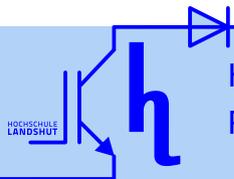


# Leistungselektronik

## Kapitel 3: Grundlagen selbstgeführte Stromrichter

Prof. Dr.-Ing. A. Kleimaier



# Leistungselektronik

## Aktuelles Kapitel



**Kapitel 1:** Einführung, Brainstorming, Übersicht  
**2:** Grundlagen netzgeführte Stromrichter  
**3:** Grundlagen selbstgeführte Stromrichter  
**4:** Leistungshalbleiterbauelemente

} Einstieg:  
allgemeine  
Grundlagen

**Kapitel 5:** Wechselrichter 1: Topologie und Komponenten  
**6:** Wechselrichter 2: Steuerverfahren und Pulsmuster  
**7:** Wechselrichter 3: Dimensionierung und Simulation

} zentrales  
Thema

**Kapitel 8:** Aufbautechnologie und Entwärmung  
**9:** Ansteuerung von Leistungshalbleitern  
**10:** Schaltvorgänge von Leistungshalbleitern  
**11:** Vermessung, Inbetriebnahme und Test

} Technologie  
& Detailwissen

**Kapitel 12:** Spezielle Einsatzgebiete und Topologien – Referate

} Vergrößerung  
Wissensbasis

# Leistungselektronik

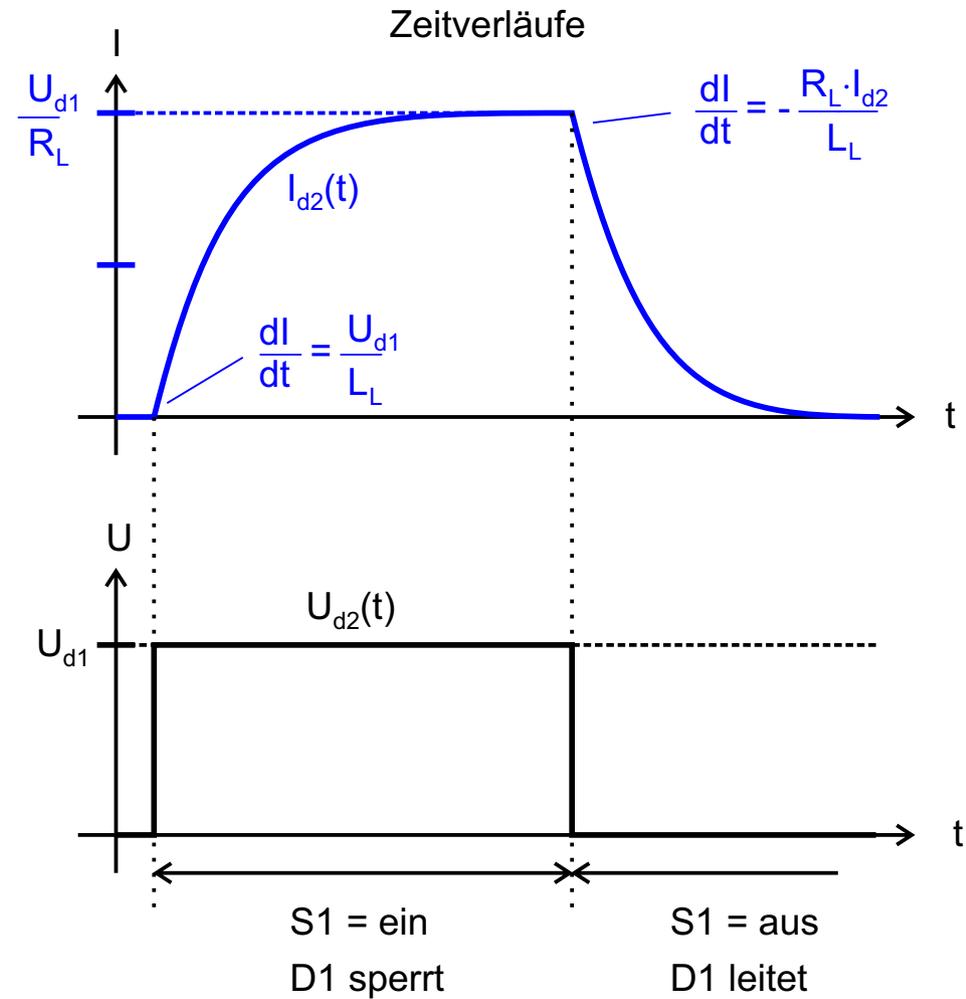
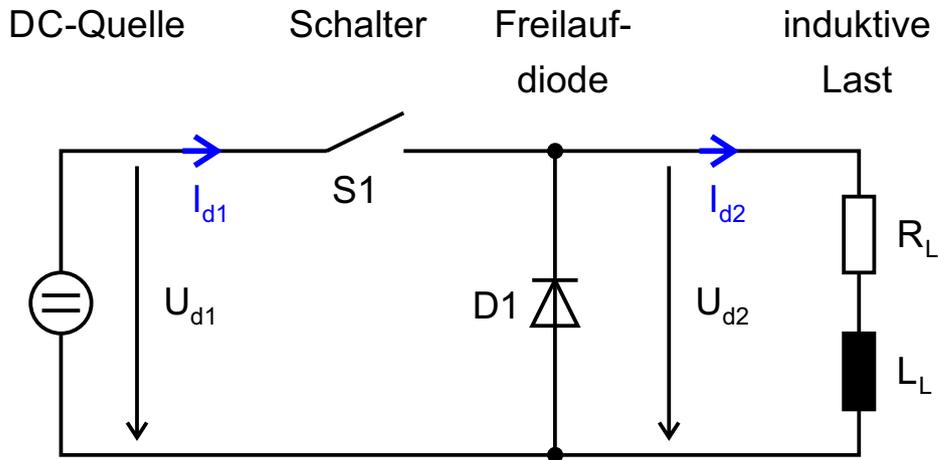
## Übersicht

### Kapitel 3: Grundlagen selbstgeführte Stromrichter

- 3.1 Vorüberlegungen
- 3.2 Anforderungen
- 3.3 Tiefsetzsteller
- 3.4 Hochsetzsteller
- 3.5 Halbbrücke
- 3.6 Abgeleitete Topologien

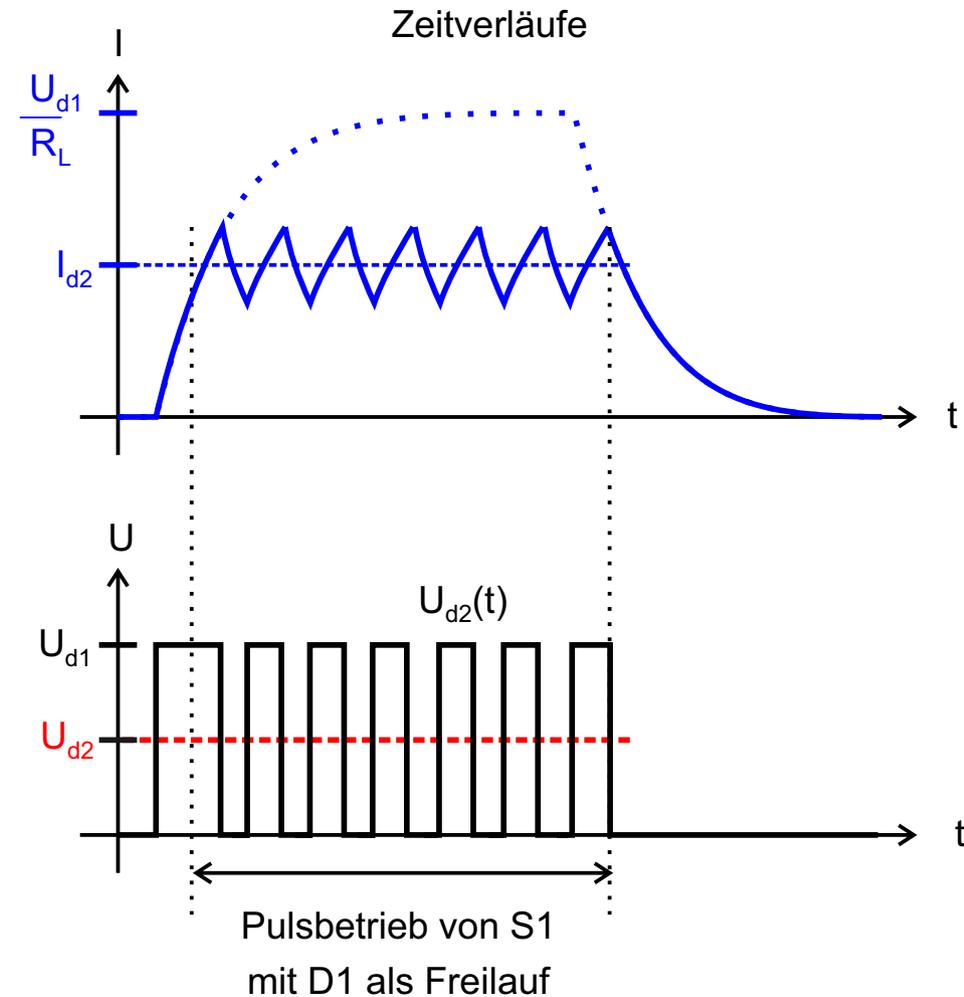
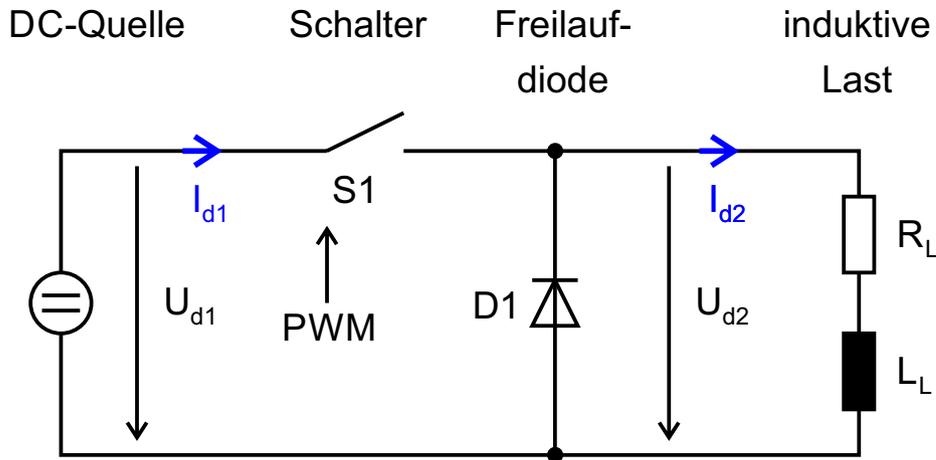
### 3.1 Vorüberlegungen

#### Ansteuerung einer Feldwicklung: "Schalter"



### 3.1 Vorüberlegungen

#### Spannungsstellung durch Pulsen: "Tiefsetzsteller"



Mittelwertbetrachtung Pulsbetrieb:

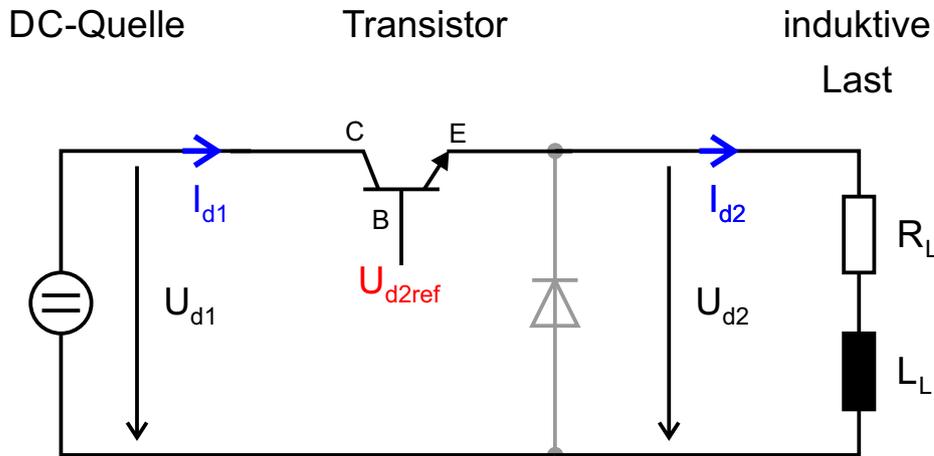
$$I_{d2} = \frac{U_{d2}}{R_L}$$

50% Einschaltdauer von S1:  $U_{d2} = 0.5 \cdot U_{d1}$

$$I_{d1} = 0.5 \cdot I_{d2}$$

## 3.1 Vorüberlegungen

### Gegenbeispiel: Längsregler, Linearbetrieb



#### Funktion:

- $U_{d2ref}$  treibt Strom durch Basis-Emitter-Diode
- Transistor schaltet durch, solange  $U_{d2} < U_{d2ref}$
- Regelvorgang, so dass  $U_{d2} \approx U_{d2ref}$
- $U_{d2}$  unabhängig von  $U_{d1}$  und  $I_{d2}$
- \* glatter Spannungsverlauf, keine Störungen

#### Problem:

- Schönheitsfehler  $I_{d1} = I_{d2}$
- Wirkungsgrad  $\eta = U_{d2} / U_{d1}$
- Verlustleistung an T1:  $P_{V,T1} = (U_{d1} - U_{d2}) \cdot I_{d2}$
- nur für kleine Ströme!



"Bratregler"

## 3.2 Anforderungen

### Tiefsetzsteller

#### Anforderungen - "Lastenheft"



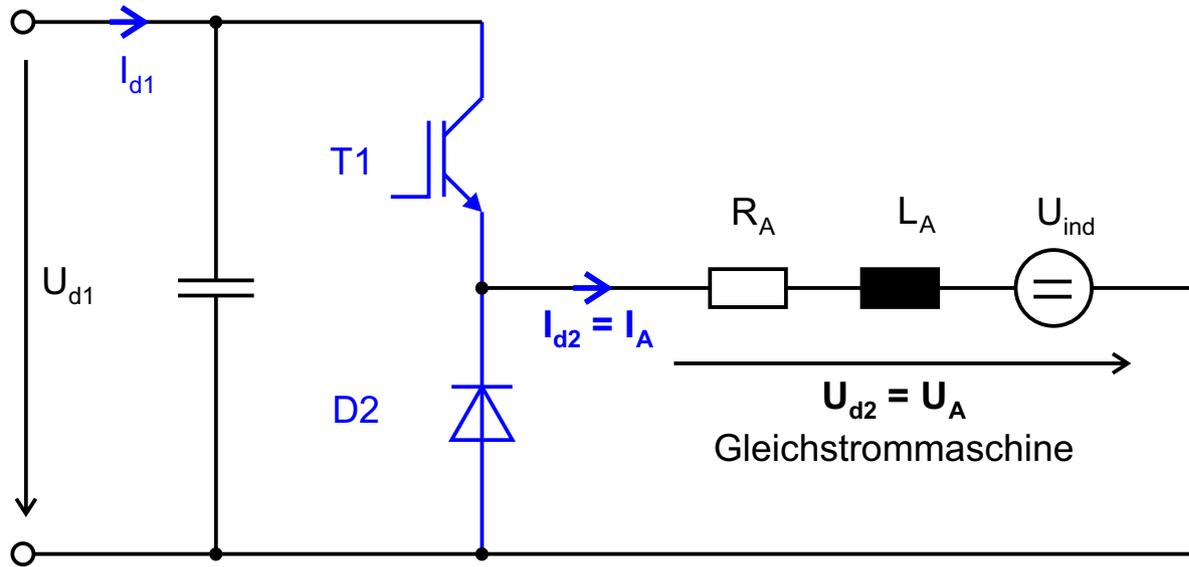
#### Umsetzung - "Spezifikation"

- Einsatzgebiete Tiefsetzsteller:
  - Drehzahlvariable Gleichstrommaschine
  - DCDC-Wandler, Buck-Konverter (fixed)
  - Getaktete, variable Spannungsversorgung
- Eingangsspannung:  $U_{d1} = \text{DC}$
- Ausgangsspannung:  $U_{d2} = 0..U_{d1}$
- Wirkungsgradanforderung:  
  
 $P = 100\text{W}: \eta_{\text{LE}} > 80\%$   
  
 $P = 100\text{kW}: \eta_{\text{LE}} > 95\%$

- Linearregler nur für kleine Leistungen
- Größere Leistungen: Pulsweitenmodulation (PWM)  
  
Annäherung Sollwert von  $U_{d2}$  durch Pulsen
- Elektronische Schalter "Halbleiterventile"
- DC: keine Netzführung möglich  
  
 $\Rightarrow$  aktiv ein- und ausschaltbare Ventile  
  
 $\Rightarrow$  "selbstgeführte" Stellglieder

### 3.3 Tiefsetzsteller

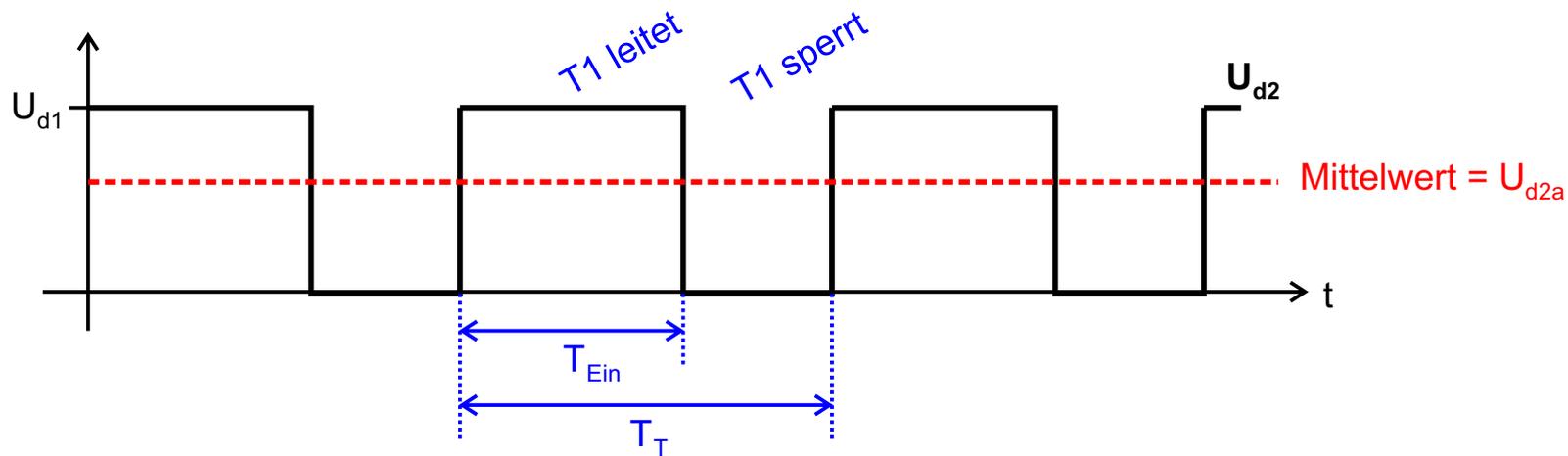
Schaltbild mit IGBT als Ventil (ideales Verhalten)



Taktfrequenz:  $f_T = \frac{1}{T_T}$

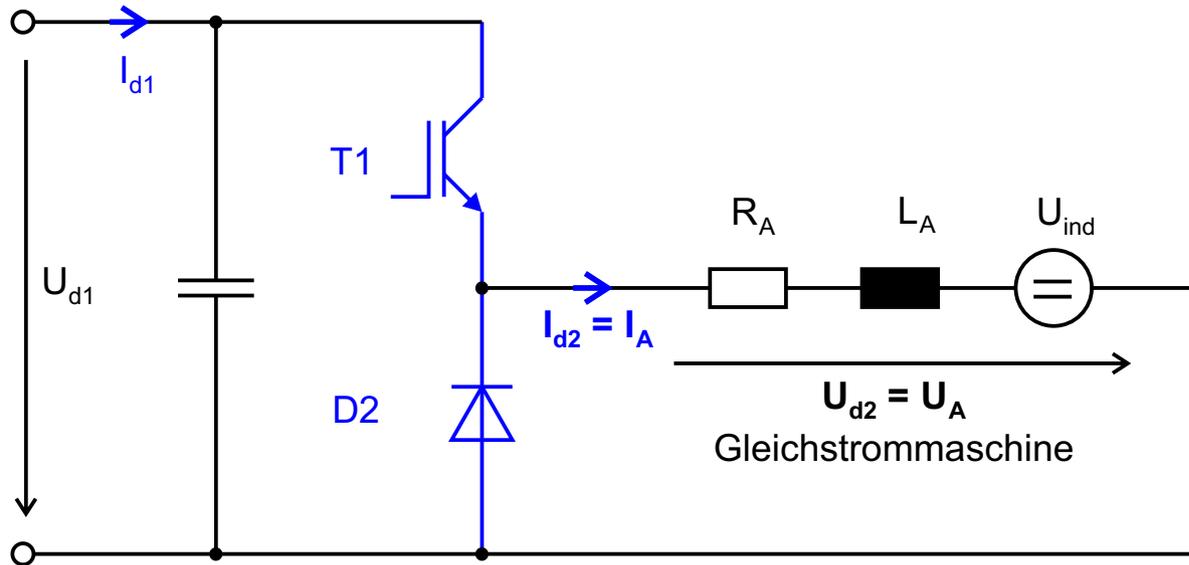
Aussteuergrad:  $a = \frac{T_{Ein}}{T_T}$

Mittelwerte:  $U_{d2a} = a \cdot U_{d1}$   
 $I_{d1} = a \cdot I_{d2a}$



### 3.3 Tiefsetzsteller

#### Zeitverlauf Ausgangsstrom



**T1 leitet, D2 sperrt:**

$$U_{d2} = U_{d1}$$

$I_{d2}$  steigt ( $U_{d1} > U_{ind}$ )

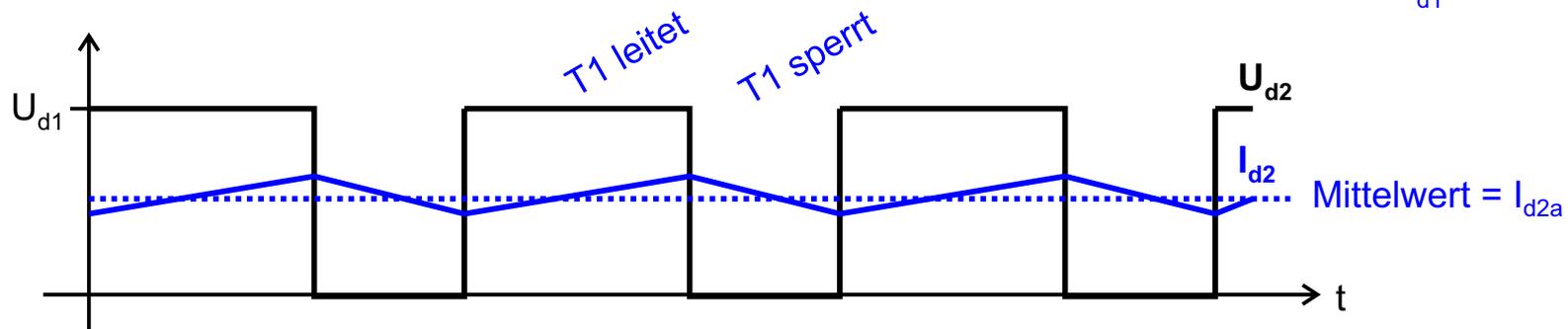
$$I_{d1} = I_{d2}$$

**T1 sperrt, D2 leitet:**

$$U_{d2} = 0$$

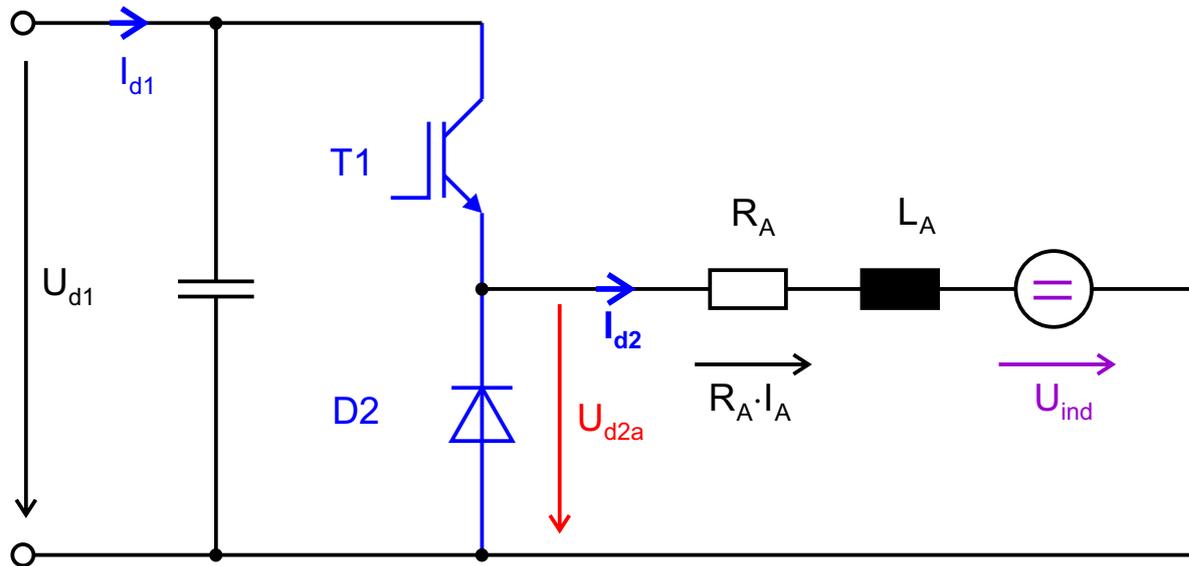
$I_{d2}$  fällt

$$I_{d1} = 0$$



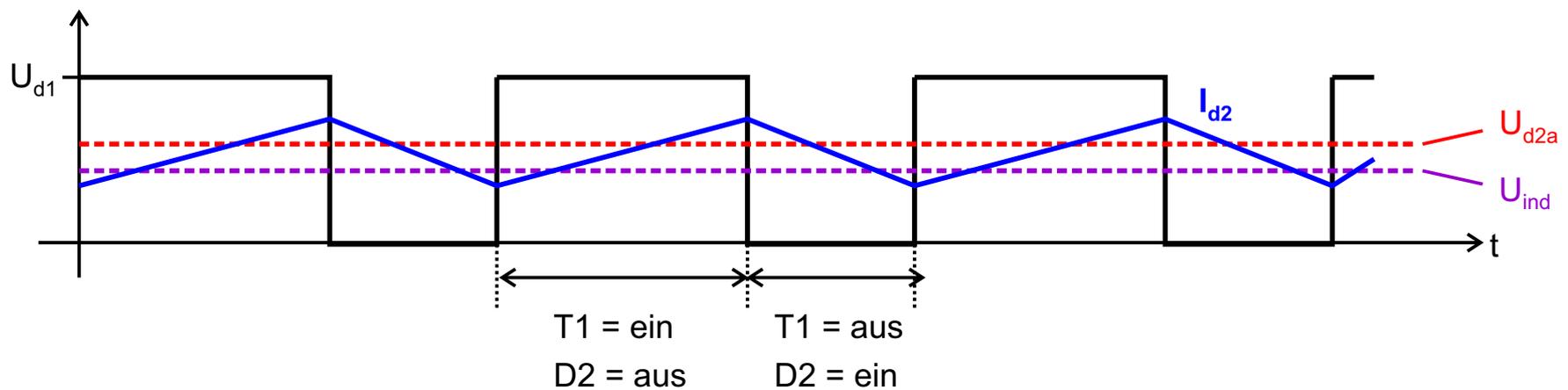
### 3.3 Tiefsetzsteller

#### Nicht-lückender Betrieb



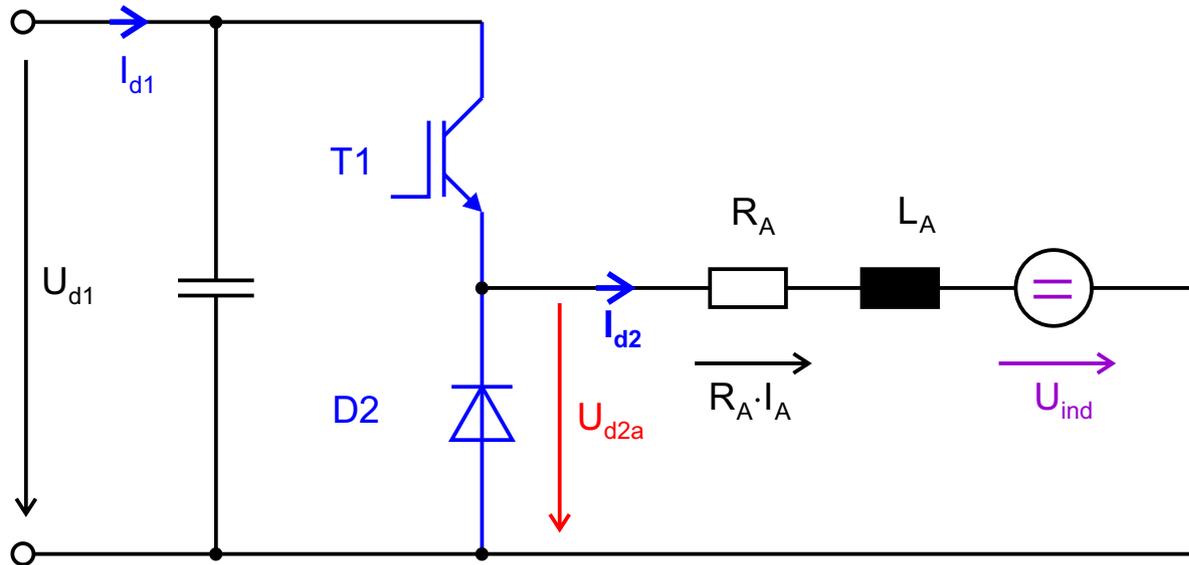
#### Betriebsfall:

- $a = \text{unverändert}$
- $U_{ind}$  steigt
- $\Rightarrow R_A \cdot I_A$  wird kleiner
- $\Rightarrow I_A$  wird kleiner



### 3.3 Tiefsetzsteller

#### Lückbetrieb

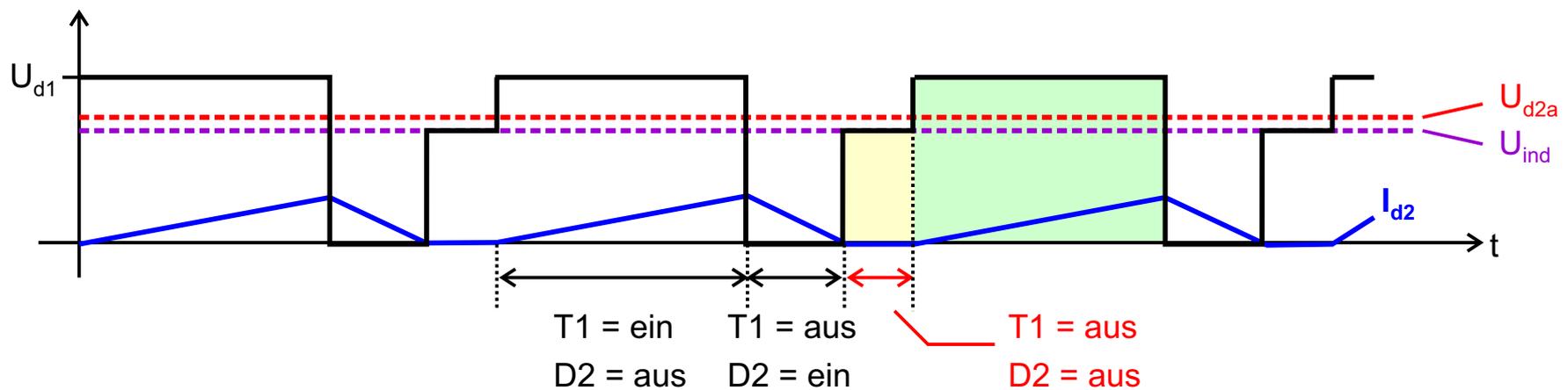


#### Betriebsfall:

- $I_A$  lückt, d.h. wird zeitweise Null
- $D2$  leitet nicht mehr
- Strompfad aufgetrennt

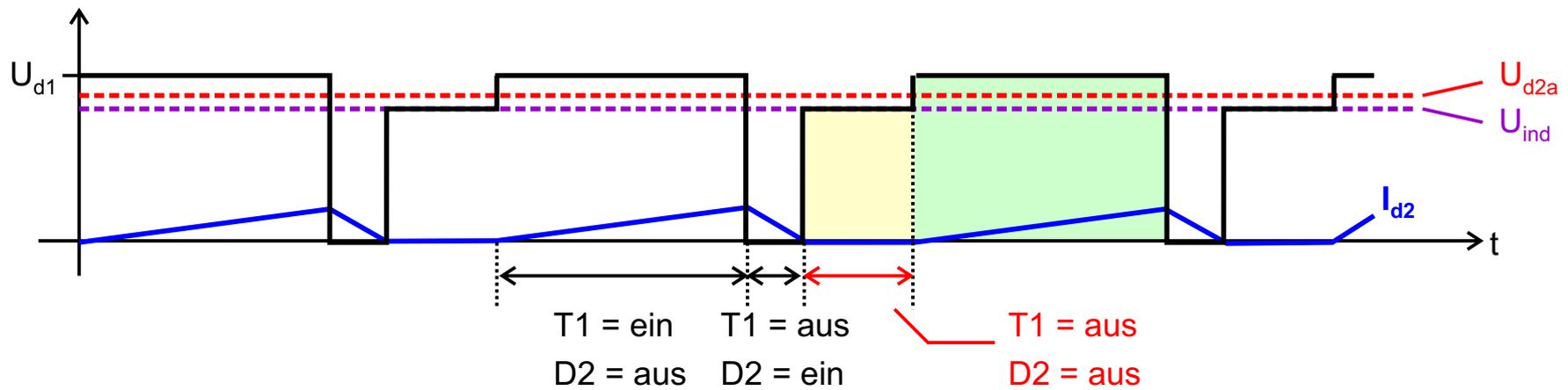
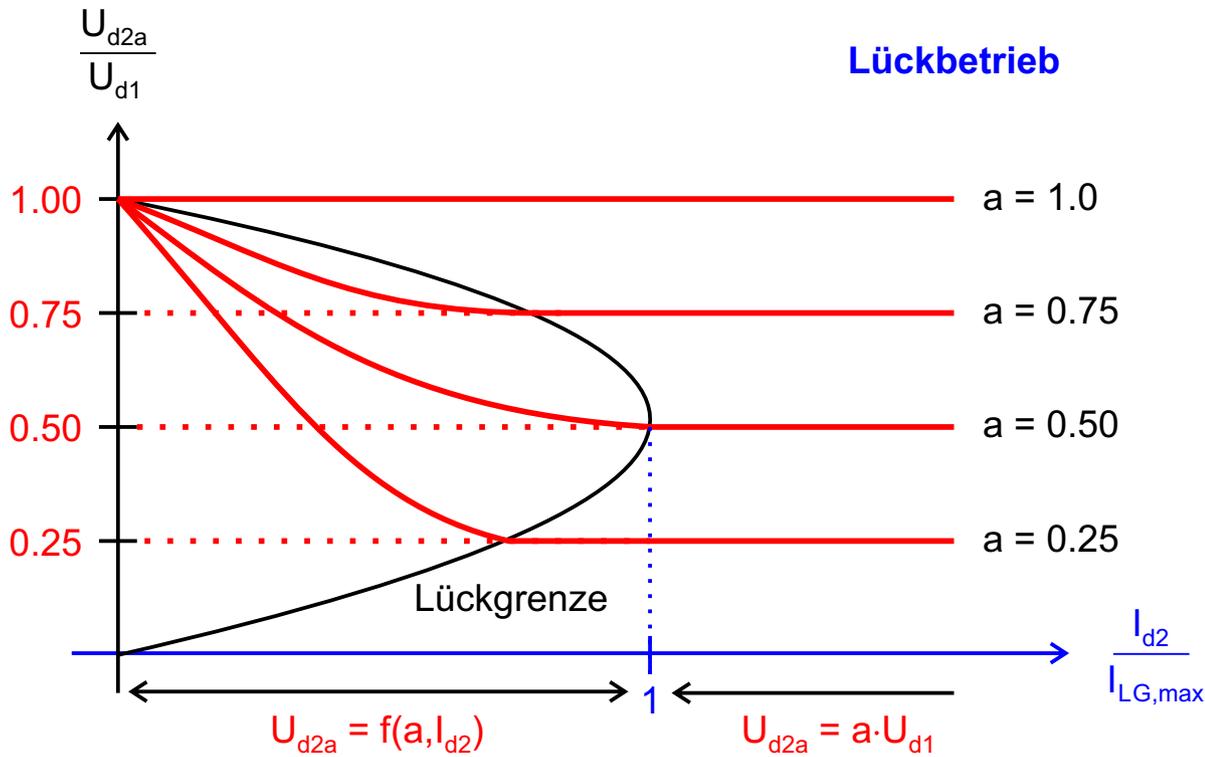
$$\Rightarrow U_{d2} = U_{ind}$$

$\Rightarrow$  Rückkopplung:  $U_{d2a}$  steigt



### 3.3 Tiefsetzsteller

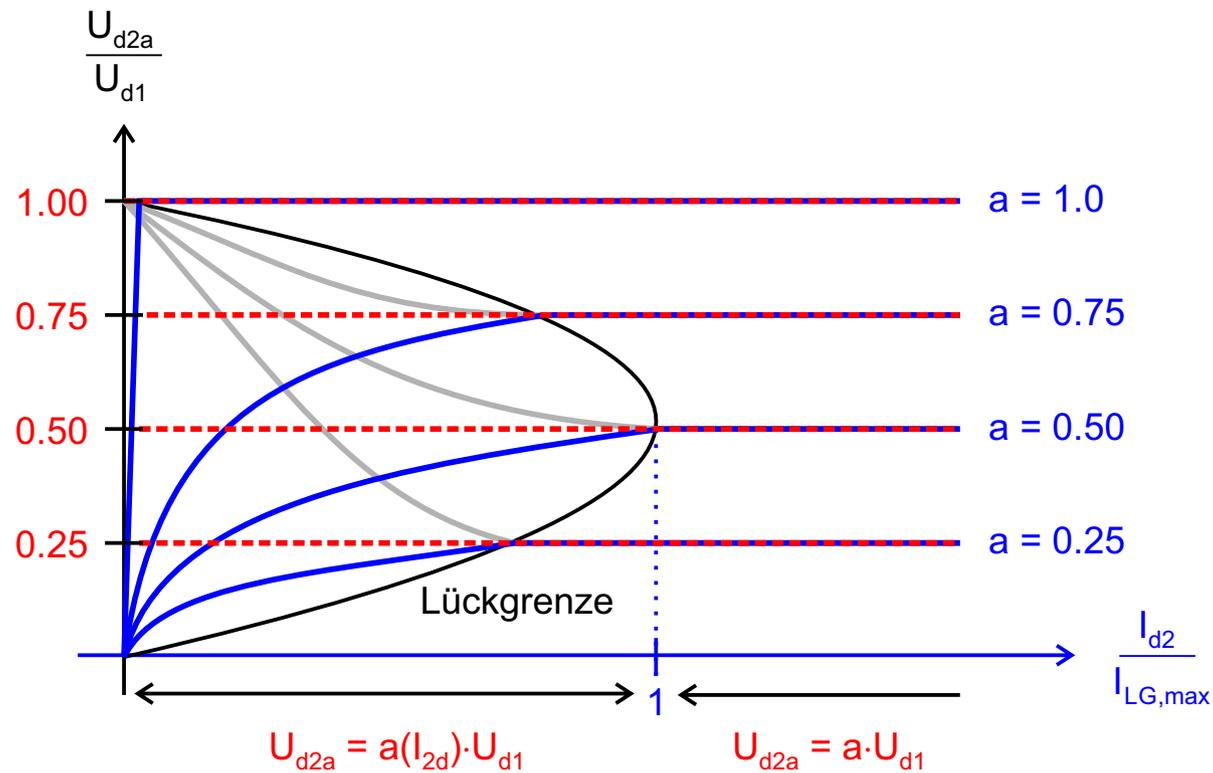
#### Lückbetrieb



### 3.3 Tiefsetzsteller

#### Linearisierung bei Lückbetrieb

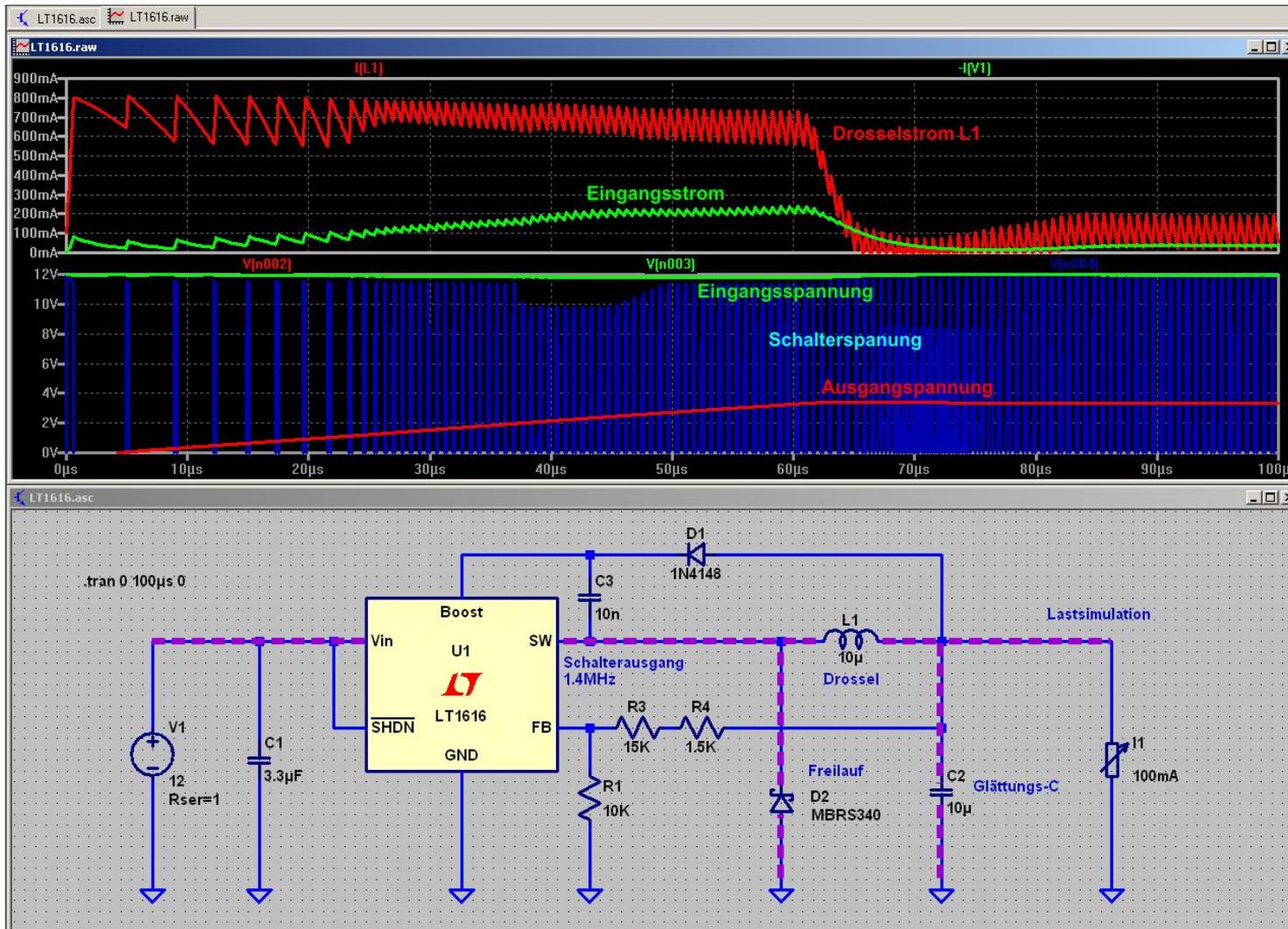
blau: Steuerkennlinien für lastunabhängiges Verhalten  
rot: resultierendes Ein- Ausgangsspannungsverhältnis



### 3.3 Tiefsetzsteller

"kompaktes" Einsatzbeispiel: Buck-Converter bzw. Step-Down Switching Regulator

Spannungen  
Ströme



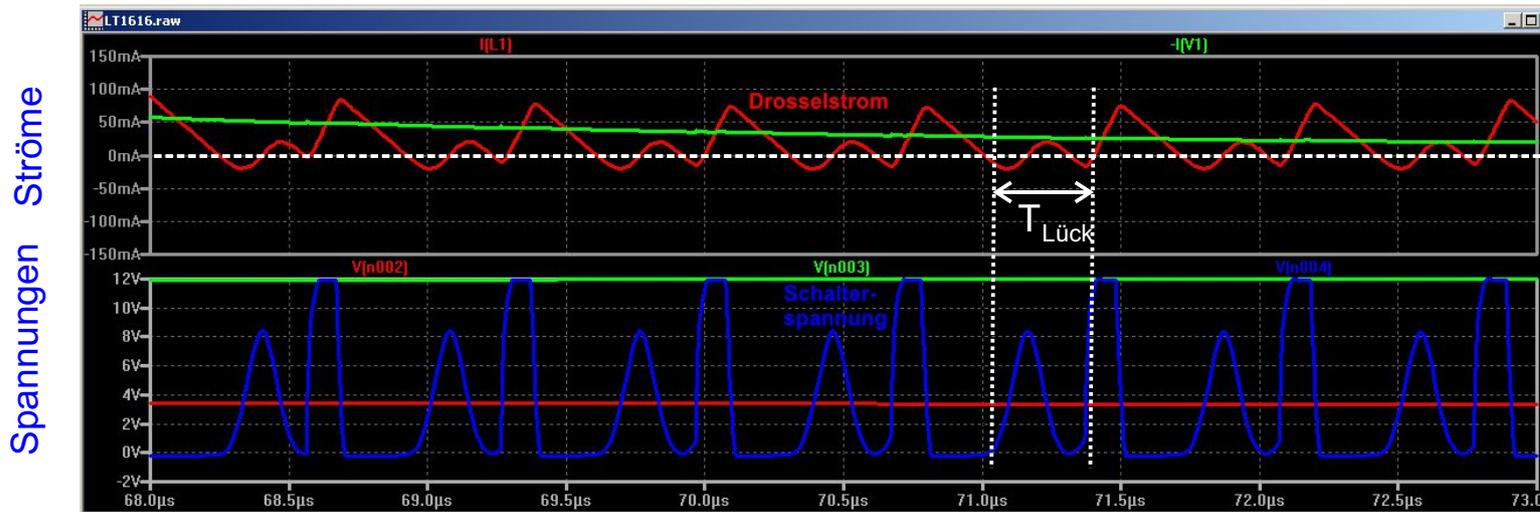
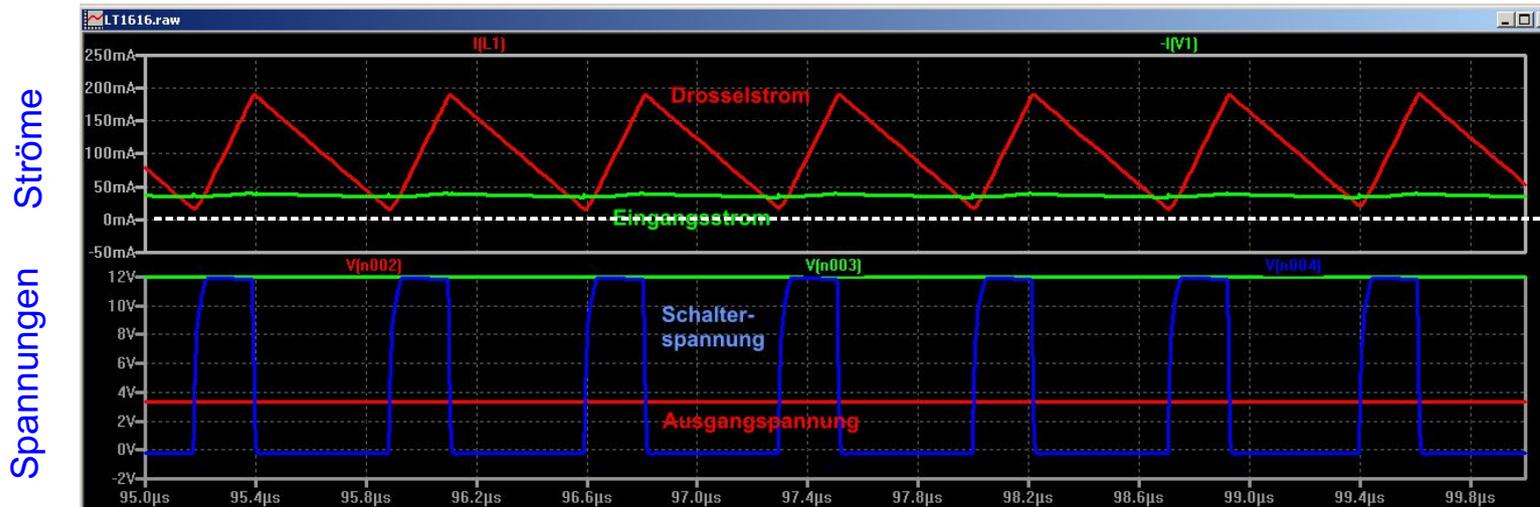
Fertigbaustein LT1616:  
1.4MHz 600mA

hier: 3.3V-Versorgung  
mit kapazitivem Filter

Simulationstool: LTspice Ersteller Simulationsmodell: A. Kleimaier

### 3.3 Tiefsetzsteller

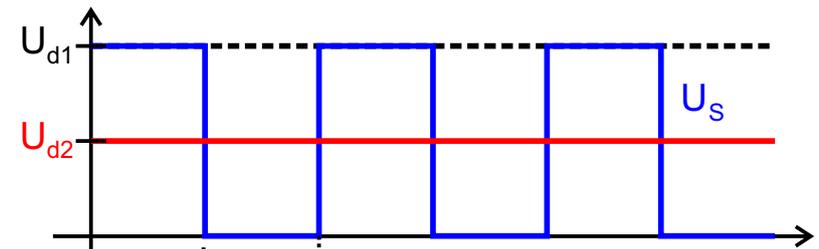
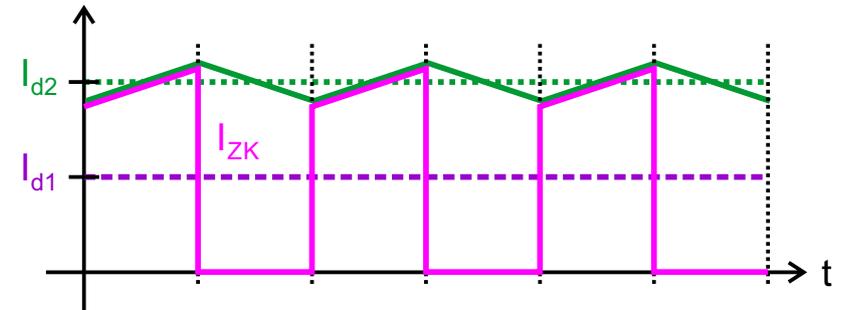
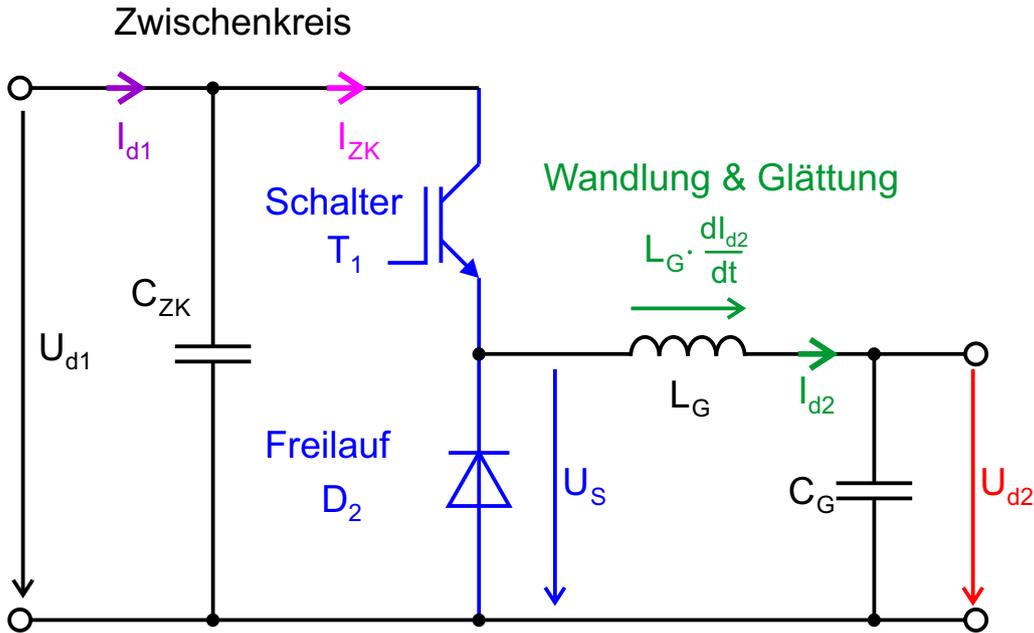
#### "kompaktes" Einsatzbeispiel: Buck-Converter bzw. Step-Down Switching Regulator



Simulationstool: LTspice Ersteller Simulationsmodell: A. Kleimaier

### 3.3 Tiefsetzsteller

#### Zusammenfassung



Ideales Verhalten:

- $U_{d1}$ ,  $I_{d1}$  und  $U_{d2}$  konstant
- real: Taktripple

Spannungsgleichung:

- T1=ein:  $U_{d1} = L_G \cdot \frac{di_{d2}}{dt} + U_{d2}$
- D2=ein:  $0 = L_G \cdot \frac{di_{d2}}{dt} + U_{d2}$

PWM-Schaltfrequenz:  $f_T = \frac{1}{T_T}$

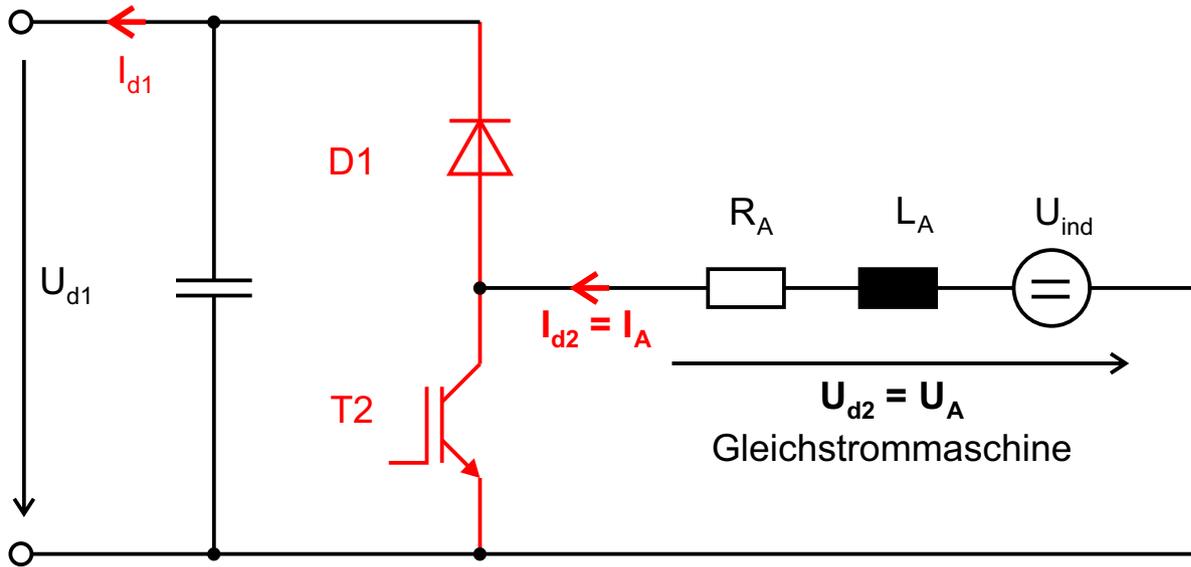
Aussteuergrad:  $a = \frac{T_{Ein}}{T_T}$

Mittelwert Ausgangspg.:  $U_{d2} = a \cdot U_{d1}$

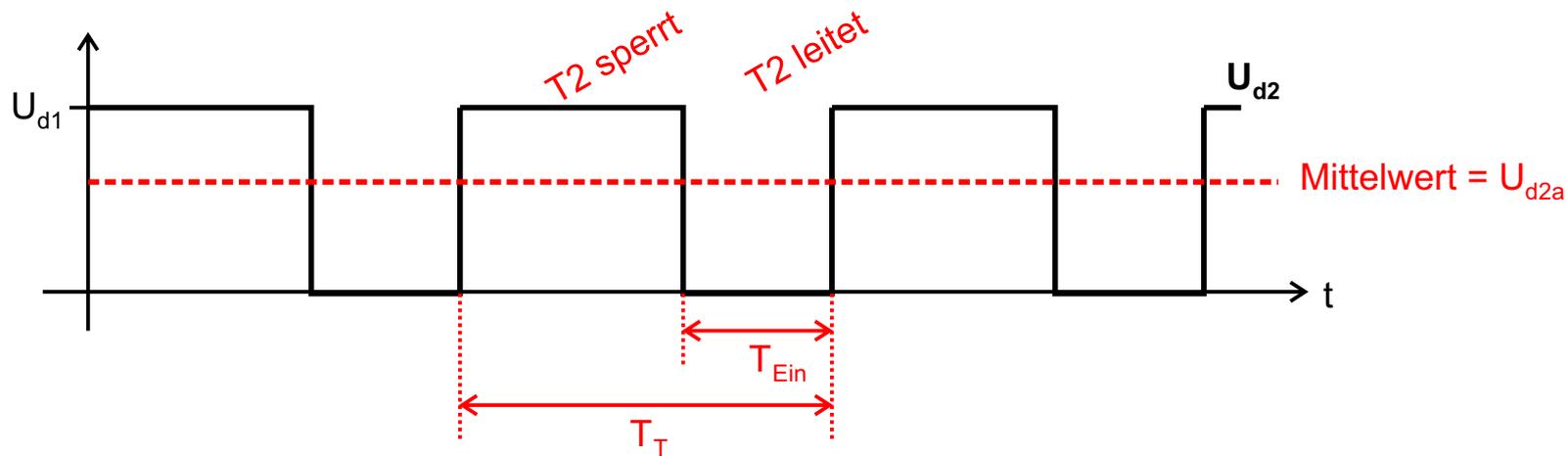
Mittelw. Eingangsstrom:  $I_{d1} = a \cdot I_{d2}$

### 3.4 Hochsetzsteller

#### Schaltbild mit IGBT als Ventil

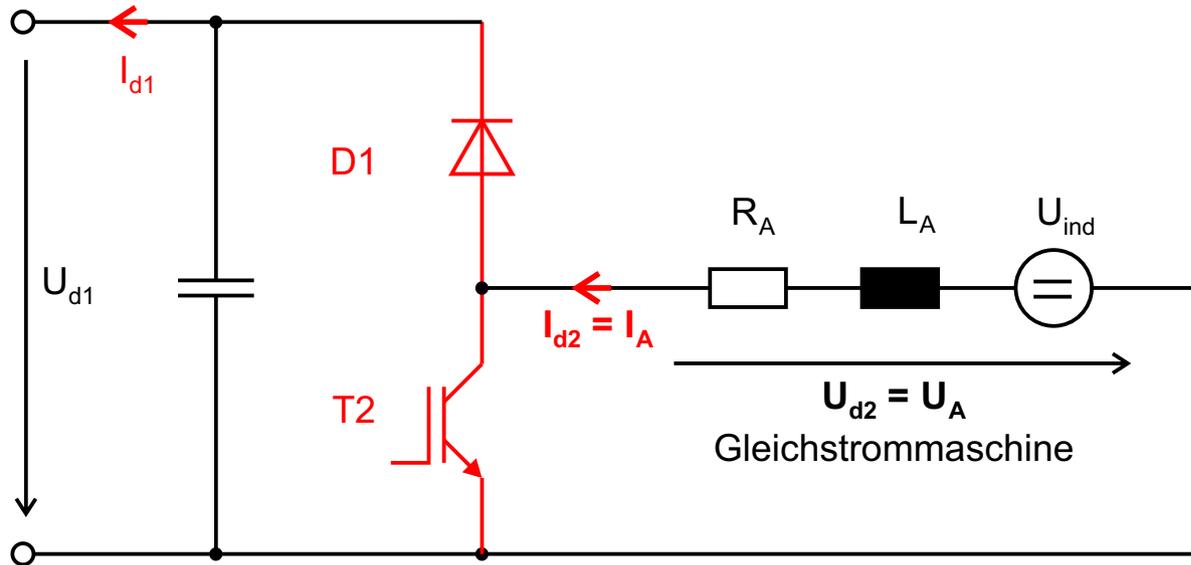


Achtung: Stromzählpfeil von  $I_{d2}$  zeigt nun nach links



### 3.4 Hochsetzsteller

#### Zeitverlauf Eingangsstrom



**D1 leitet, T2 sperrt:**

$$U_{d2} = U_{d1}$$

$I_{d2}$  fällt ( $U_{d1} > U_{ind}$ )

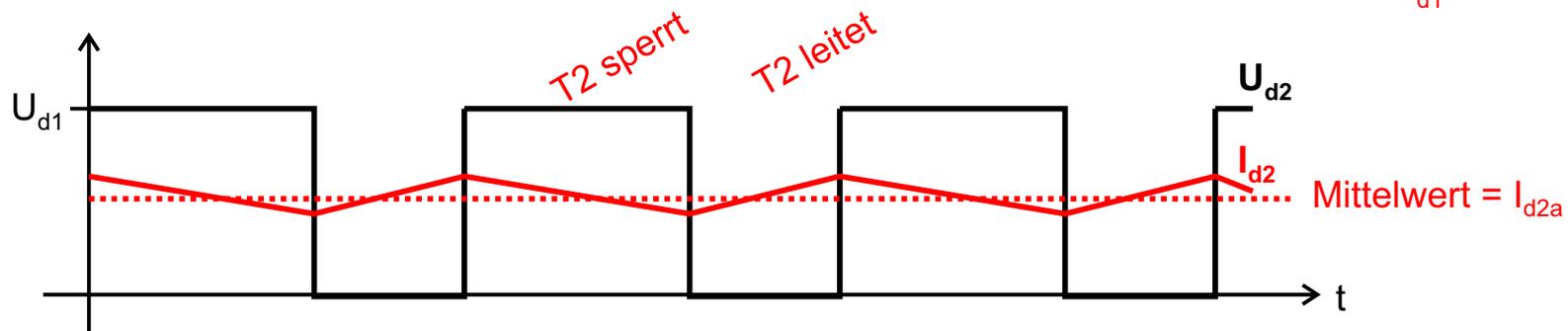
$$I_{d1} = I_{d2}$$

**D1 sperrt, T2 leitet:**

$$U_{d2} = 0$$

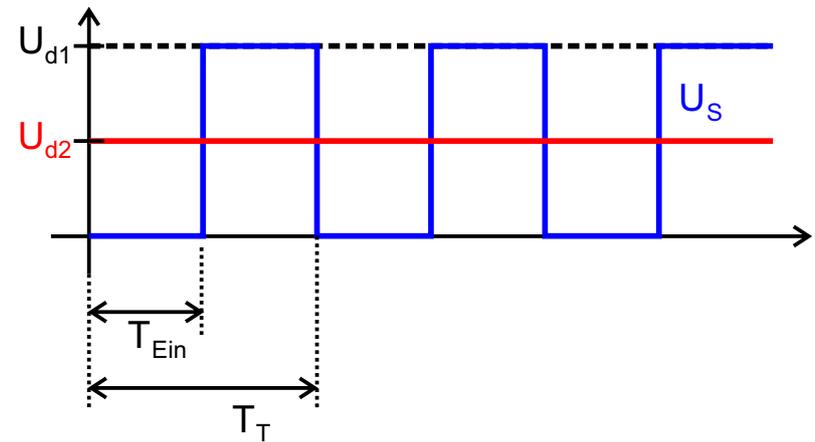
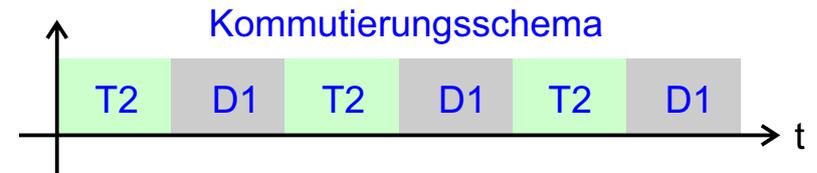
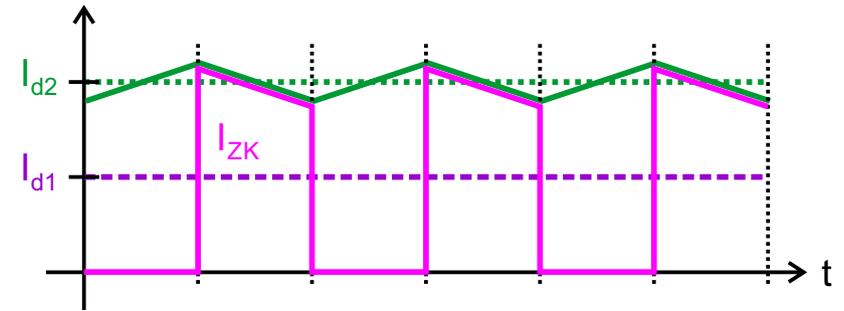
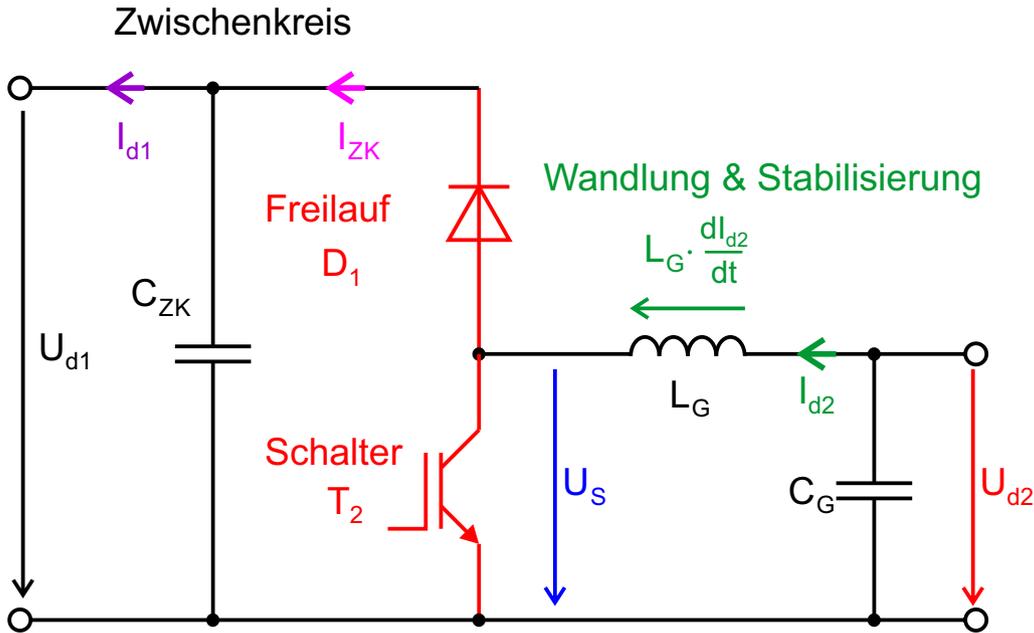
$I_{d2}$  steigt

$$I_{d1} = 0$$



### 3.4 Hochsetzsteller

#### Zusammenfassung



Ideales Verhalten:

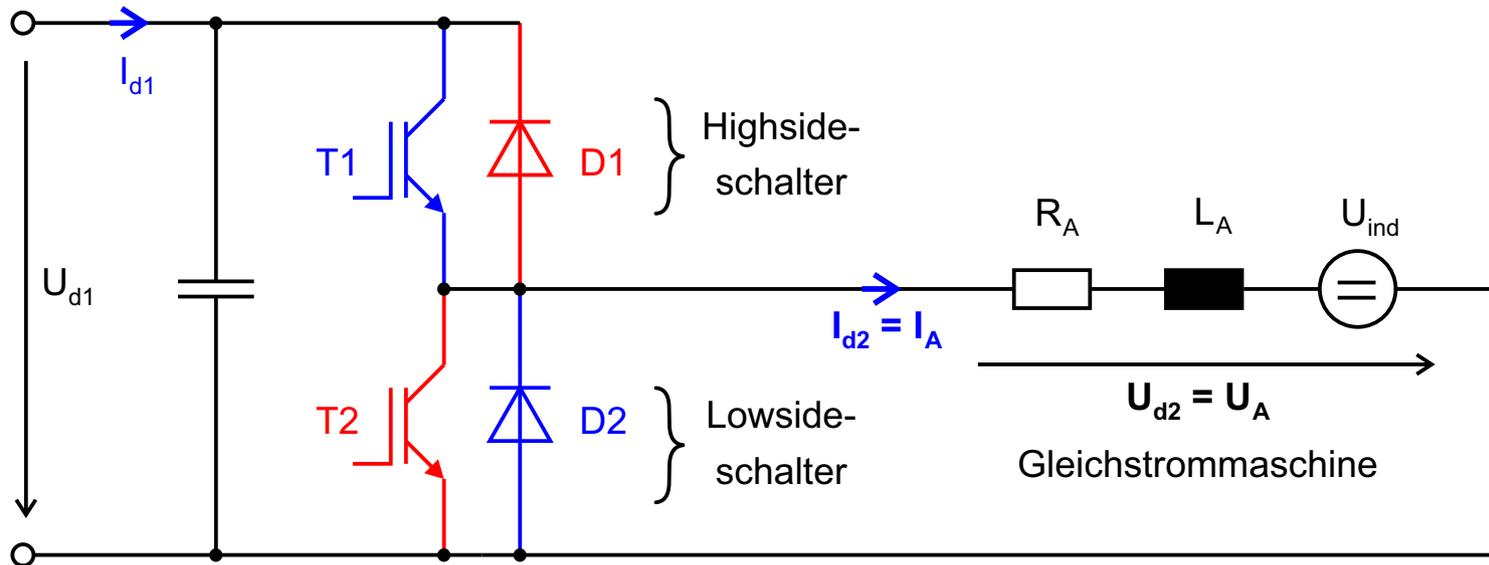
- $U_{d1}, I_{d1}$  und  $U_{d2}$  konstant
- real: Taktripple

Spannungsgleichung:

- T2=ein:  $0 = U_{d2} - L_G \cdot \frac{di_{d2}}{dt}$
- D1=ein:  $U_{d1} = U_{d2} - L_G \cdot \frac{di_{d2}}{dt}$

### 3.5 Halbbrücke

Tiefsetzer + Hochsetzer = Halbbrücke für 2-Quadrantenbetrieb



- Definition Stromzählpfeil und Aussteuergrad entsprechen Tiefsetzsteller :  $U_{d2a} = a \cdot U_{d1}$
- T1 und T2 alternierend geschaltet  $\Rightarrow$  Strom fließt vorzeichenunabhängig immer im eingeschalteten Zweig
- Die Stromrichtung stellt sich in Abhängigkeit des Aussteuergrades ein:

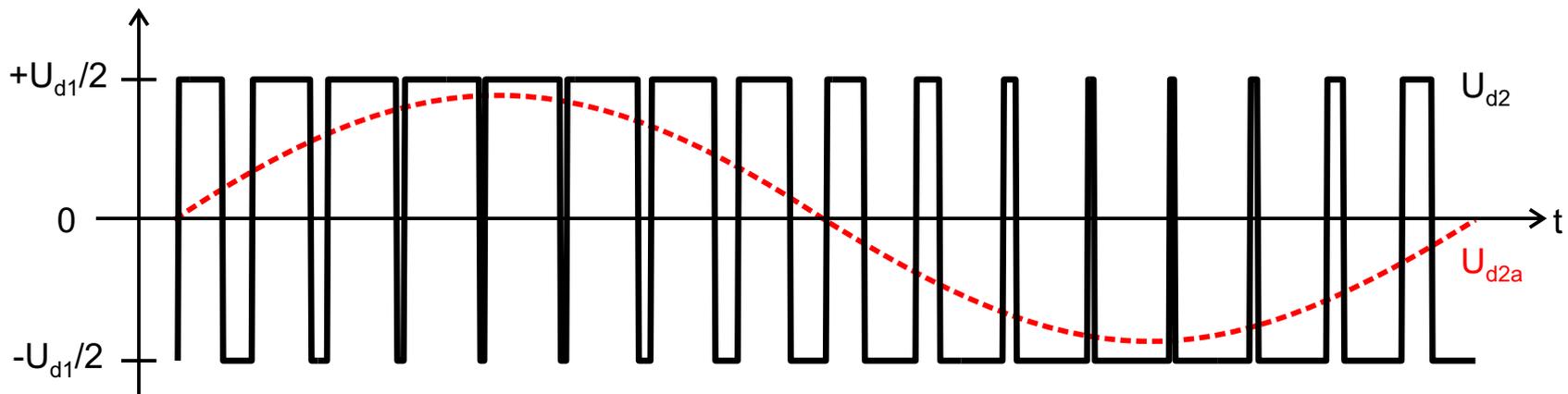
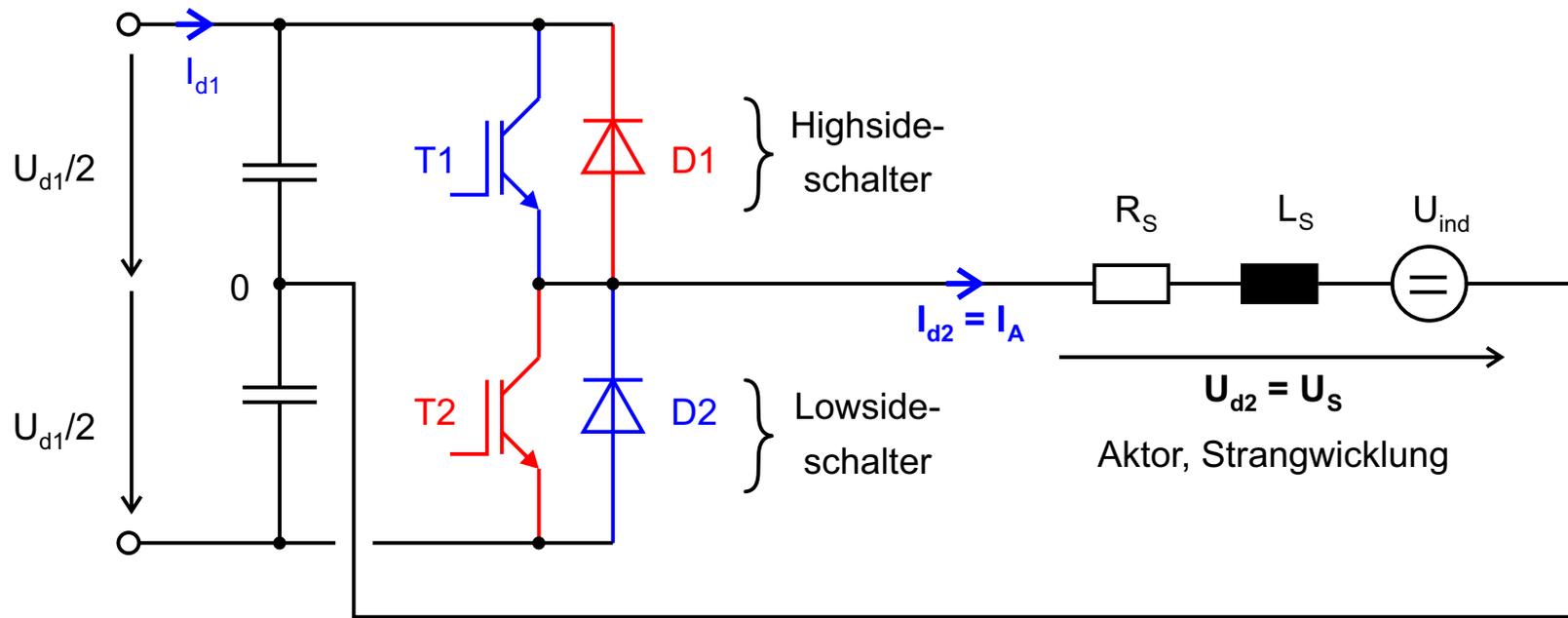
$U_{d2a} > U_{ind}$ :  $I_{d2a}$  positiv, Tiefsetzbetrieb  $\Rightarrow$  GM im Motorbetrieb

$U_{d2a} < U_{ind}$ :  $I_{d2a}$  negativ, Hochsetzbetrieb  $\Rightarrow$  GM im Generatorbetrieb

Index "a": Mittelwerte

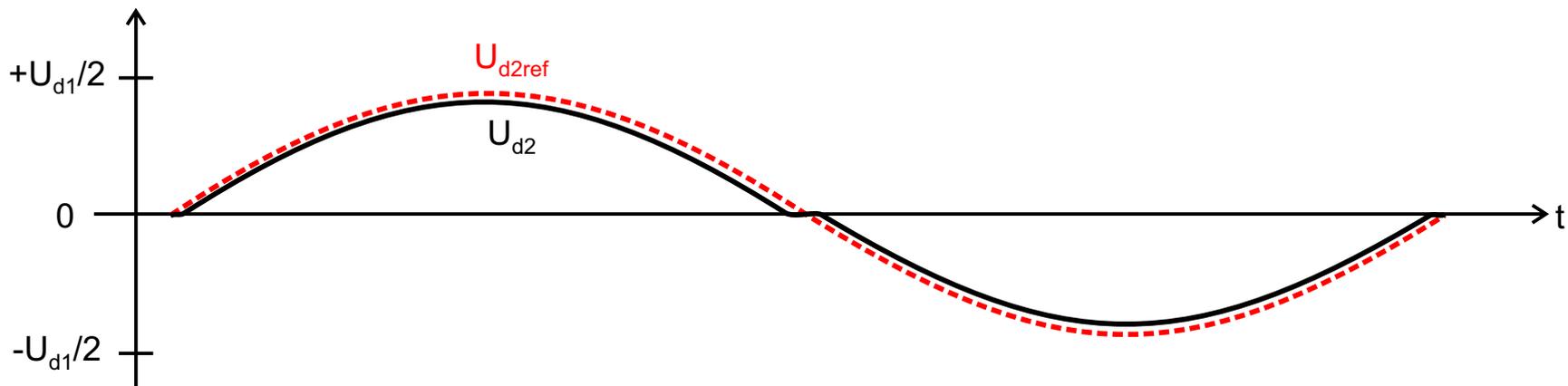
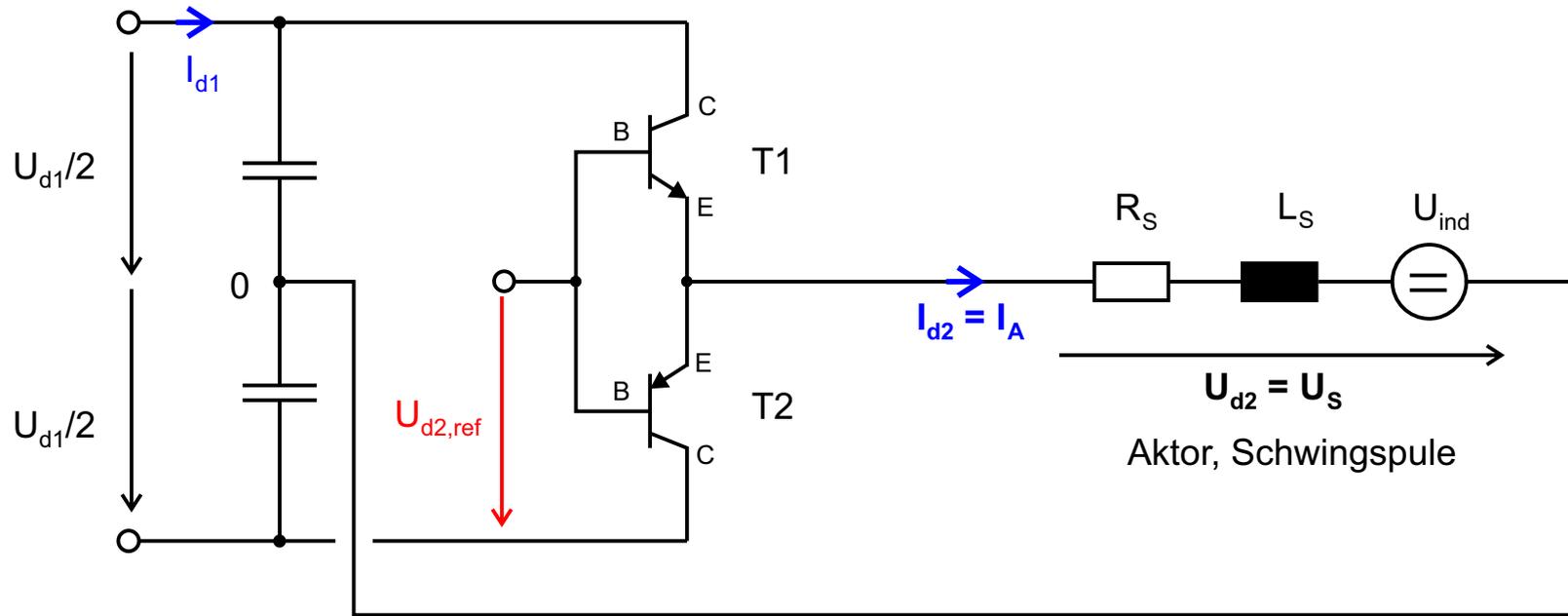
### 3.5 Halbbrücke

#### Halbbrücke als Wechselrichter



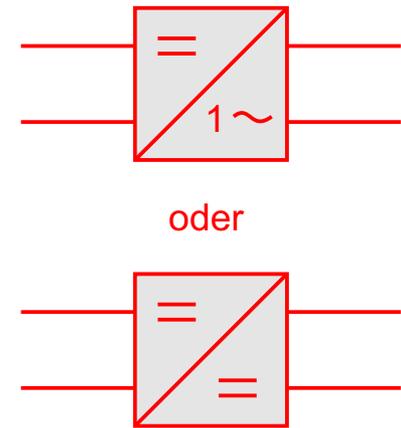
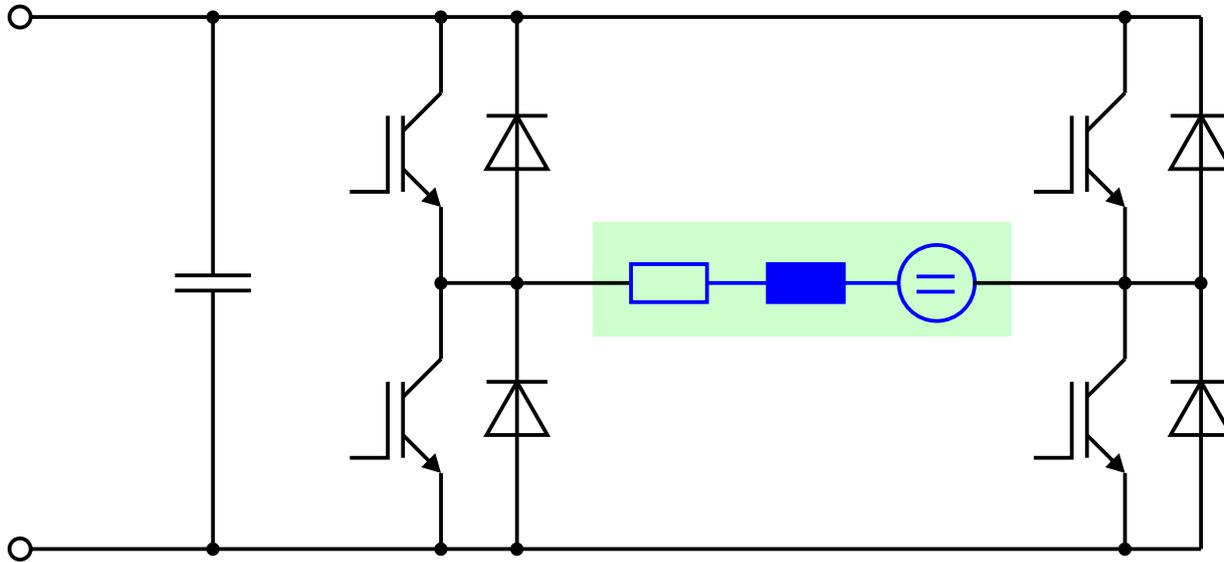
### 3.5 Halbbrücke

#### Gegenbeispiel: Linearverstärker



## 3.6 Abgeleitete Topologien

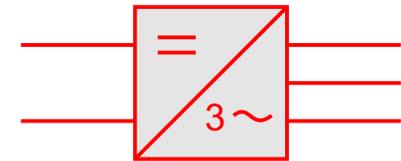
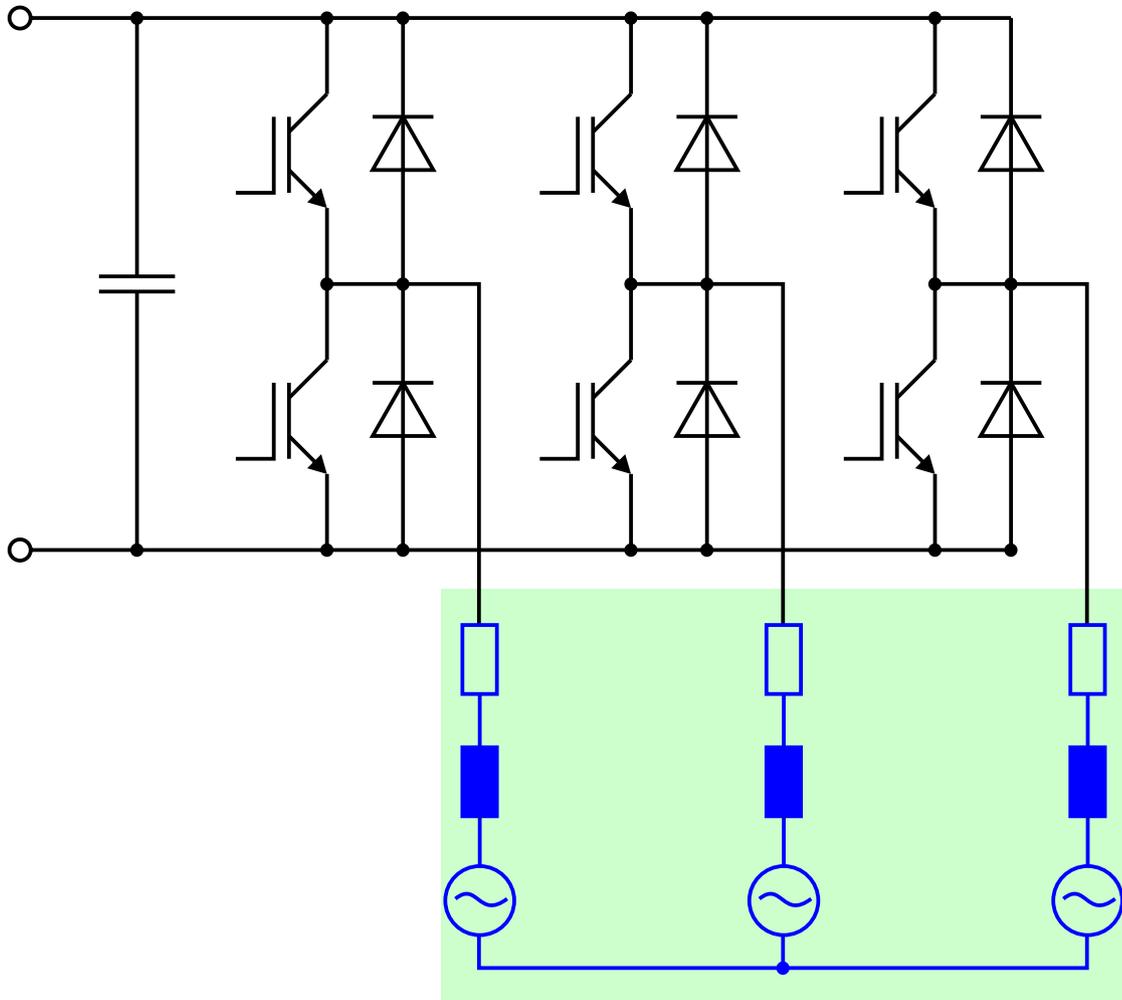
### 2 Halbbrücken: H-Brücke



- 4-Quadrantensteller Gleichstrommaschine
- Wechselrichter 1-phasig
- Ansteuerglied Aktuator
- (induktive Energieübertragung)

## 3.6 Abgeleitete Topologien

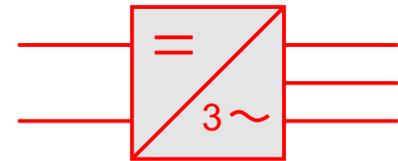
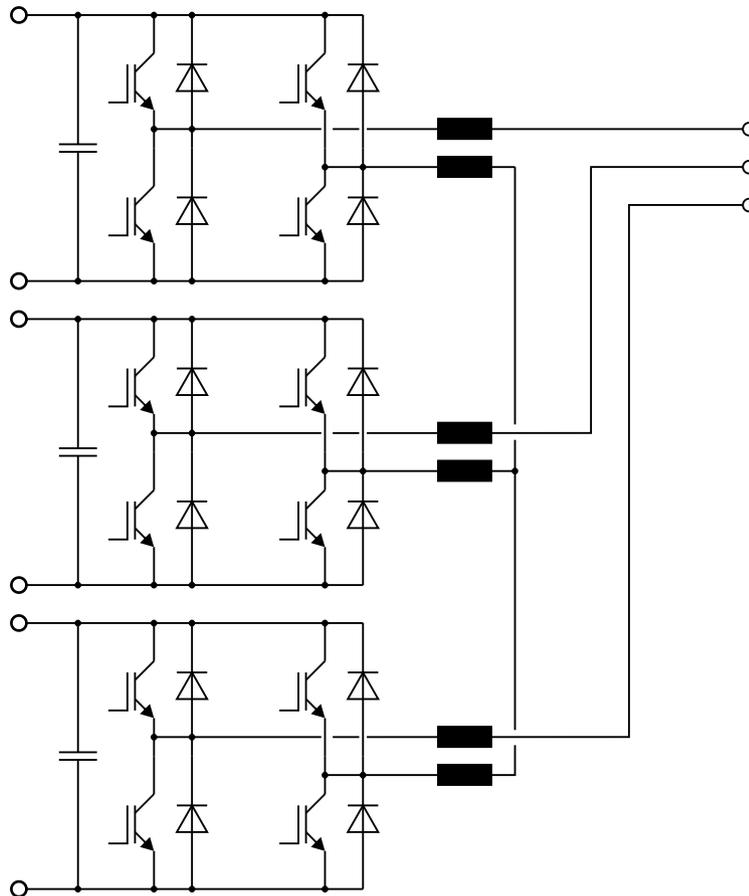
### 3 Halbbrücken: Drehstromwechselrichter



- Maschinenwechselrichter
- Rückseumrichter Netz
- Blindleistungskompensation

## 3.6 Abgeleitete Topologien

### 3 parallele H-Brücken für Drehstromanwendungen



- z.B. Photovoltaik-Wechselrichter
- neuartige Maschinen/Aktoren mit freier Stromkurvenform (Phasen einzeln gespeist)

### 3.6 Abgeleitete Topologien

???

