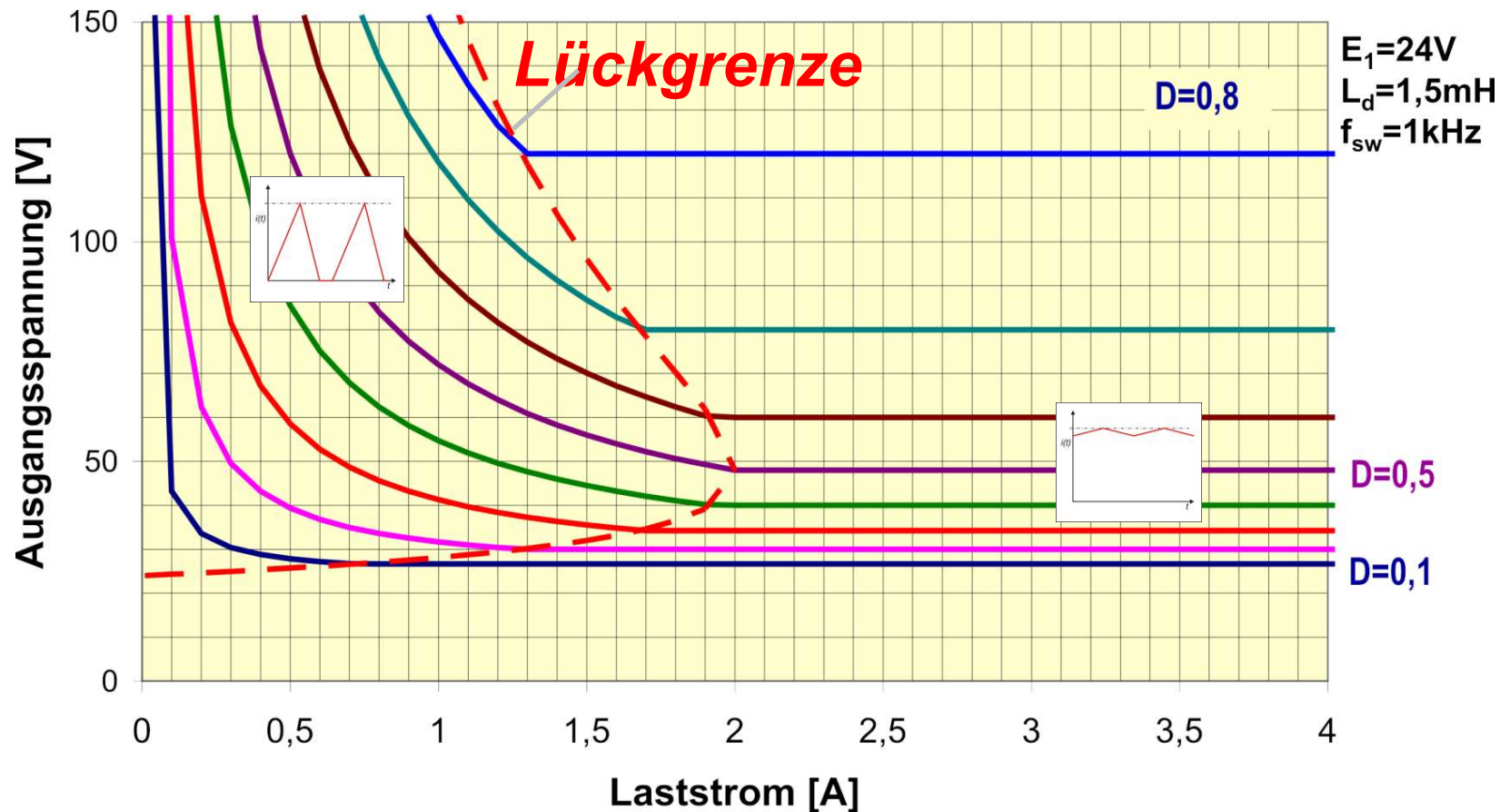
Hochsetzsteller

1. Der Schalter und die Diode müssen den
 - **hohen Strom der Unterspannungsseite** und
 - **die hohe Spannung der Oberspannungsseite**schalten.
→ Bauelemente mit hoher ideeller Schaltleistung erforderlich
2. Bei hohen Übersetzungsverhältnissen ist der Formfaktor des Diodenstroms groß, d. h.
 $I_{F.RMS} \gg I_{F.AV}$.
3. Bei nicht lückendem Drosselstrom (für den alle dargestellten Betrachtungen gelten) schaltet der Schalter auf eine leitende Diode.
Die Sperrerrholadung Q_{rr} einer P(I)N- Diode verursacht dann in beiden Bauelementen erhebliche Schaltverluste.
Die Schaltverluste sind minimierbar durch z. B.:
 - Einsatz von Schottky-Dioden
 - Betrieb mit lückendem Drosselstrom

Hochsetzsteller: lückender Betrieb



Beispiel: Hochsetzen einer 24V Spannung bei verschiedenen Duty Cycle ,D' und Laststrom



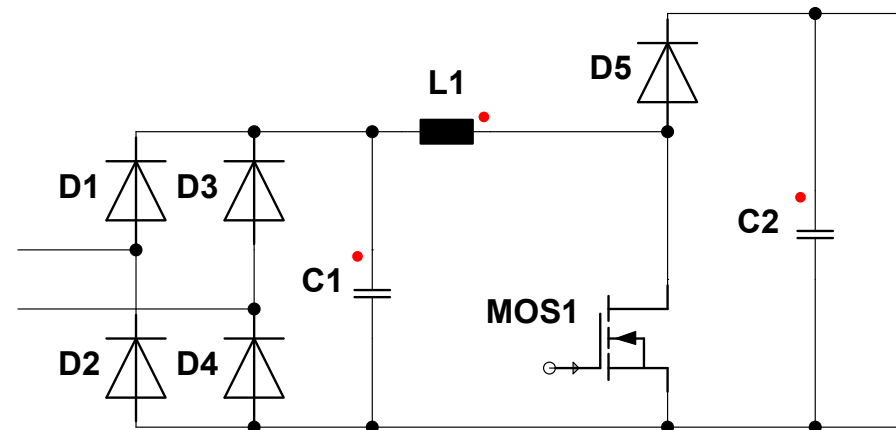
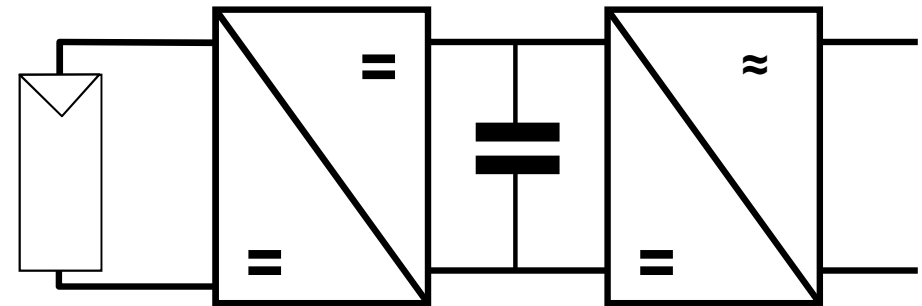
➔ Ab einem bestimmten Strom (Lückgrenze) ist beim Hochsetzsteller die Ausgangsspannung **stromunabhängig**.

Hochsetzsteller: Steuerverfahren

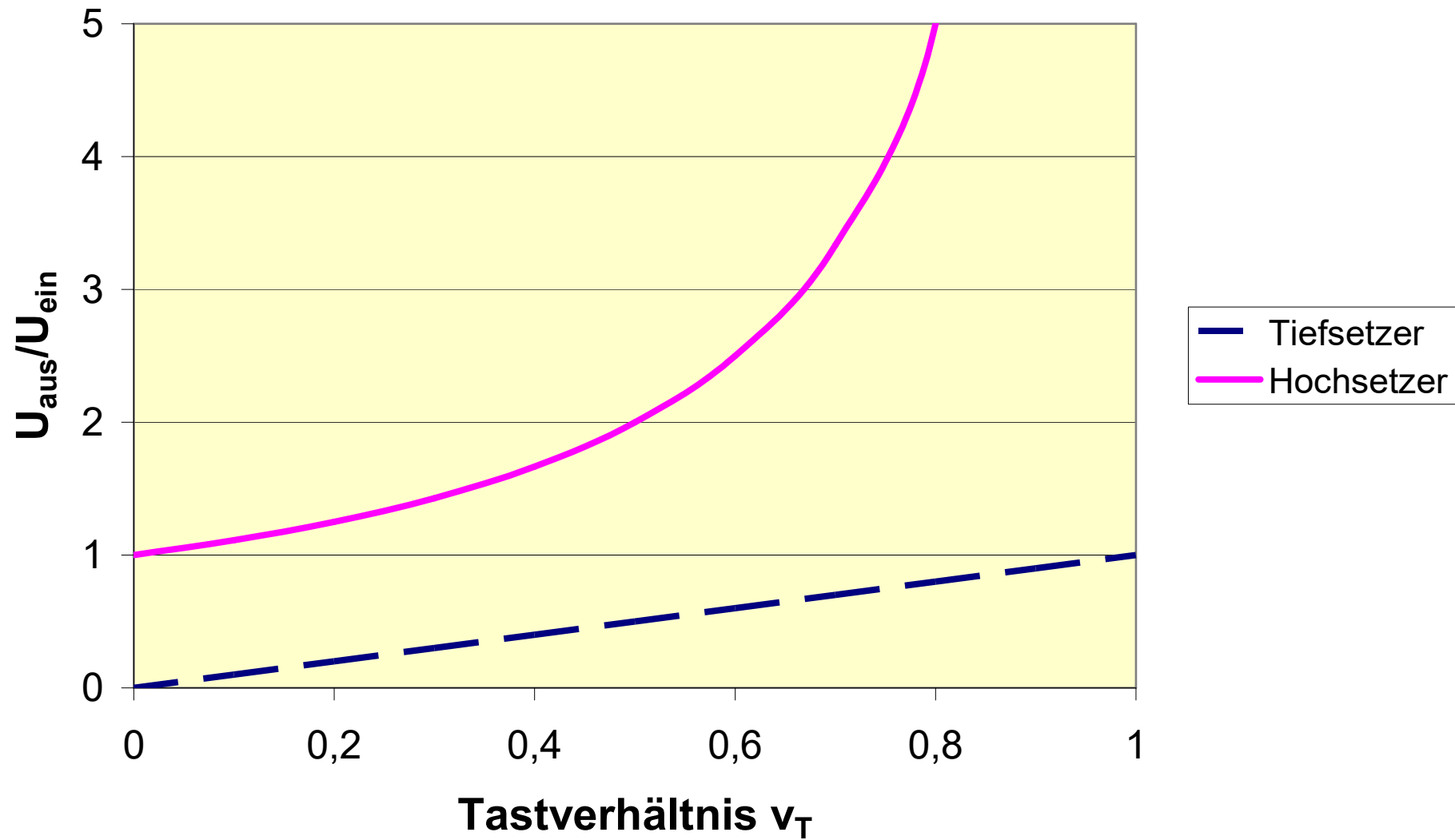
- **Wie beim Tiefsetzsteller:**
 - **Pulsbreitensteuerung**
 - **Pulsfolgesteuerung**
 - **Zweipunktregelung**

Hochsetzsteller: ANwendungen

- **Erzeugung von zusätzlichen Versorgungsspannungen** aus einem einfachen Netzteil oder einer Batterie (z. B. +12V, +15V aus +5V oder 6,3V)
- **netzgekoppelte Solaranlagen:** Entkopplung der Zwischenkreisspannung des Solar-Wechselrichters von der stark variierenden Spannung eines photovoltaischen Solar-Generators
- **Power Factor Controller (PFC)** für einphasige Anwendungen:



Vergleich Hochsetzsteller - Tiefsetzsteller



Vergleich Hochsetzsteller - Tiefsetzsteller

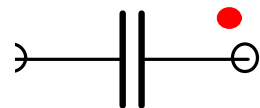
	Tiefsetzsteller	Hochsetzsteller
U2/U1	≤ 1	≥ 1
Energieübertragung	Einschaltphase	Ausschaltphase
Stromlücken	Eingangsstrom	(Ausgangsstrom)

- Hochsetzsteller und Tiefsetzsteller sind zueinander duale Schaltungen:

Dualität \approx "ergänzend", "komplementär", "entsprechend"

(i. d. R. ist das Verhalten bezüglich Strom und Spannung vertauscht)

z.B.:



$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt$$



$$i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt$$

Was haben wir heute gemacht ?

- **Gleichstromsteller**
 - Tiefsetzsteller
 - Hochsetzsteller

Was kommt in der nächsten Vorlesung?

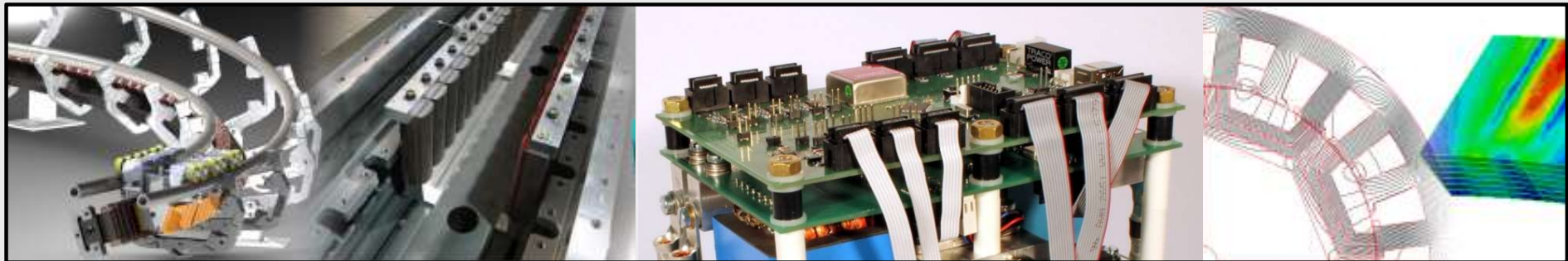
- **Zweiquadrantensteller**
 - mit Spannungsumkehr
 - mit Stromumkehr



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