



Technische
Universität
Braunschweig

IMAB

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



Grundschaltungen der Leistungselektronik

Vorlesung (6): 27.11.2019

Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz

Institut für Elektrischen Maschinen, Antriebe und Bahnen - IMAB

Aufbau der Lehrveranstaltungen: Vorlesungen

1. Einführung und Wiederholung	23.10.2019
2. Wechselrichter (I)	30.10.2019
3. Wechselrichter (II)	30.10.2019
4. Leistungshalbleiter (I)	13.11.2019
5. Leistungshalbleiter (II)	20.11.2019
6. Gleichstromsteller ohne galvanische Trennung (I)	27.11.0219
7. Magnetische Bauelemente (I)	04.12.2019
8. Magnetische Bauelemente (II)	04.12.2019
9. Magnetische Bauelemente (III)	11.12.2019
10. Gleichstromsteller mit galvanischer Trennung (I)	08.01.2020
11. Gleichstromsteller mit galvanischer Trennung (II)	15.01.2020
12. Gleichstromsteller ohne galvanische Trennung (II)	22.01.2020
13. Schaltnetzteile	29.01.2020
14. Kondensatoren	05.02.2020

Regel-Termin: **mittwochs, 14:15 Uhr bis 15:45 Uhr**

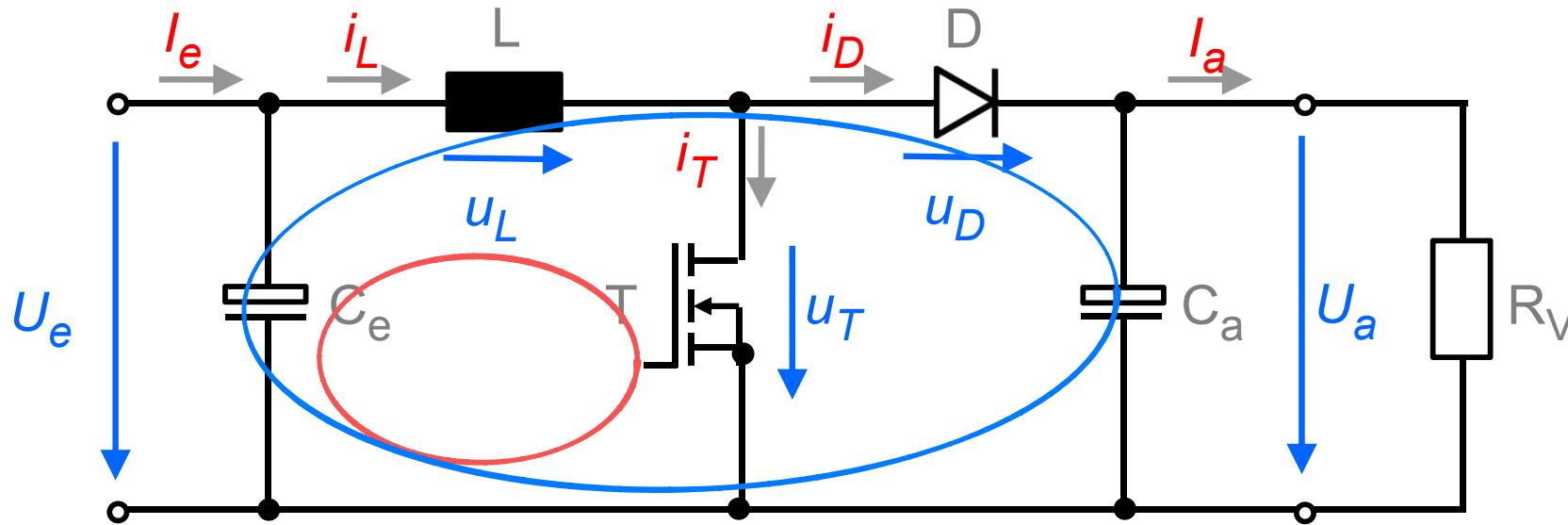
(mit Ausnahmen)

Was machen wir heute ?

Gleichstromsteller (DC-DC-Wandler) ohne galvanische Trennung

1. Hochsetzsteller
2. Tiefsetzsteller
3. Inverswandler

Hochsetzsteller (engl.: Boost Converter)

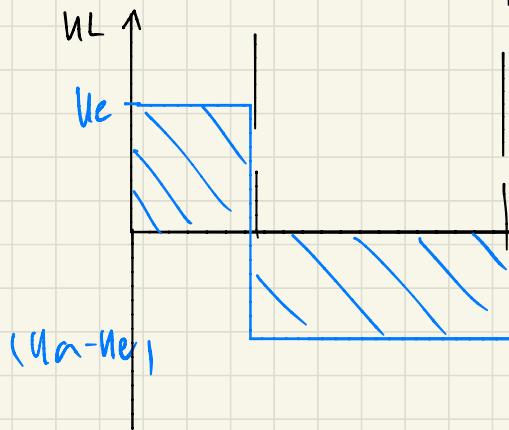


- Speise-Gleichspannung U_e ist niedriger als die der Last zugeführten Gleichspannung $U_a \rightarrow$ Eingangsspannung wird heraufgesetzt (hoch gesetzt)
- Bezeichnung: Hochsetzsteller oder Aufwärtswandler (engl.: boost converter)
- Das periodische Ein- und Ausschalten des Transistors T führt zu zwei Schaltzuständen:
 - (1.) T leitet ($0 \leq t \leq t_{\text{ein}}$): $u_L = U_e$,
 - (2.) T sperrt ($t_{\text{ei}} \leq t \leq T$): Diode D führt den Strom i_L und $u_L = (U_e - U_a)$



$$U_L = L \frac{di}{dt}$$

$$u_L = L \frac{di}{dt}$$



$$(1) \quad u_e = L \cdot \frac{\Delta I}{t_{\text{on}}}$$

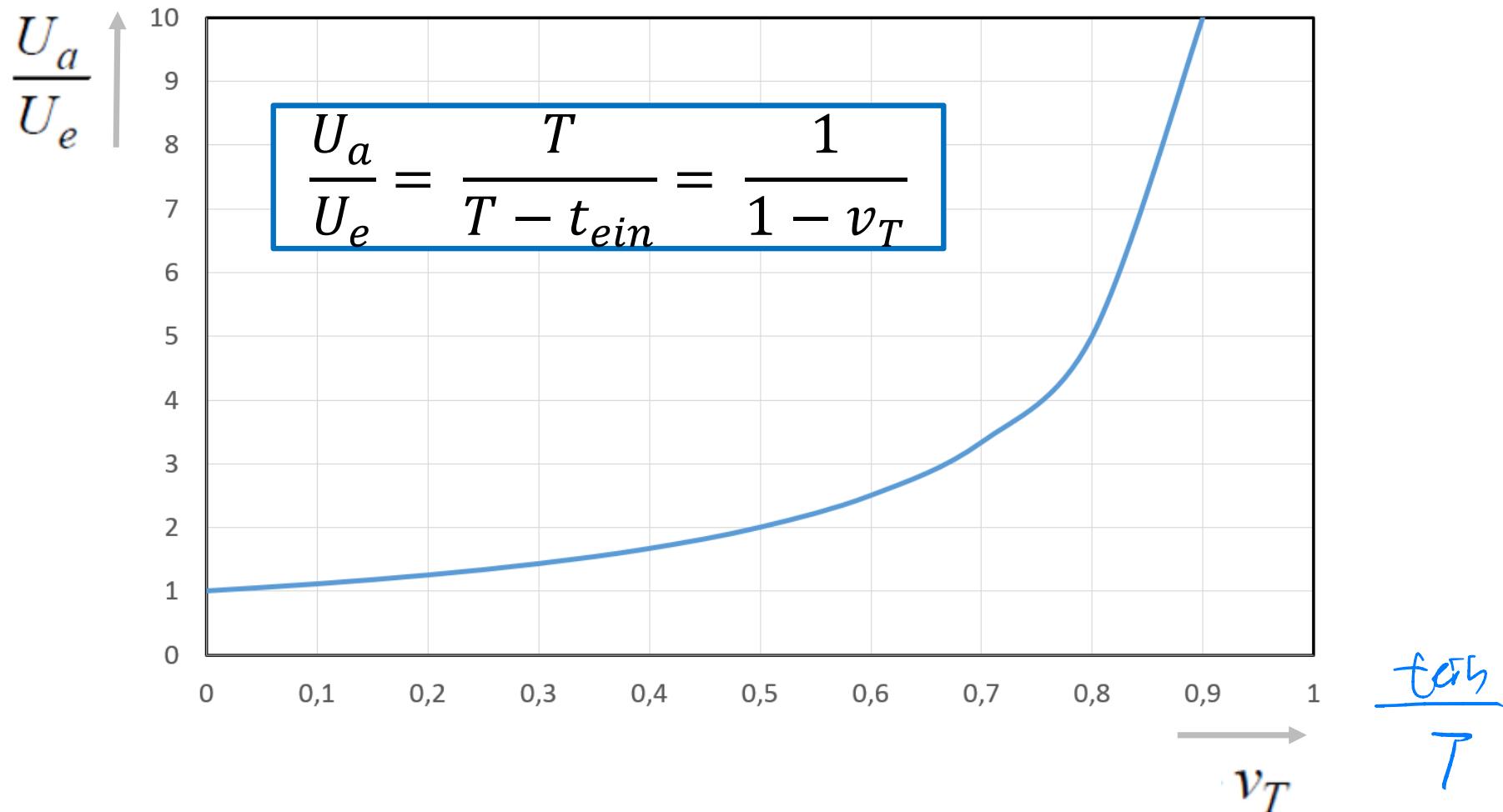
$$(2) \quad (u_a - u_e) = L \cdot \frac{\Delta I}{t_{\text{off}}} = L \cdot \frac{\Delta I}{t_{\text{off}}}$$

$$u_e \cdot t_{\text{on}} = (u_a - u_e) t_{\text{off}} \quad \left. \begin{array}{l} (1) \\ (2) \end{array} \right.$$

$$T = t_{\text{on}} + t_{\text{off}}$$

$$V_T = \frac{t_{\text{on}}}{T} = D$$

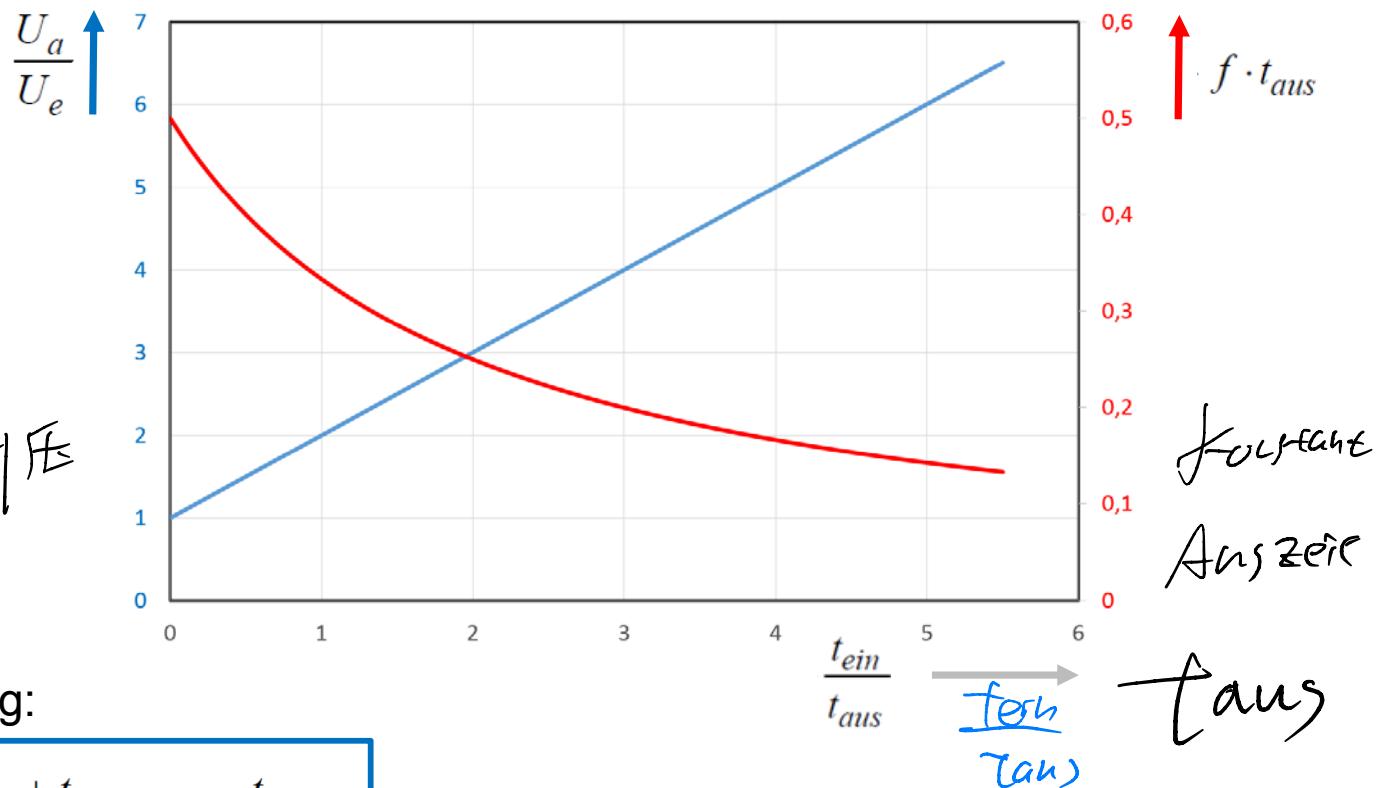
Hochsetzsteller: Normierte Ausgangsspannung $U_a : U_e$ in Abhängigkeit vom Tastverhältnis v_T



Hochsetzsteller: Ausgangsspannung im Betrieb mit variabler Schaltfrequenz f und fester Ausschaltzeit t_{aus}

- Wenn eine variable Arbeitsfrequenz erlaubt ist, kann man den Wandler auch mit einer konstanten Auszeit t_{aus} betreiben.

$\overbrace{\text{Vorladezeit}} \rightarrow \overbrace{\text{Arbeitszeit}}$



- Normierte Ausgangsspannung:

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{1 - v_T} \cdot = \frac{T}{T - t_{ein}} = \frac{t_{ein} + t_{aus}}{t_{aus}} = 1 + \frac{t_{ein}}{t_{aus}}$$

→ linearisierte Kennlinie

- Für die Arbeitsfrequenz gilt dann:

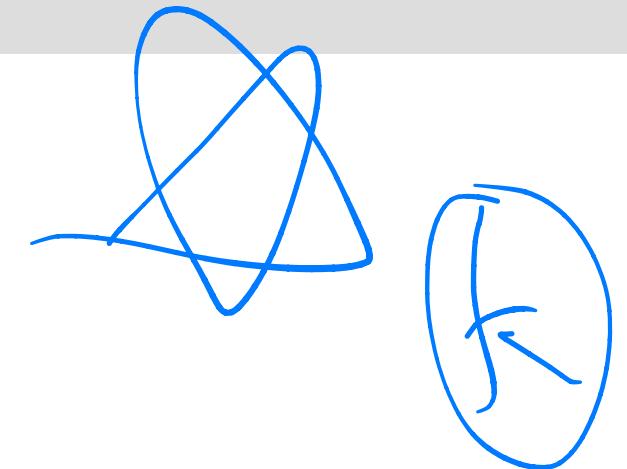
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_{ein} + t_{aus}} = \frac{1}{t_{aus} \cdot \left(\frac{t_{ein}}{t_{aus}} + 1 \right)}$$

$$f \cdot t_{aus} = \frac{1}{1 + \frac{t_{ein}}{t_{aus}}}$$

Hochsetzsteller: Steuerverfahren

▪ Pulsbreitensteuerung

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



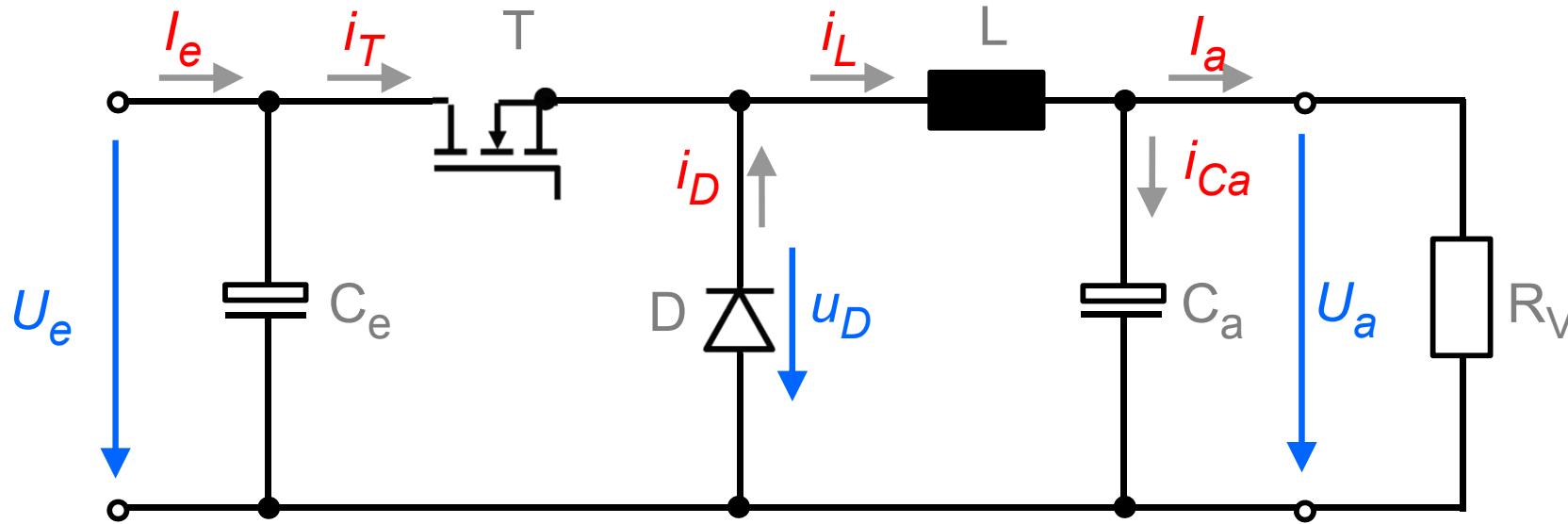
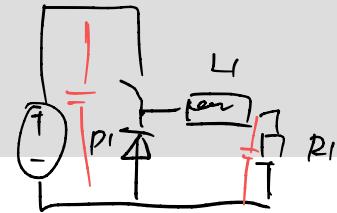
▪ Pulsfolgesteuerung

- Periodendauer T ist variable, t_{ein} ist fest,
- d.h. die Schaltung arbeitet bei einer festen Einschaltdauer mit variabler Frequenz f .

▪ Zweipunktregelung

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

Tiefsetzsteller (engl.: Buck Converter)

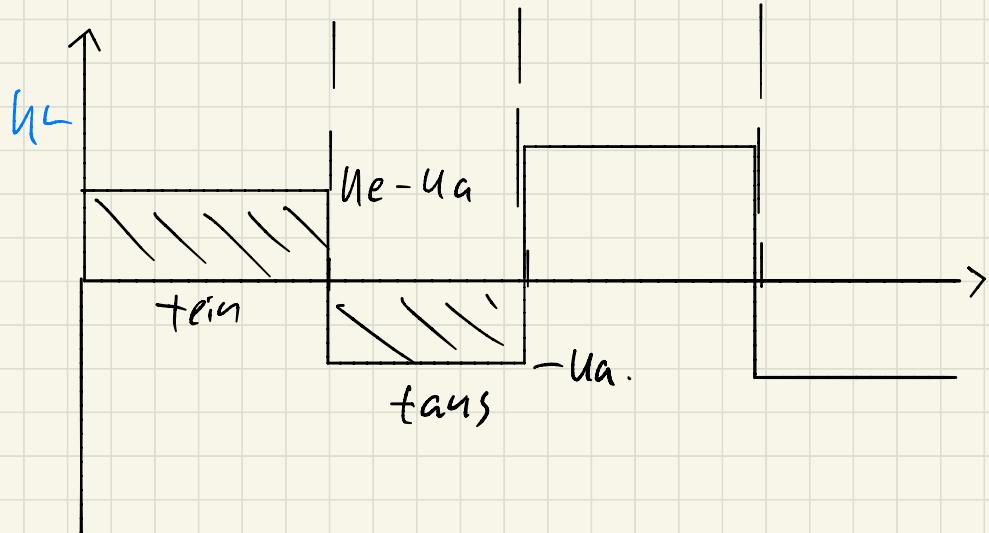
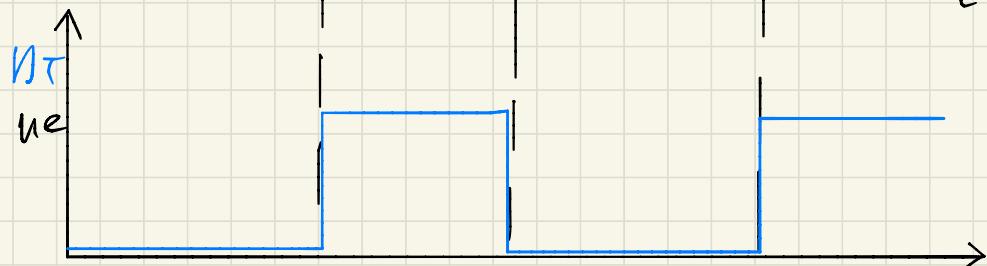
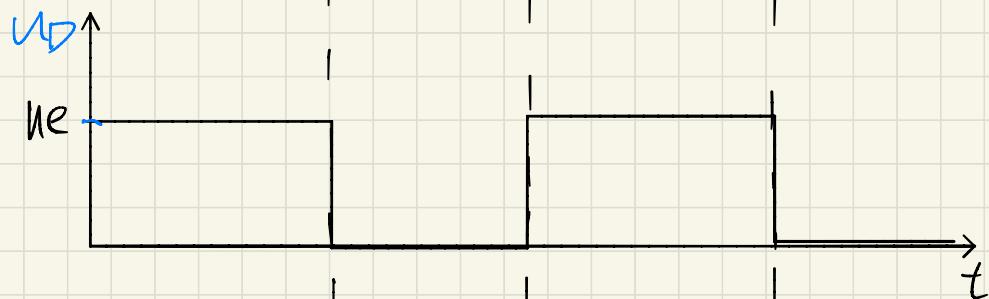
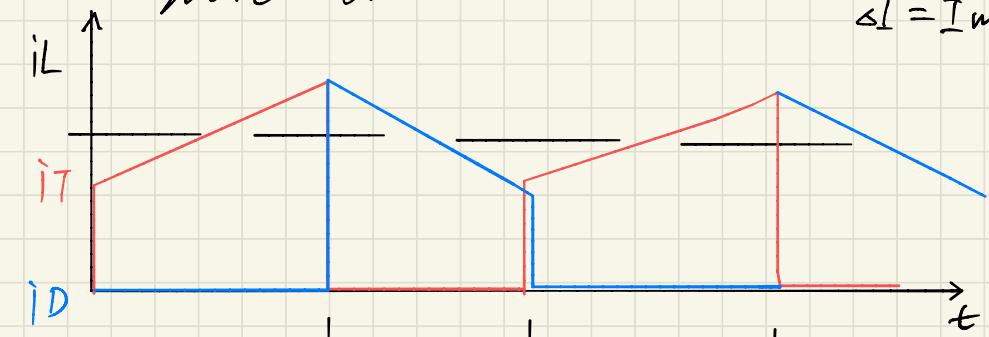


- Speise-Gleichspannung U_e ist höher als die der Last zugeführten Gleichspannung $U_a \rightarrow$ Eingangsspannung wird herabgesetzt (tief gesetzt)
- Bezeichnung der Schaltung: Tiefsetzsteller oder Abwärtswandler (engl.: buck converter)
- Das periodische Ein- und Ausschalten des Transistors T führt zu zwei Schaltzuständen:
 - (1.) T leitet ($0 \leq t \leq t_{ein}$): $u_L = U_e - U_a$,
 - (2.) T sperrt ($t_{ein} \leq t \leq T$): D führt den Strom i_L und $u_L = -U_a$,

nicht - leitender Bereich

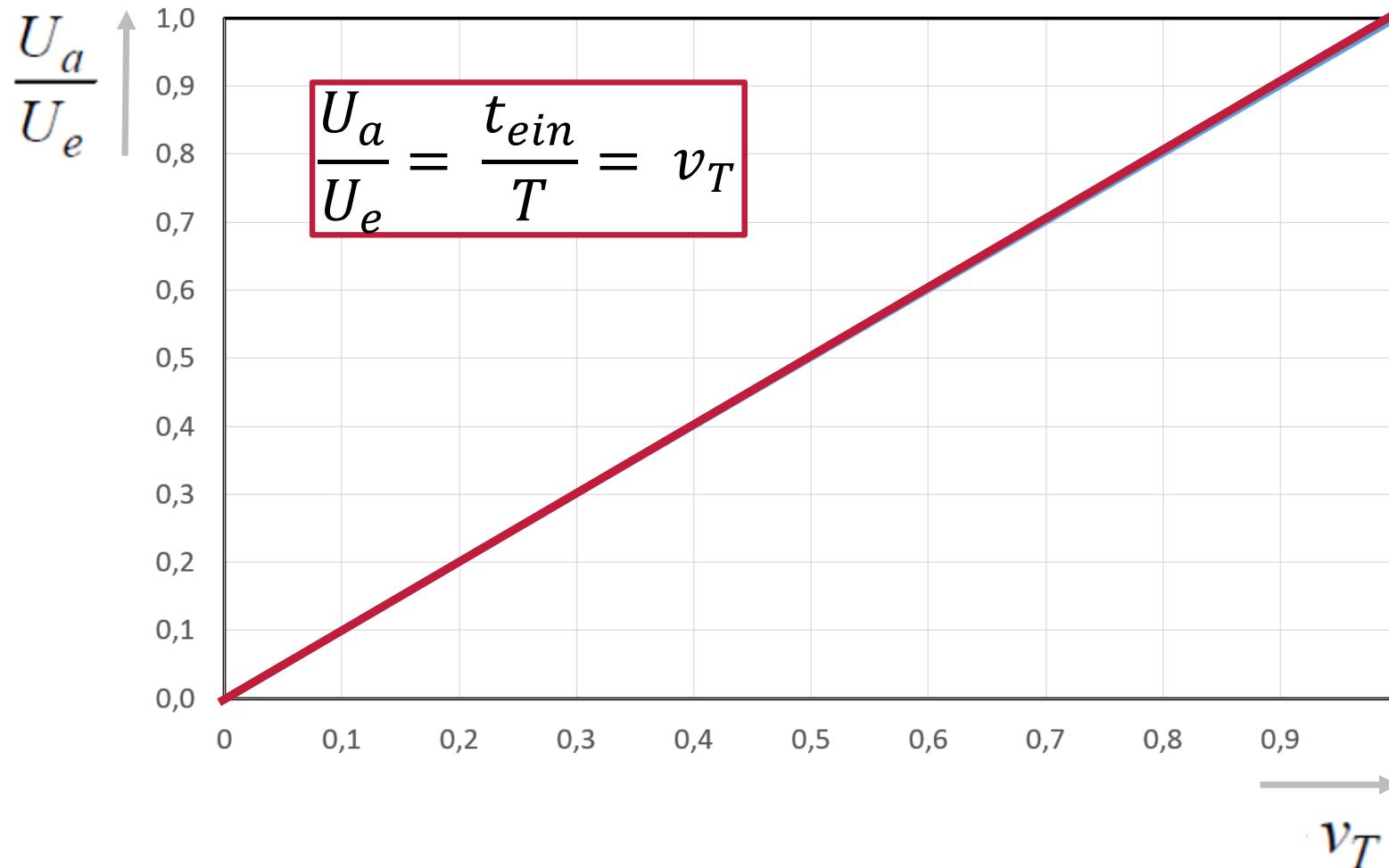
$$I_L = I_a$$

$$\Delta I = I_{\max} - I_{\min}$$



Tiefsetzsteller: Normierte Ausgangsspannung $U_a : U_e$ in Abhängigkeit vom Tastverhältnis v_T

Induktivität



$$U_a = L \cdot \frac{\Delta I}{T_{ans}}$$

mit

$$\begin{aligned} t_{ans} &= T - t_{eis} \\ &= T(1 - v_T) \\ &= T\left(1 - \frac{U_a}{U_e}\right) \end{aligned}$$

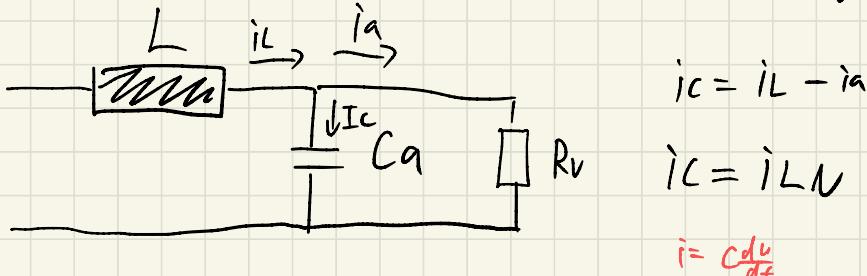
$$L = \frac{U_a}{\Delta I} \cdot T\left(1 - \frac{U_a}{U_e}\right)$$

Induktivitätsdose

Berechnung der Ausgangskapazität

(Annahme C_a ist ideal)

allgemein $i_C = C \cdot \frac{d u_C}{d t} \Rightarrow u_C = \frac{1}{C} \int i_C \cdot dt$.



$$i_C = i_L - i_a$$

$$i_C = i_{LN}$$

$$i = \frac{C du}{dt}$$



$$\Delta u_C = u_{C\max} - u_{C\min}$$

$$u_{C\min} = \Delta u_C(t_1) \quad t_1 \text{ 时 阶 段 与 阶 段 小 }$$

$$u_{C\max} = \Delta u_C(t_3) \quad t_3 \text{ 时 阶 段 与 阶 段 大 }$$

$$(u_{C\max} - u_{C\min}) = \int_{t_1}^{t_3} \frac{1}{C_a} \cdot i_C dt = \frac{\Delta I \cdot T}{8 C_a}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta I}{2} \cdot \frac{T}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{C_a} \\ & = \frac{\Delta I \cdot T}{8 C_a} \end{aligned}$$

$$t_1 \text{ bis } t_2 \quad 0 \leq t \leq \frac{1}{2} t_{\text{einh}} , i_C = \frac{\Delta I}{t_{\text{einh}}} \cdot t$$

$$t_2 \text{ bis } t_3 \quad 0 \leq t \leq \frac{1}{2} t_{\text{trans}} , i_C = \frac{1}{2} \Delta I - \frac{\Delta I}{t_{\text{einh}}} \cdot t$$

$$C_a = \frac{T \cdot \Delta I}{8 (u_{\max} - u_{\min})}$$

Vergleich Hochsetzsteller – Tiefsetzsteller

	Hochsetzsteller	Tiefsetzsteller
Ua : Ue	≥ 1	≤ 1
Energieübertragung	Ausschaltphase	Einschaltphase
Stromlücken	Ausgangsstrom	Eingangsstrom

➤ Hochsetzsteller und Tiefsetzsteller sind zueinander duale Schaltungen:

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

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

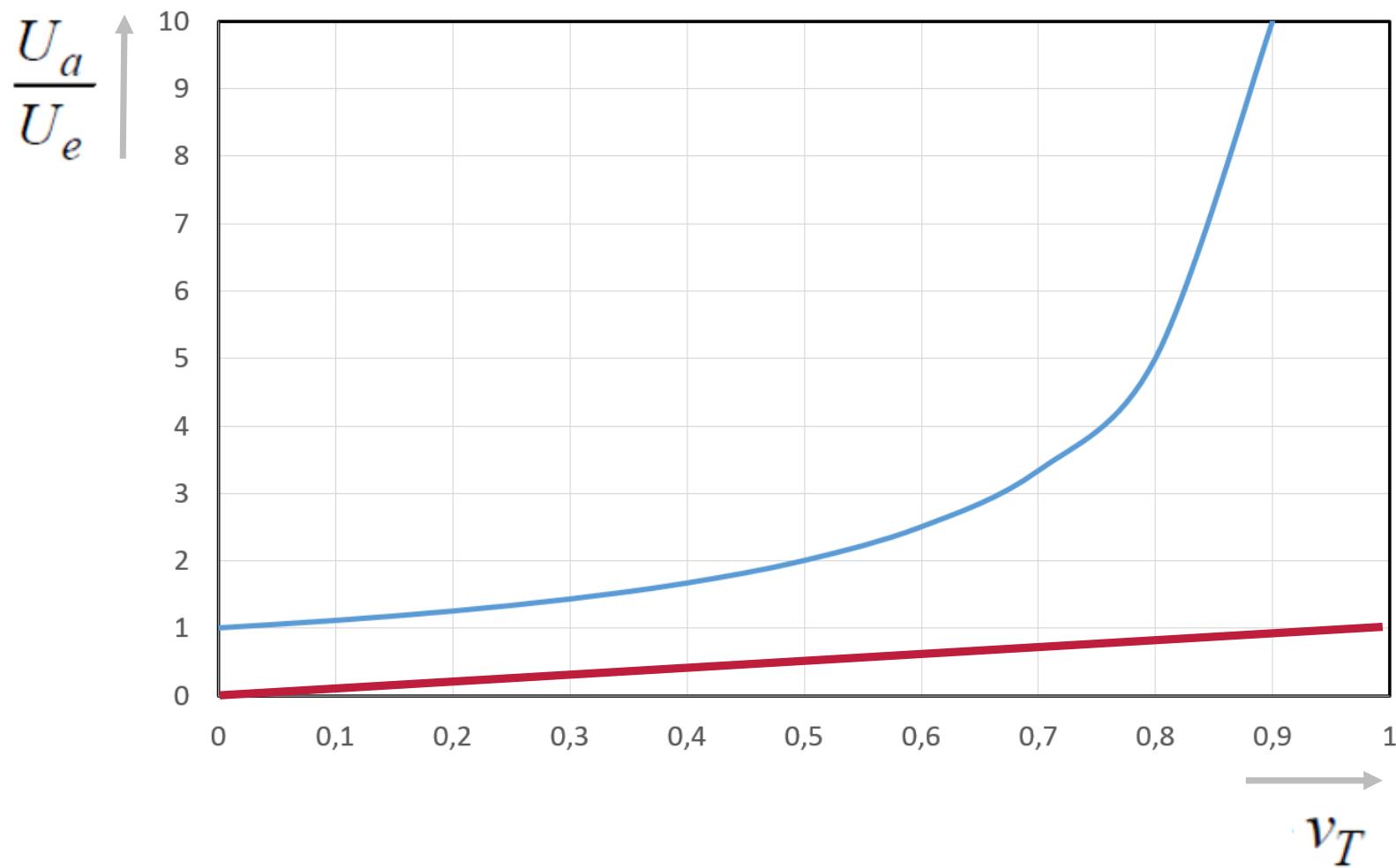
z.B.:



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

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

Vergleich: Hochsetzsteller (HSS) – Tiefsetzsteller (TSS)



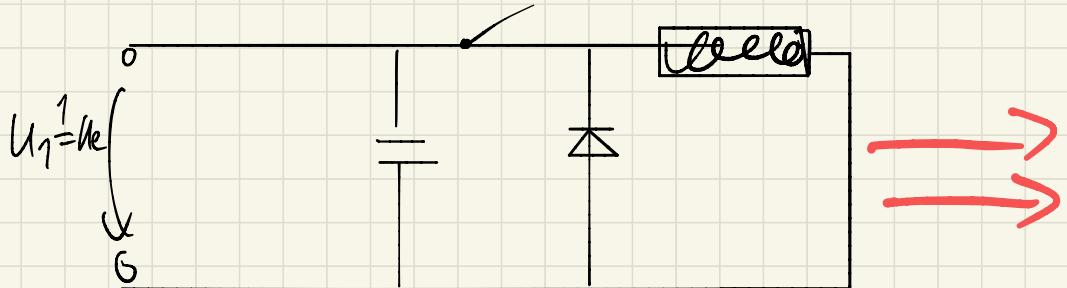
HSS:

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{1 - v_T}$$

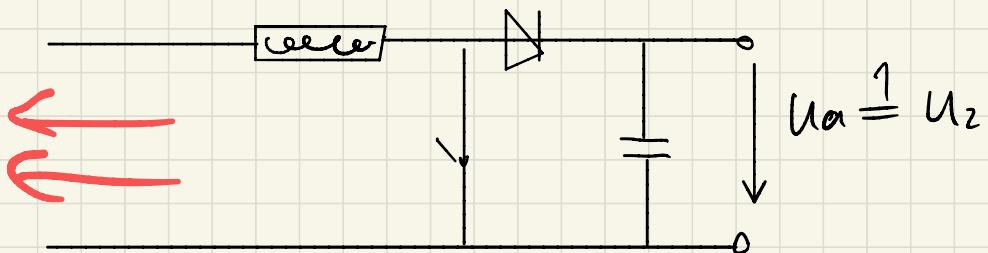
TSS:

$$\frac{U_a}{U_e} = v_T$$

TSS



HSS



$U_1 < U_2$ T_H taktet
 \Rightarrow HSS-Betrieb
 T_I permanent eingeschaltet

$U_1 > U_2$ T_I taktet
 \Rightarrow TSS-Betrieb
 T_H permanent aus

Weitere Gleichstromsteller

1. *Inverswandler*

2. *Sepic-Wandler*

3. *Cuk-Wandler*

4. *Zeta-Wandler*



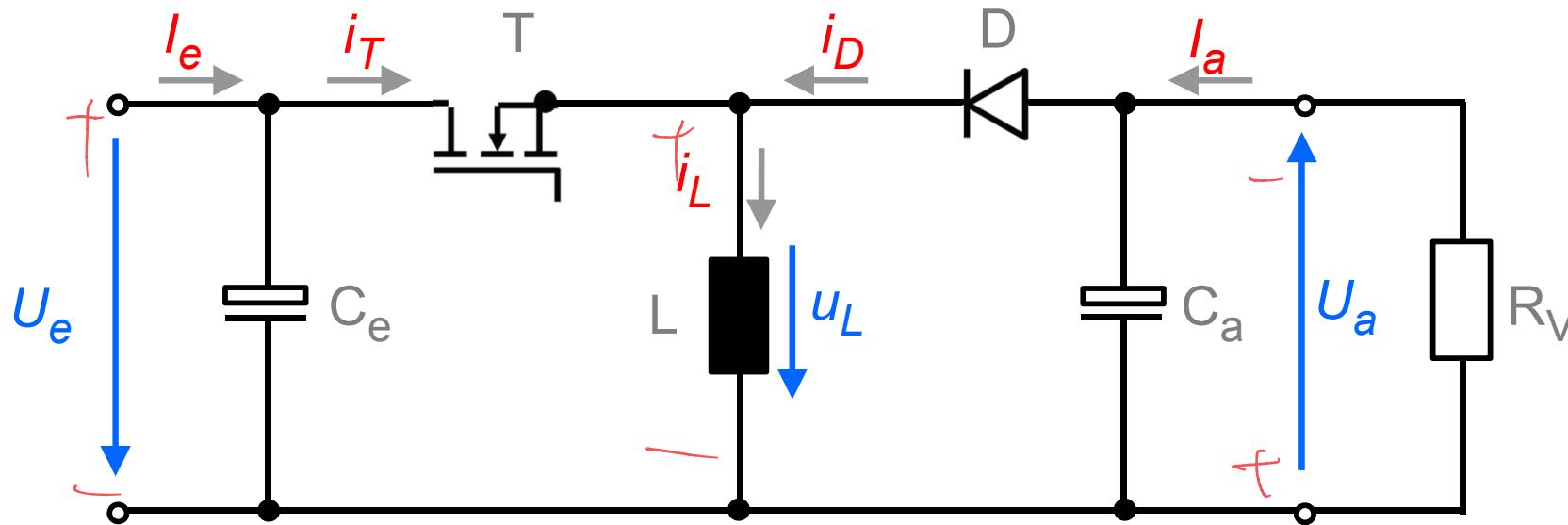
- **Unterschiedliche Eigenschaften:**

- Ausgangsspannungen können kleiner, gleich und größer als die Eingangsspannung sein.

- **Gemeinsame Eigenschaften dieser Gleichstromsteller sind**

- Eingang/Ausgang können durch einen Transformator voneinander galvanische getrennt werden,
- die Halbleiterbauelemente werden mit der Summe von Eingangs- und Ausgangsspannung belastet,
- es wird nur jeweils ein Halbleiterschalter und eine Gleichrichterdiode benötigt.

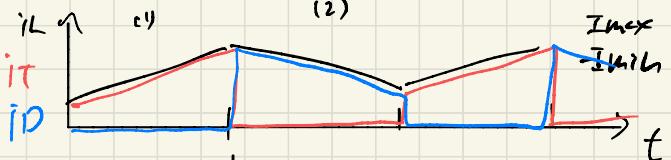
Inverswandler (engl.: Inverting Buck Boost Converter)



- Der Inverswandler wandelt die positive Eingangsspannung U_e in eine negative Ausgangsspannung U_a um. (Die Pfeilrichtungen im Bild berücksichtigen bereits die negative Ausgangsspannung und den negativen Ausgangsstrom.)
- Bezeichnung der Schaltung: Inverswandler (engl.: buck boost converter)
- Das periodische Ein- und Ausschalten des Transistors T führt zu zwei Schaltzuständen:
 - (1.) T leitet ($0 \leq t \leq t_{ein}$)
 - (2.) T sperrt ($t_{ein} \leq t \leq T$)

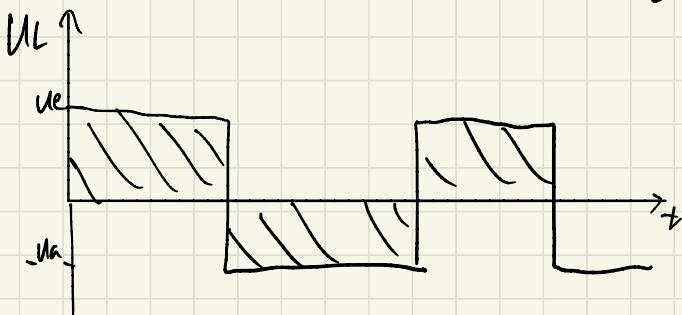
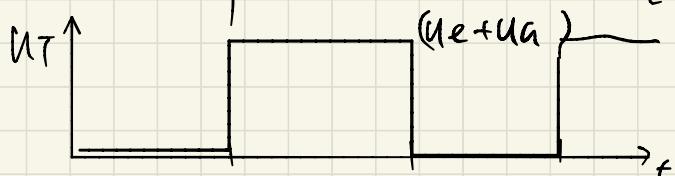
$$\begin{aligned} ZH(1) \quad & U_T = 0 \\ & U_L = U_e \\ & i_L = i_T \uparrow \end{aligned}$$

Voller Leckströmer Bereich



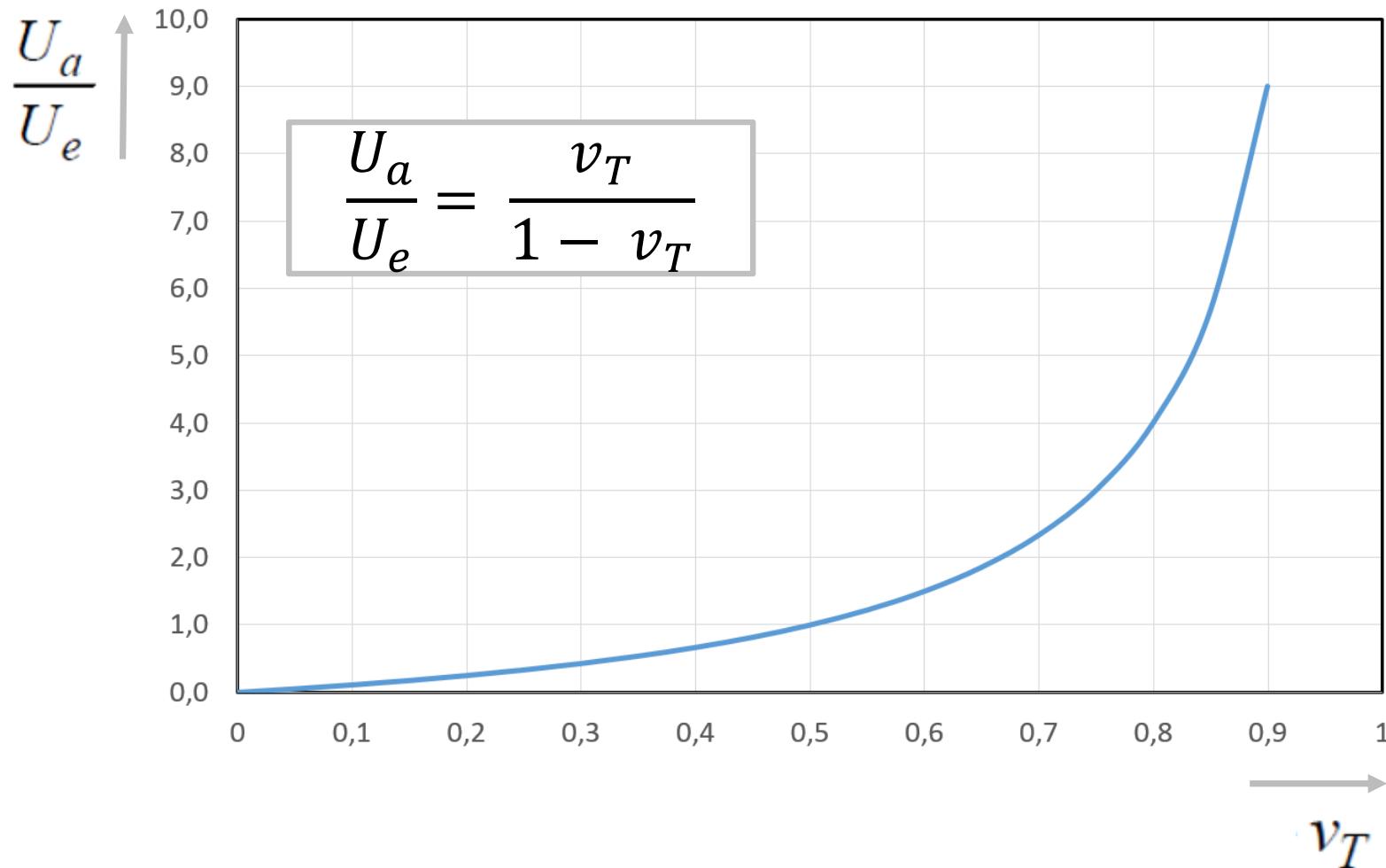
$$ZH(2) \quad i_L = i_D \downarrow$$

$$\begin{aligned} U_T &= U_e - U_L \\ &= U_e - (-U_a) \\ &= U_e + U_a \end{aligned}$$



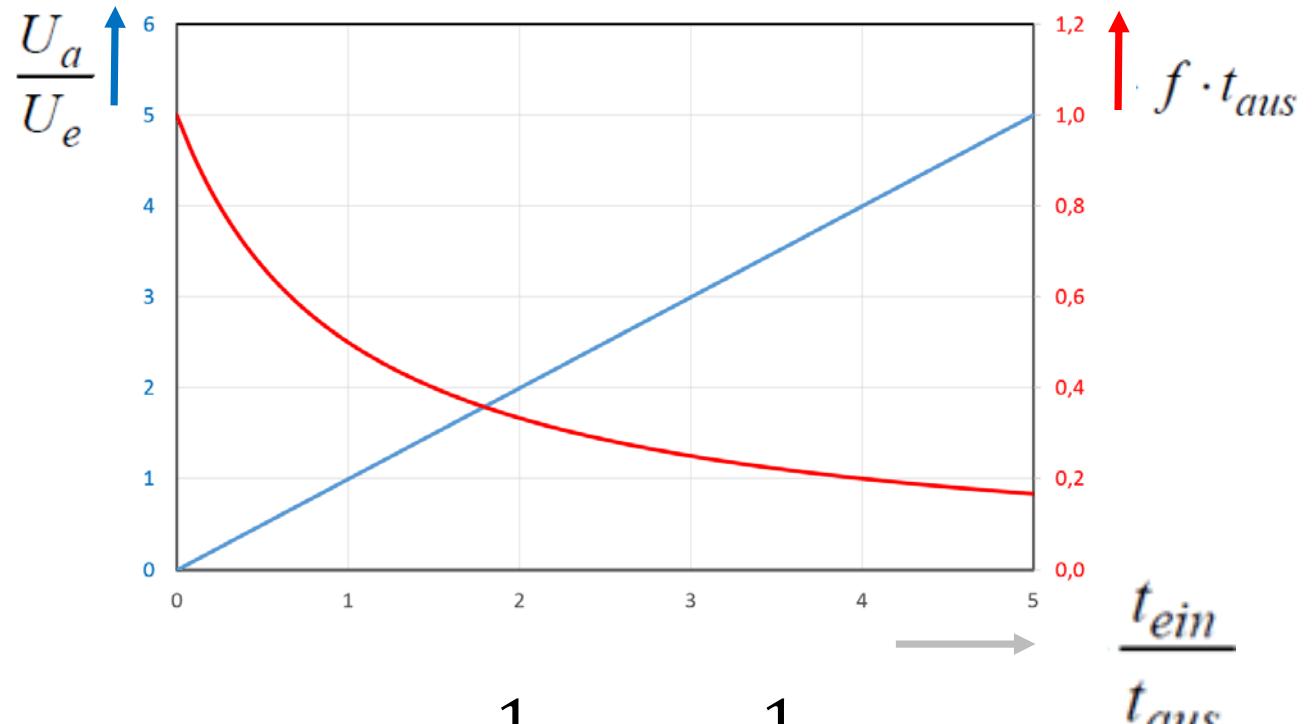
$$\Delta I = I_{max} - I_{min}$$

Inverswandler: Normierte Ausgangsspannung $U_a : U_e$ in Abhängigkeit vom Tastverhältnis v_T



Inverswandler: Normierte Ausgangsspannung $U_a : U_e$ in Abhängigkeit vom Tastverhältnis vT

- Linearität erreicht man über das Verhältnis $(t_{ein} : t_{aus})$:



- Es gilt:

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{t_{ein}}{t_{aus}}$$

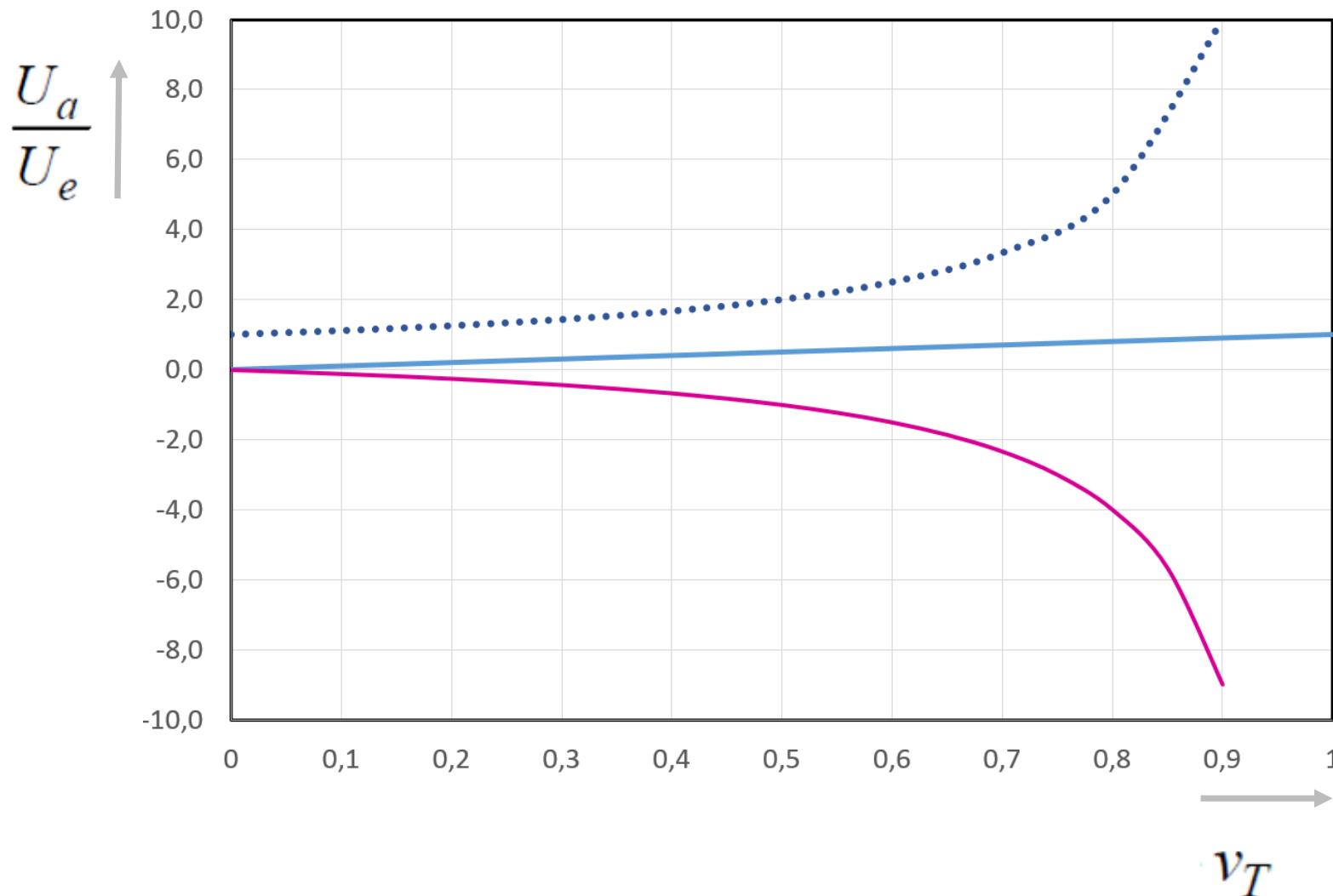
Wird $t_{aus} = \text{konstant}$ gehalten und ist t_{ein} veränderbar, dann ist $U_a \sim t_{ein}$.
→ Damit variiert die Arbeitsfrequenz.

- Es gilt: $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_{ein} + t_{aus}}$

so dass:

$$f \cdot t_{aus} = \frac{1}{1 + \frac{t_{ein}}{t_{aus}}}$$

Vergleich: Hochsetzsteller – Tiefsetzsteller - Inverswandler



HSS

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{1 - v_T}$$

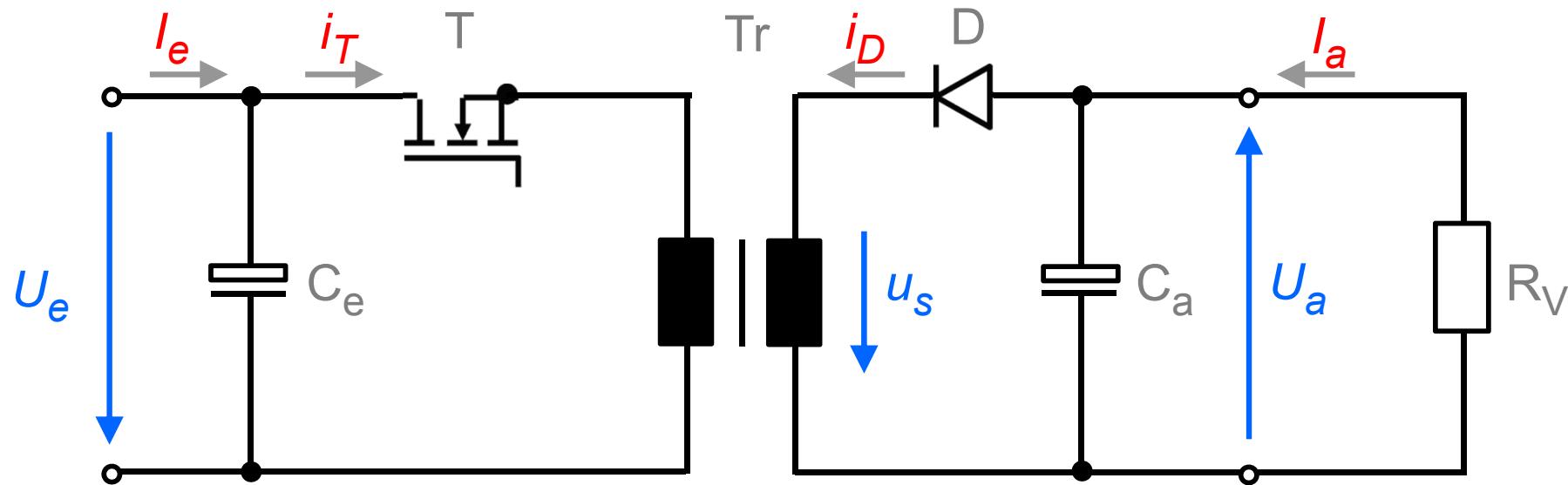
TSS

$$\frac{U_a}{U_e} = v_T$$

Invers

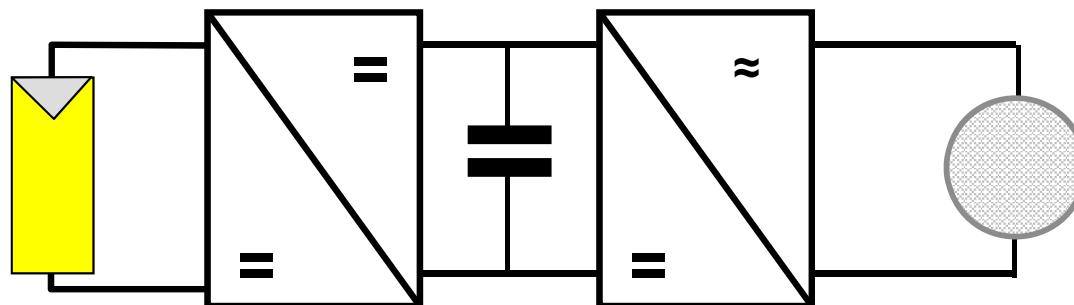
$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{-v_T}{1 - v_T}$$

Inverswandler mit Potentialtrennung



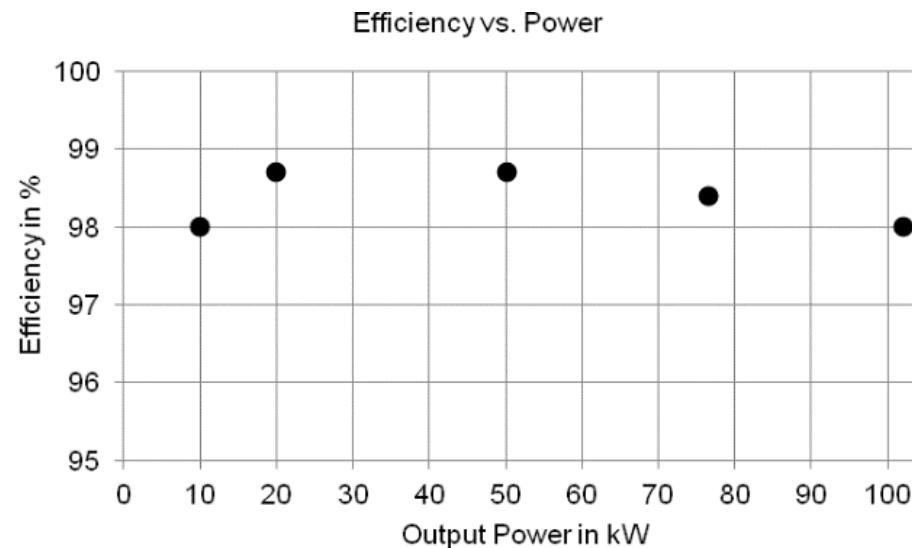
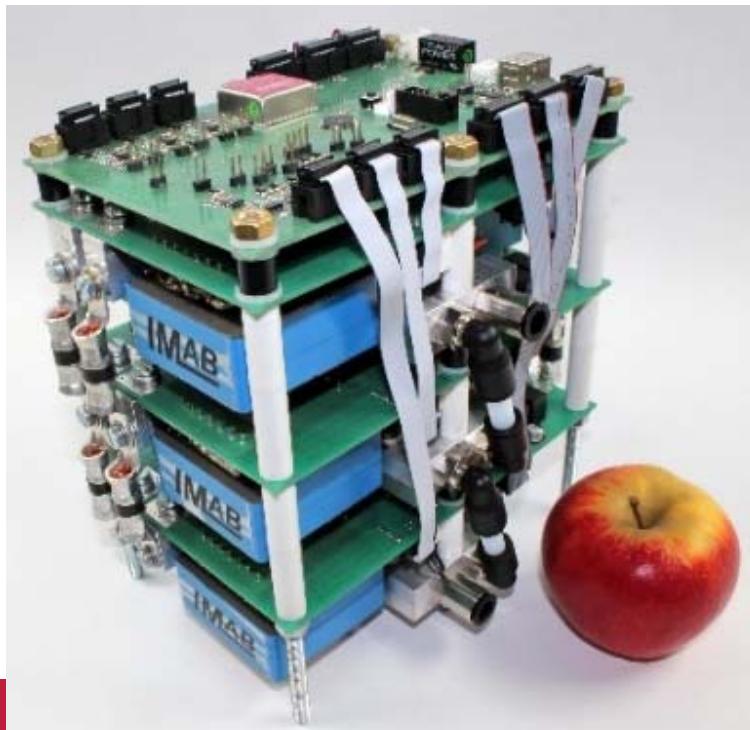
Hochsetzsteller: Anwendungen

- **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 Solarwechselrichters von der stark variierenden Spannung eines photovoltaischen Solargenerators



Hochsetzsteller: Anwendungen

- **Elektromobilität:** 3 parallele Hochsetzsteller im interleaved Betrieb mit bidirektonaler Energieflussrichtung
- zur Versorgung des Wechselrichterzwischenkreises ($U_2 = 400\text{V}$) aus der Traktionsbatterie ($U_1 = 180..270\text{ V}$)
- Nennleistung: Maximal 100 kW
- Möglichst geringer batterieseitiger Stromripple

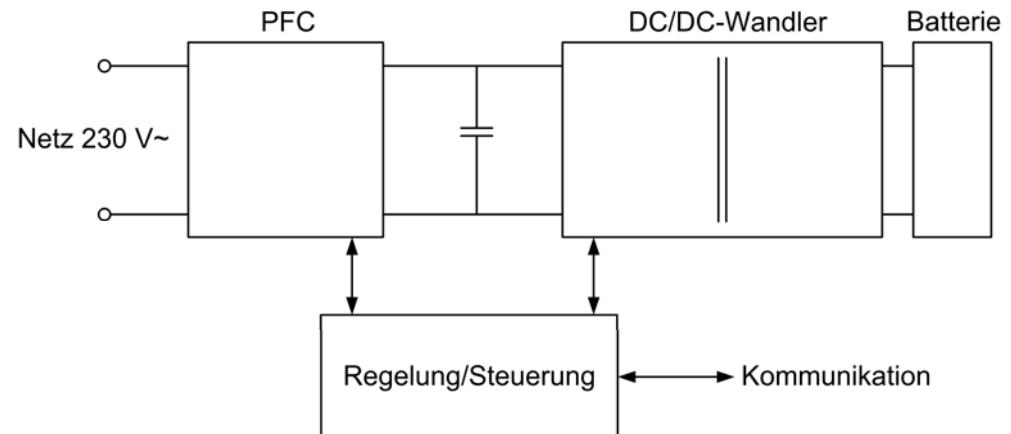
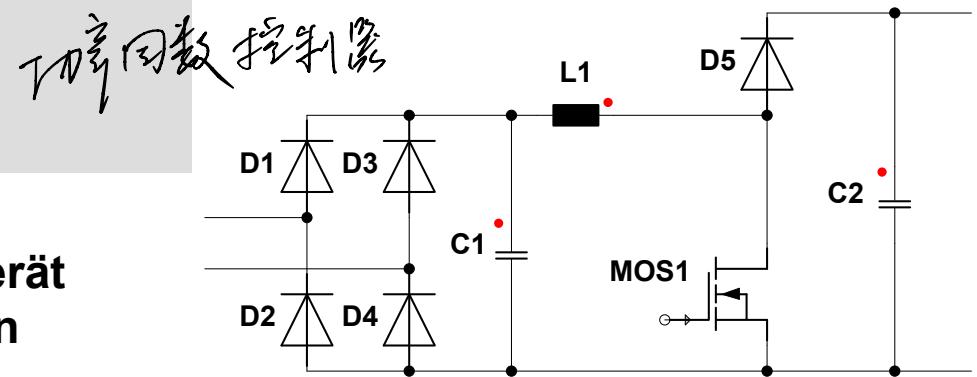


- Messwerte für Betrieb bei Nennspannungen (460 V -> 600 V)
- Eingangs- und Ausgangsleistung werden direkt gemessen mit Yokogawa WT3000

Power Factor Controller (PFC) für einphasige Anwendungen:

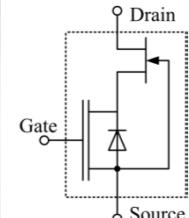
▪ Beispiel: PFC für ein kompaktes Ladegerät für Elektrofahrzeuge mit GaN-Halbleitern

- Aktive Leistungstaktorkorrektur
- Galvanisch getrennter DC/DC-Wandler zur Spannungsanpassung
- Nennausgangsleistung 3 kW; geeignet für das einphasige Netz
- Eingangsspannung 230 V Wechselspannung



Erreichte Eckdaten:

- Schaltfrequenz: 500 kHz
- Deutlich geringeres Volumen als kommerzielle Geräte

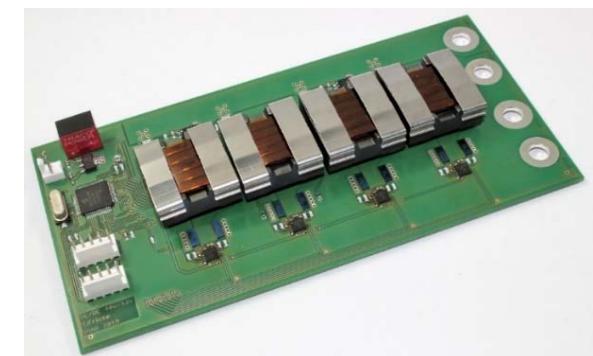
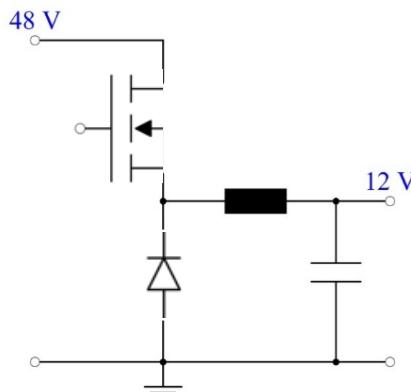
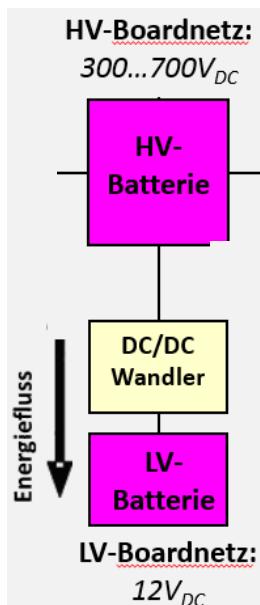


Tiefsetzsteller: Anwendungen

- Schaltnetzteile
- Gleichstrom-Antriebe
- Gleichstrom-Versorgungen

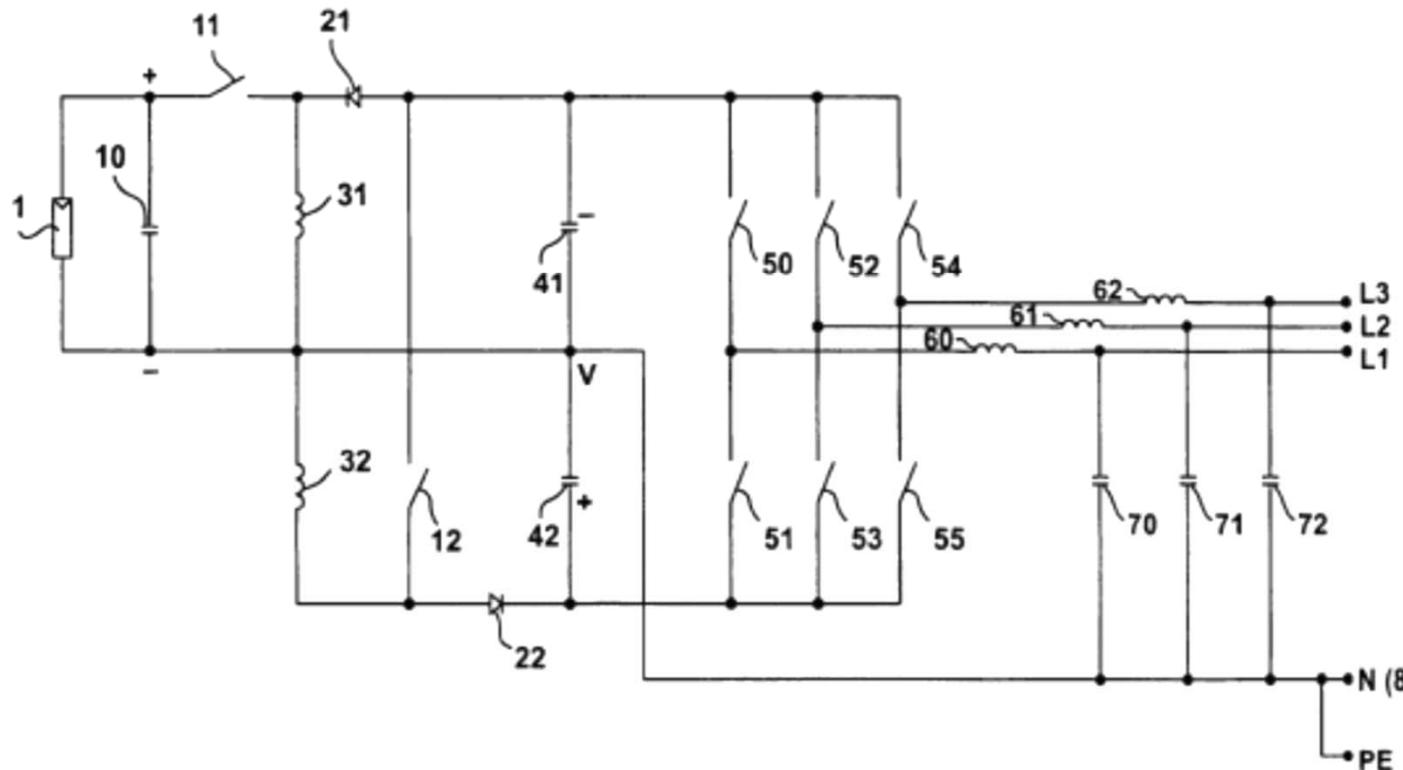
z.B. in Elektro-Fahrzeugen zwischen HV- und LV-Bordnetz (Beispiel: 4 interleaved TSS, je mit neuartigen Halbleitern auf Basis von GaN)

*Schaltnetzteile
Gleichstrom-Antriebe*



Inverswandler: Anwendungen

- zur Erzeugung negativer Ausgangsspannungen
- **netzgekoppelte Solaranlagen:** Entkopplung der Zwischenkreisspannung des Solarwechselrichters von der stark variierenden Spannung eines photovoltaischen Solargenerators



Was haben wir heute gemacht ?

Gleichstromsteller (DC-DC-Wandler) ohne galvanische Trennung

1. Hochsetzsteller
2. Tiefsetzsteller
3. Inverswandler

Was kommt beim nächsten Mal (4.12.2019) ?

Zwei Vorlesungen: Magnetische Bauelemente (I)

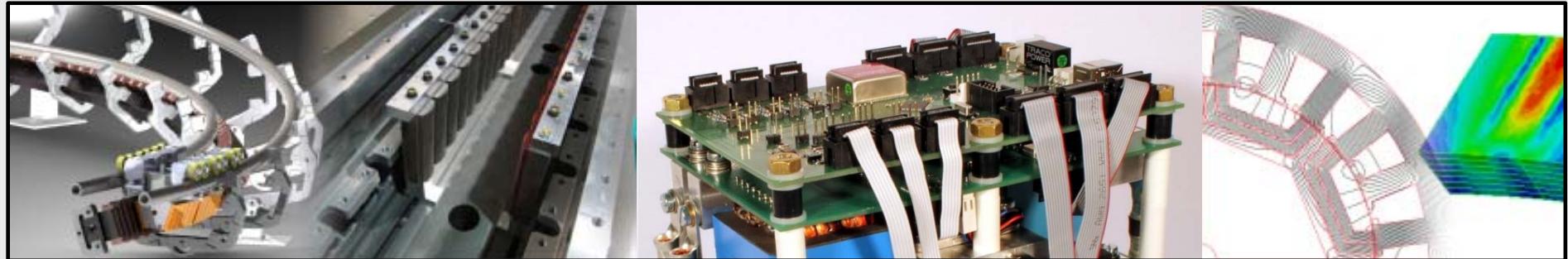
Magnetische Bauelemente (II)



Technische
Universität
Braunschweig

IMAB

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

Dr.-Ing. Günter Tareilus

M: g.tareilus@tu-braunschweig.de

T.: + 49 (0)531 3913900

www.imab.de

NFF

NIEDERSÄCHSISCHES
FORSCHUNGZENTRUM
FAHRZEUGTECHNIK