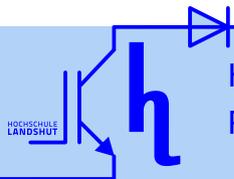


Leistungselektronik

Kapitel 2: Grundlagen netzgeführte 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 2: Grundlagen netzgeführte Stromrichter

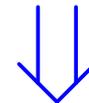
- 2.1 Einpuls-Mittelpunktschaltung (M1)
- 2.2 Zweipuls-Brückenschaltung (B2)
- 2.3 Dreipuls-Mittelpunktschaltung (M3)
- 2.4 Netzurückwirkung und Kommutierung
- 2.5 Sechspuls-Brückenschaltung (B6)
- 2.6 Einsatzgebiete

- 2.7 Wechselstromsteller
- 2.8 Gleichrichter mit PFC

ungesteuerte
& gesteuerte

**Gleichricht-
schaltungen**

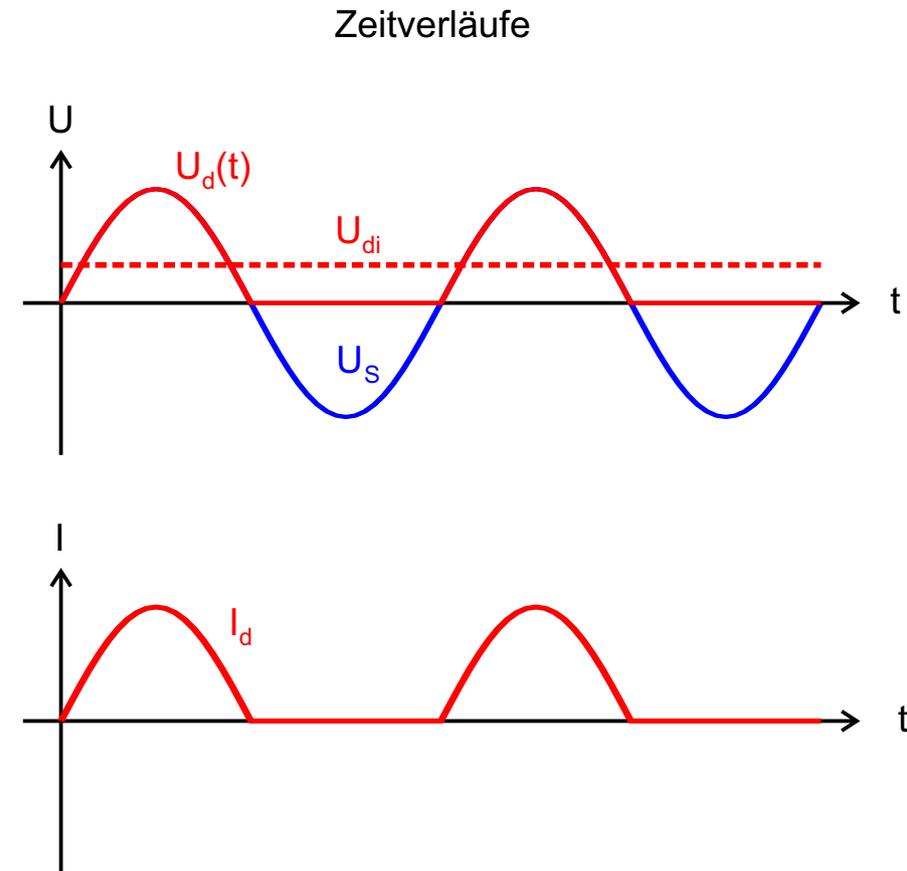
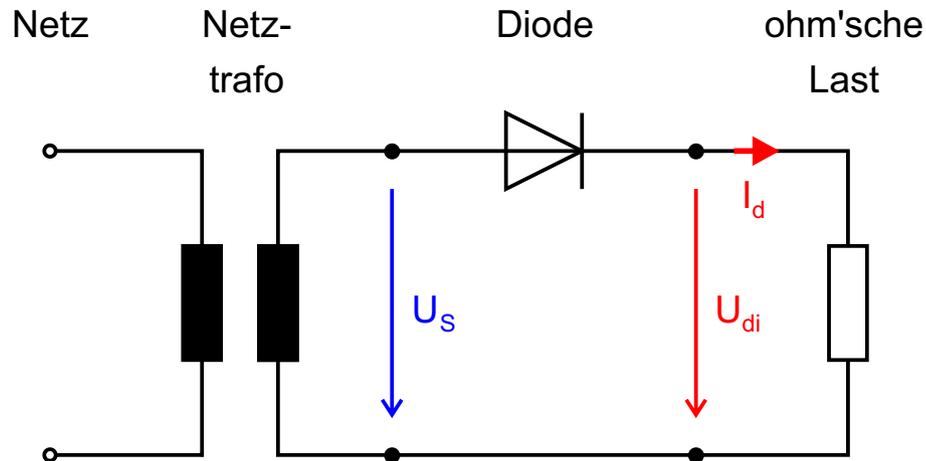
"rectifier"



M1, M3 und B6:
Vertiefung im Praktikum,
Versuche 1 bis 3

2.1 Einpuls-Mittelpunktschaltung (M1u)

Ungesteuerte Variante: Halbleiterventil = Diode



Begriffsdefinitionen:

- U_s : Effektivwert Strangspannung
- $U_d(t)$: Zeitverlauf Ausgangsspannung
- U_{di} : Mittelwert Ausgangsspannung
- index "d": DC-Link / DC-Seite / Zwischenkreis
- index "i": ideell / idealisierte Stromrichtertheorie
- "M1u": uncontrolled

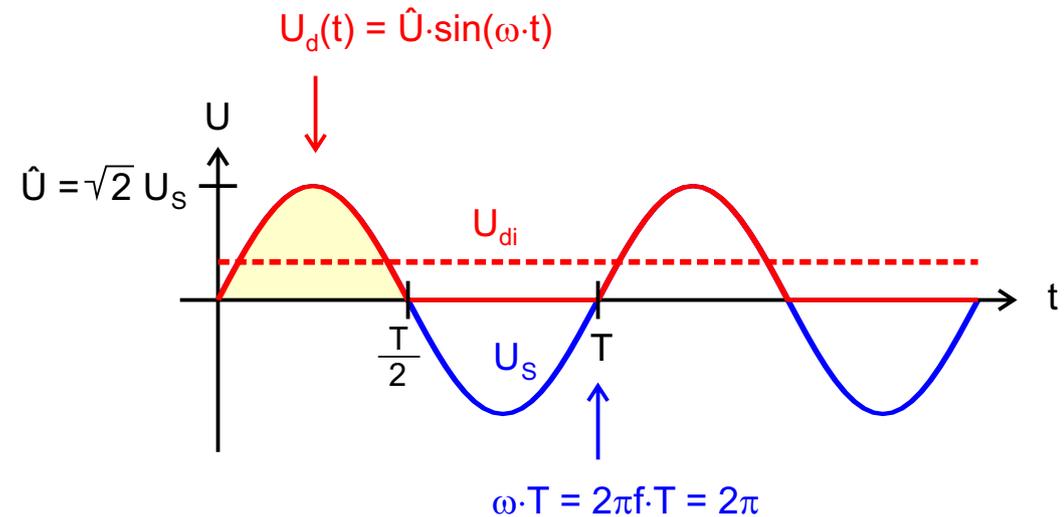
2.1 Einpuls-Mittelpunktschaltung (M1u)

Ungesteuerte Variante: Berechnung Kennwerte

Berechnung Mittelwert U_{di} :

$$\begin{aligned} U_{di} &= \frac{1}{T} \int_0^T U_d(t) dt = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{T/2} \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t) dt \\ &= \frac{\omega}{2\pi} \left[-\frac{\hat{U}}{\omega} \cdot \cos(\omega \cdot t) \right]_0^{\pi/\omega} = \frac{\omega}{2\pi} \cdot \frac{2 \cdot \hat{U}}{\omega} = \frac{\hat{U}}{\pi} \end{aligned}$$

$$U_{di} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_S \approx 0.45 \cdot U_S$$



Berechnung Effektivwert $U_{di,eff}$:

$$U_{di,eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_d^2(t) dt} = \dots = \frac{\hat{U}}{2}$$

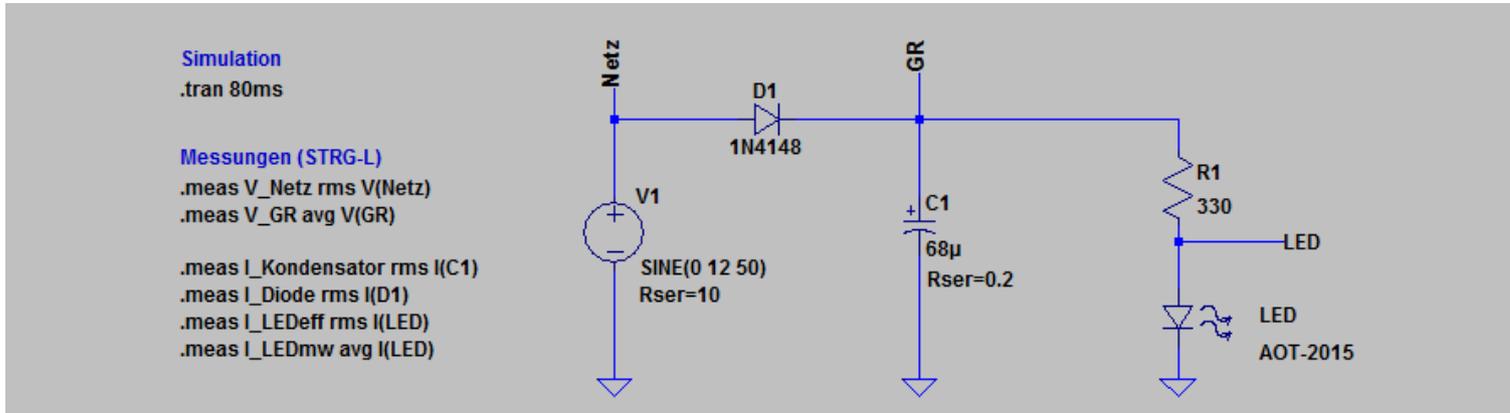
$$U_{di,eff} = \frac{\sqrt{2}}{2} U_S \approx 0.71 \cdot U_S$$

Definition Welligkeit:

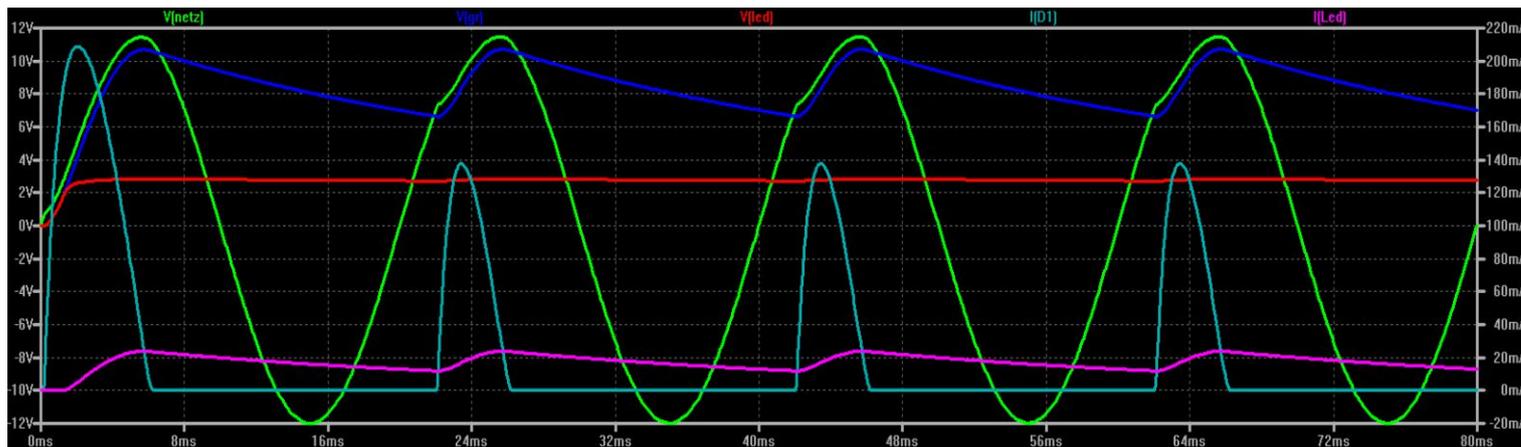
$$w_U = \sqrt{\left(\frac{U_{eff}}{U_{MW}} \right)^2 - 1} = \sqrt{\left(\frac{U_{di,eff}}{U_{di}} \right)^2 - 1} = 1.21 \text{ (M1u)}$$

2.1 Einpuls-Mittelpunktschaltung (M1u)

Kapazitive Last: Einsatz im Kleinsignalbereich



Simulation mit
LTspice: **M1u.asc**



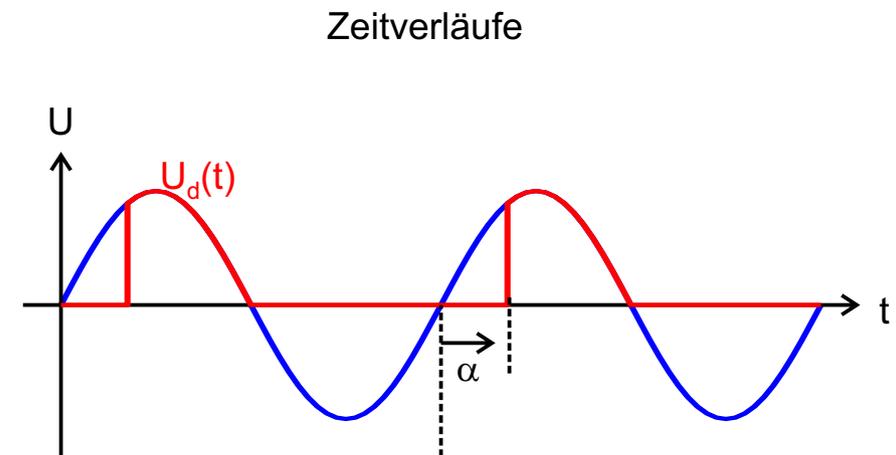
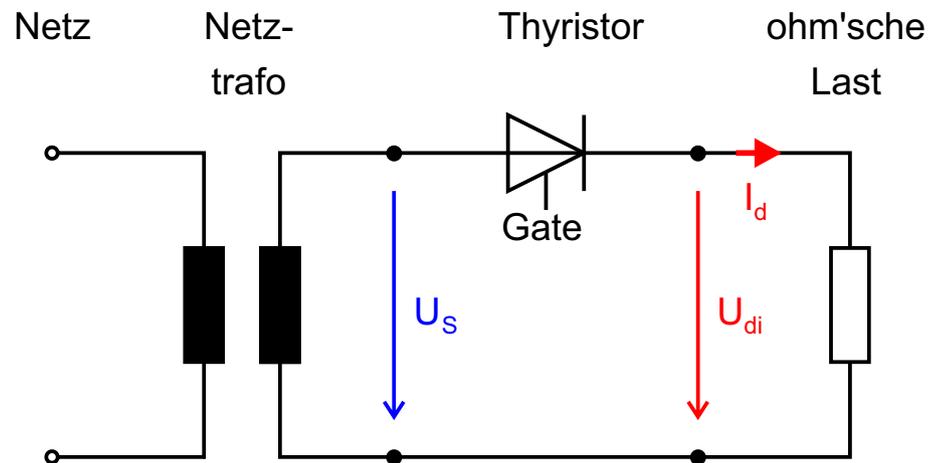
- Strompulse:
- Lückbetrieb
 - nur pos. Halbwelle

Gleichrichtspannung:
Mittelwert > ideeller Wert

Simulationstool: LTspice Ersteller Simulationsmodell: A. Kleimaier

2.1 Einpuls-Mittelpunktschaltung (M1c)

Gesteuerte Variante: Halbleiterventil = Thyristor



natürlicher
Zündzeitpunkt
(vgl. Diode)

α : Zündwinkel / Steuerwinkel

Steuergesetz:

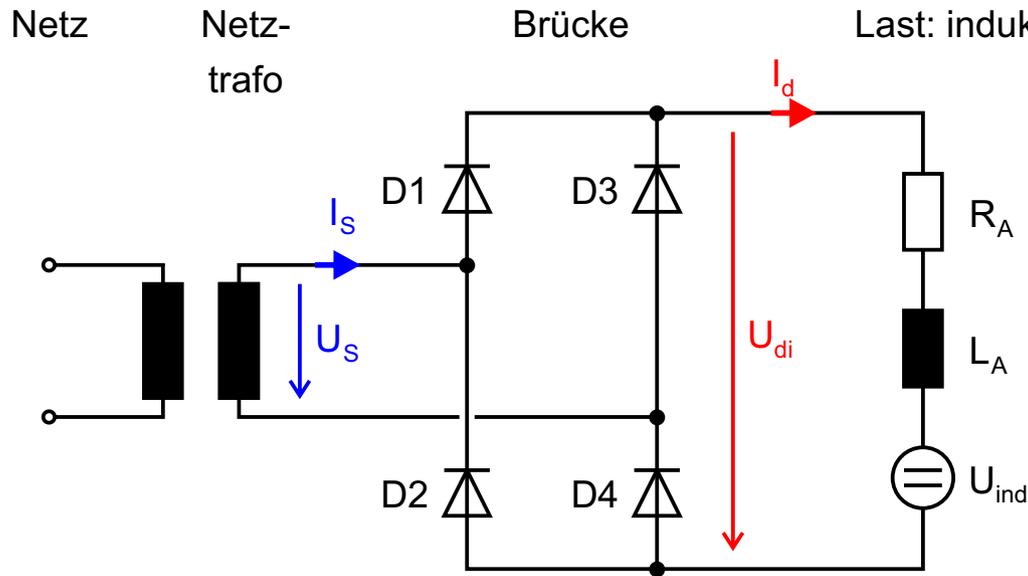
$$U_{di\alpha} = U_{di} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

Besonderheiten Thyristor

- Einschalten über Gate "zünden"
- Ein-Zustand: Verhalten = Diode
- Ausschalten: Stromnulldurchgang
- Gateansteuerung: Steuersatz für Zündwinkel
- "M1c": controlled

2.2 Zweipuls-Brückenschaltung (B2u)

Ungesteuerte Variante: Halbleiterventile = Dioden

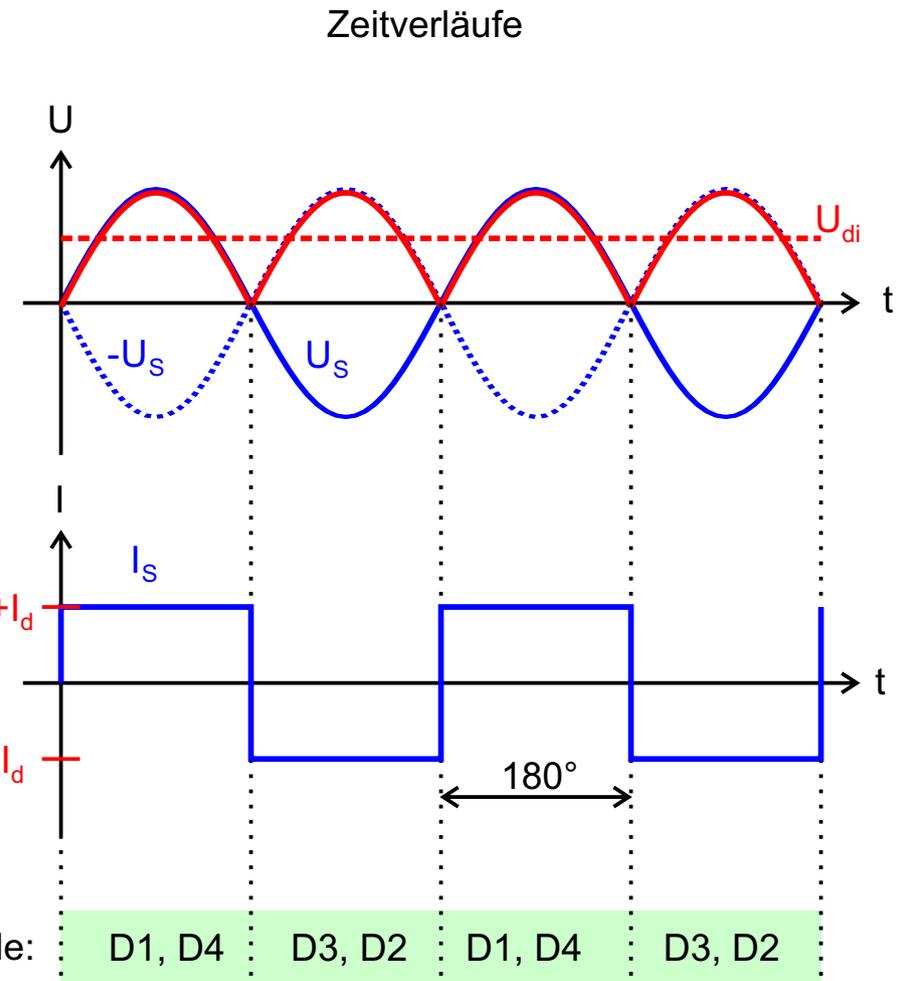


$$U_{di} = 0.90 \cdot U_S$$

L_L ausreichend groß:

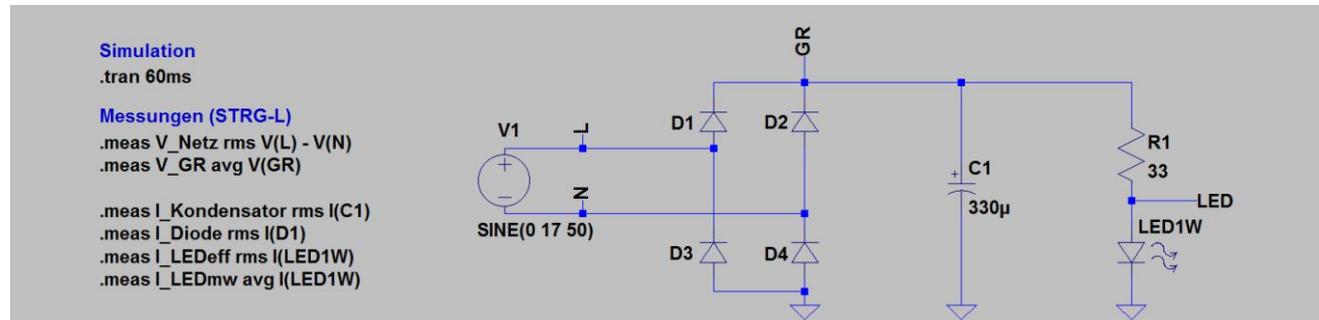
$$I_d \approx \text{const}$$

$$U_{di,eff} = U_S$$

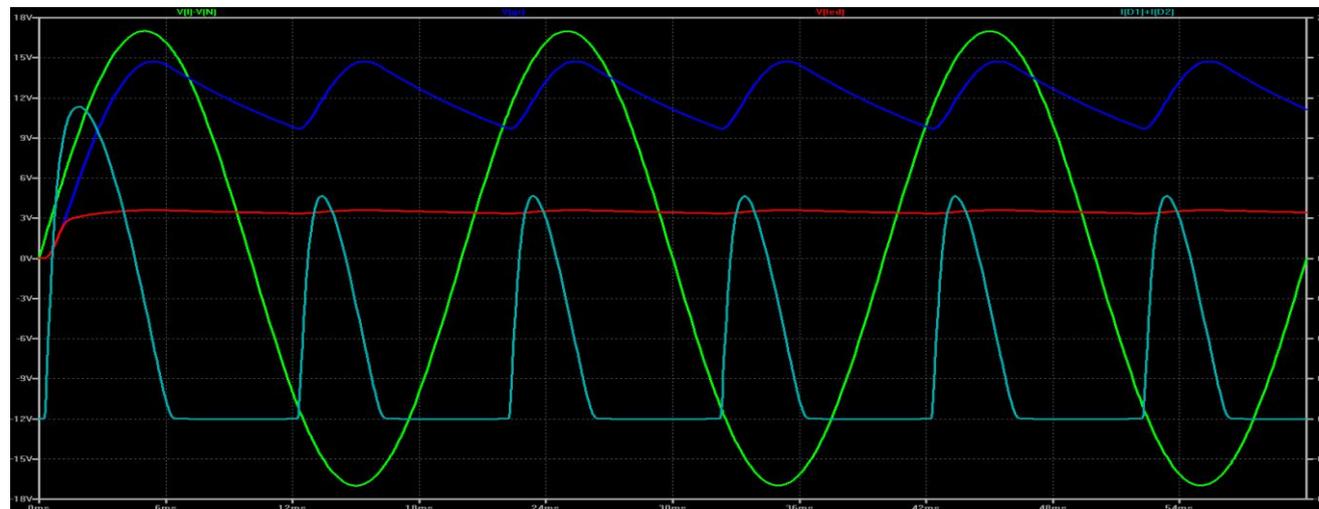


2.2 Zweipuls-Brückenschaltung (B2u)

Kapazitive Last: Vollbrücke als Gleichrichter



Simulation mit
LTspice: **B2u.asc**



Strompulse:

- Lückbetrieb
- beide Halbwellen

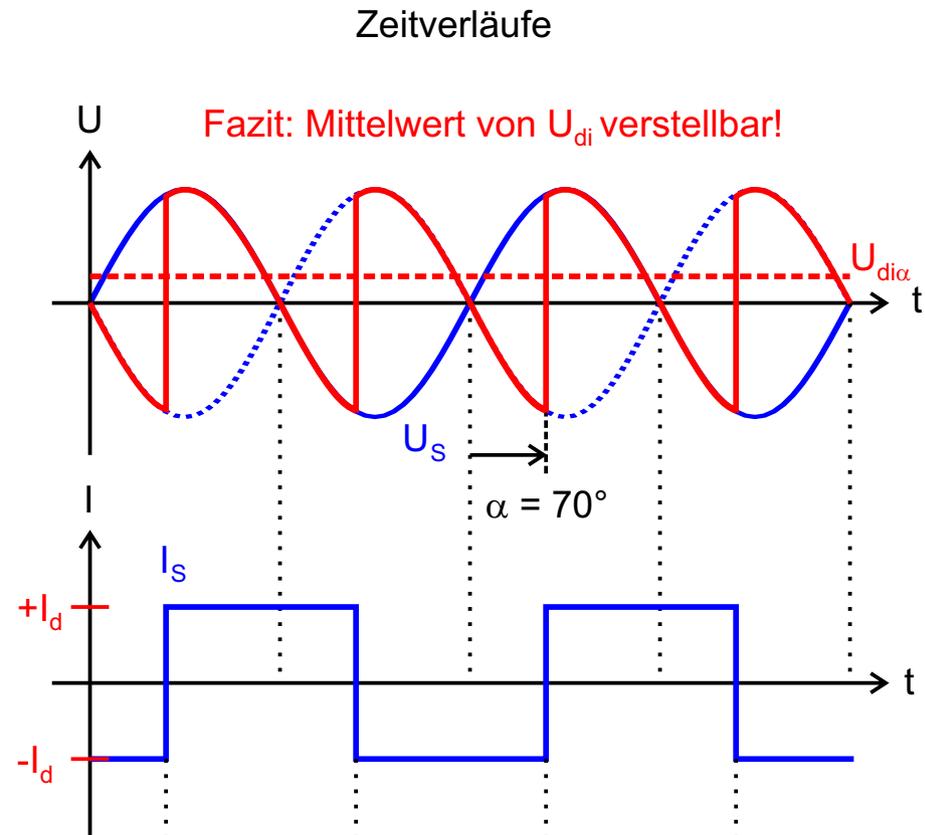
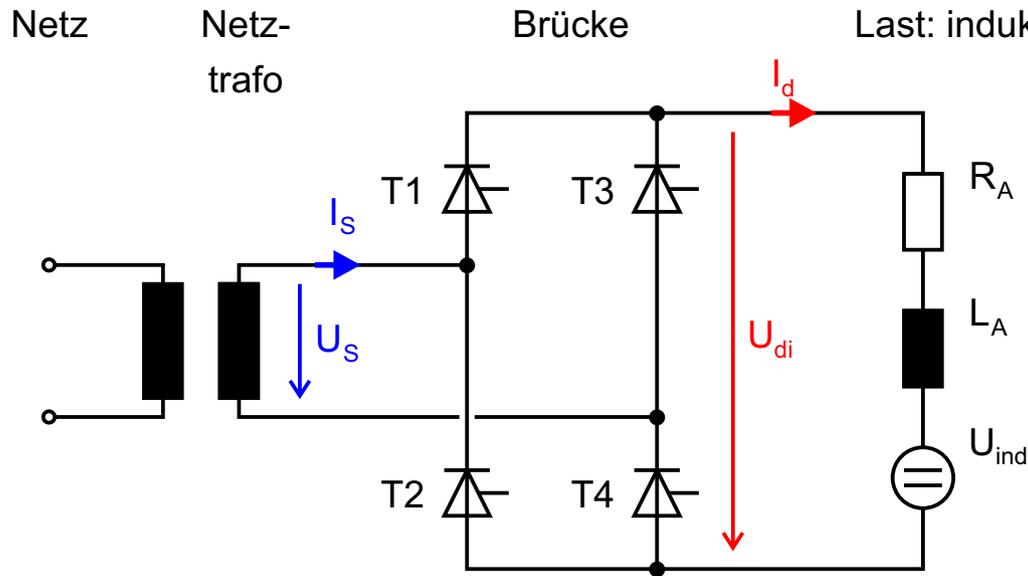
Gleichrichterspannung:

Mittelwert > ideeller Wert

Simulationstool: LTspice Ersteller Simulationsmodell: A. Kleimaier

2.2 Zweipuls-Brückenschaltung (B2c)

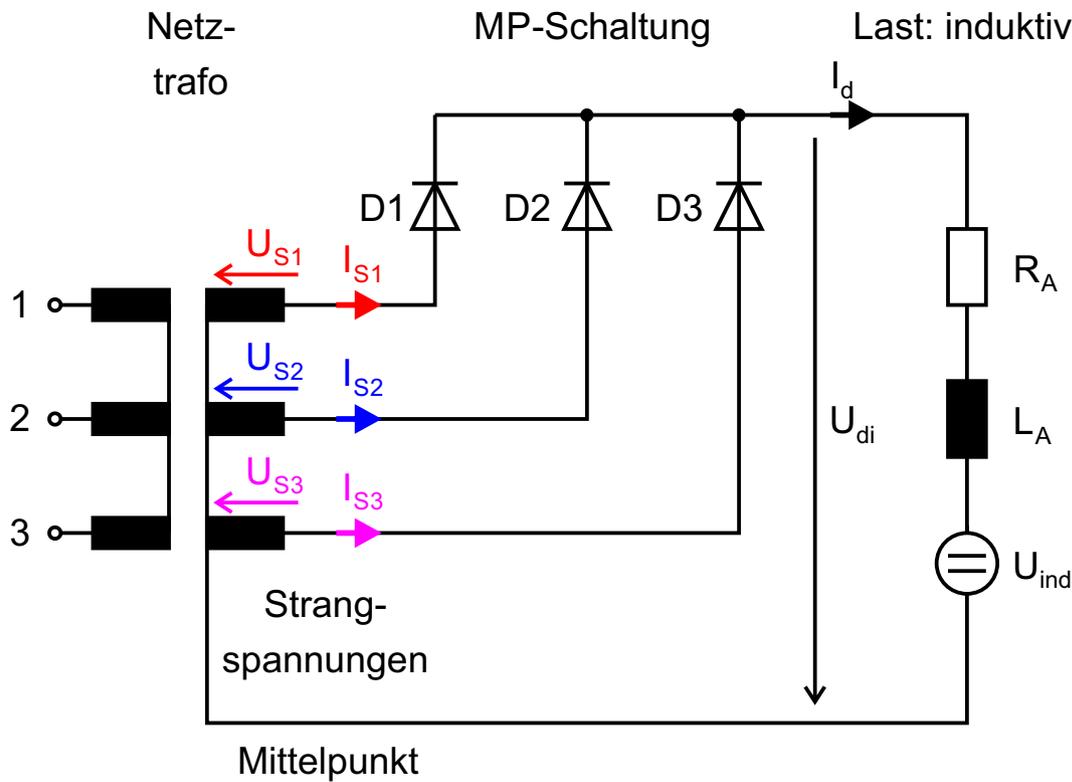
Gesteuerte Variante: Halbleiterventile = Thyristoren



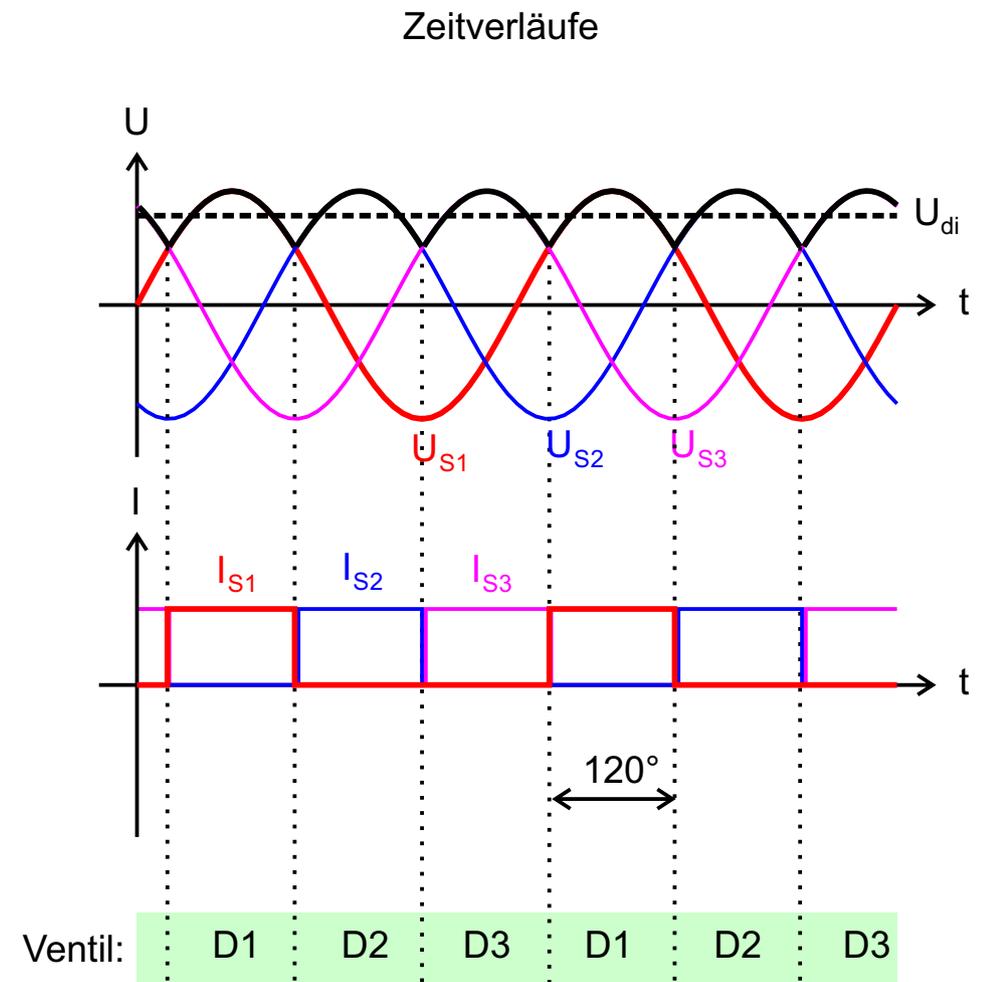
Diagonale: T1, T4 T3, T2 T1, T4 T3, T2

2.3 Dreipuls-Mittelpunktschaltung (M3u)

Ungesteuerte Variante: Halbleiterventile = Dioden

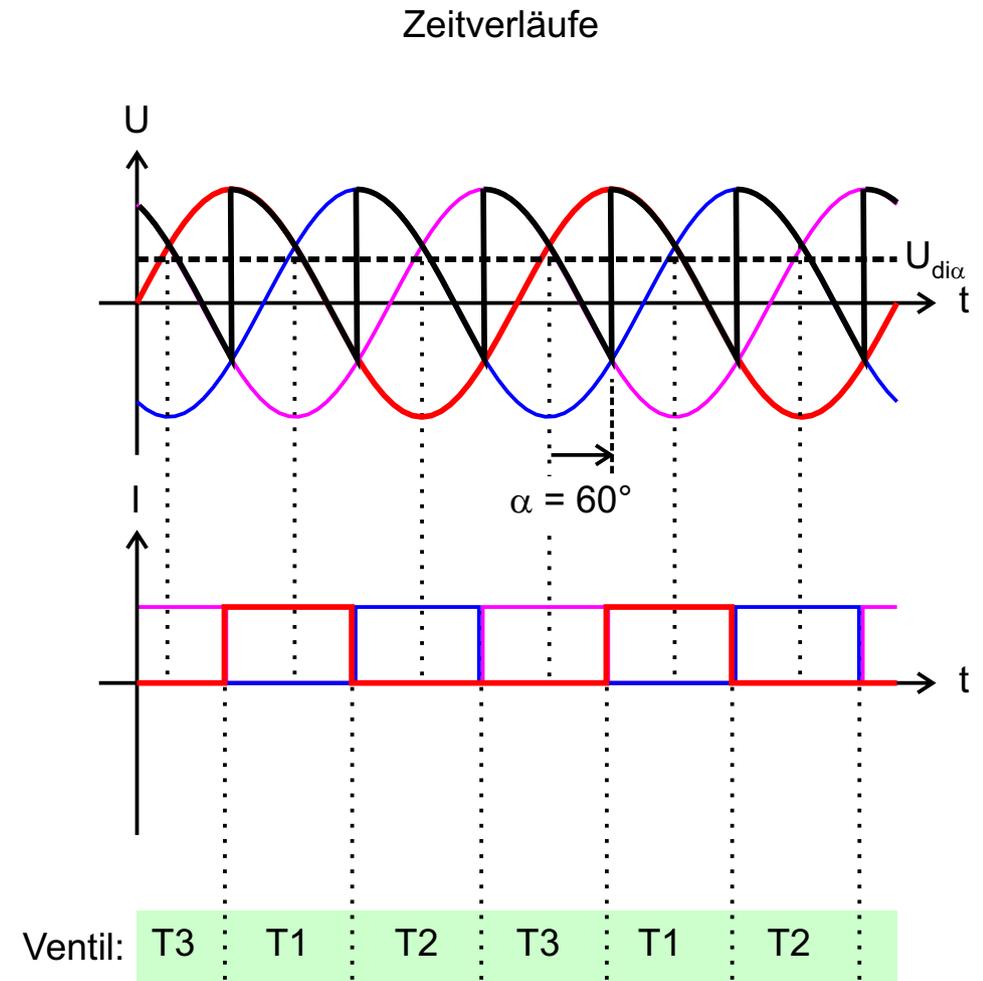
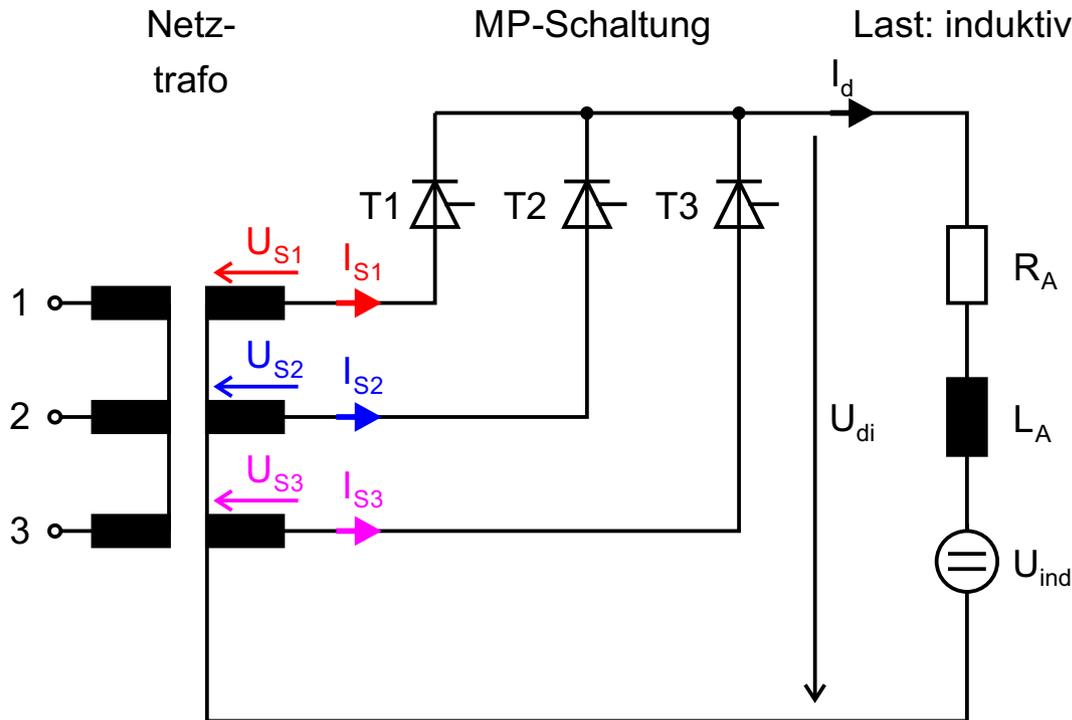


Glättung durch $L_A \Rightarrow I_d \approx \text{const.}$



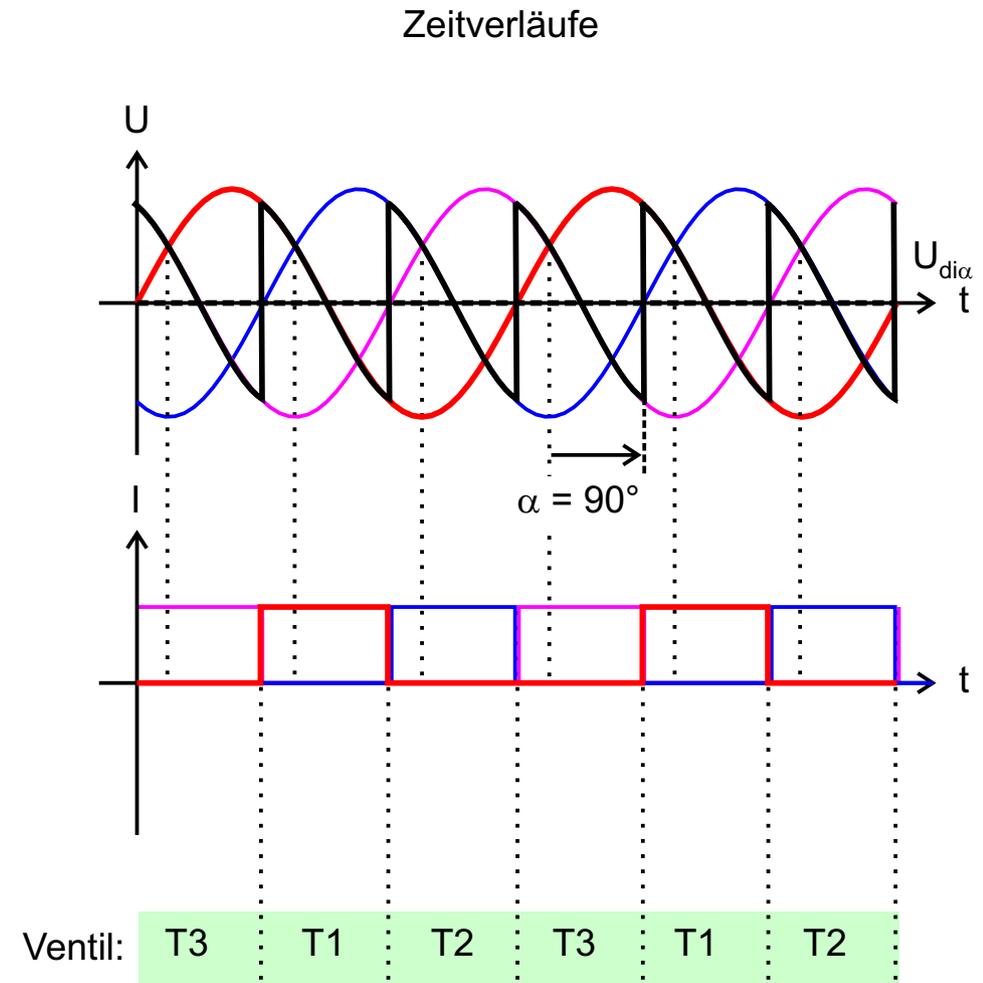
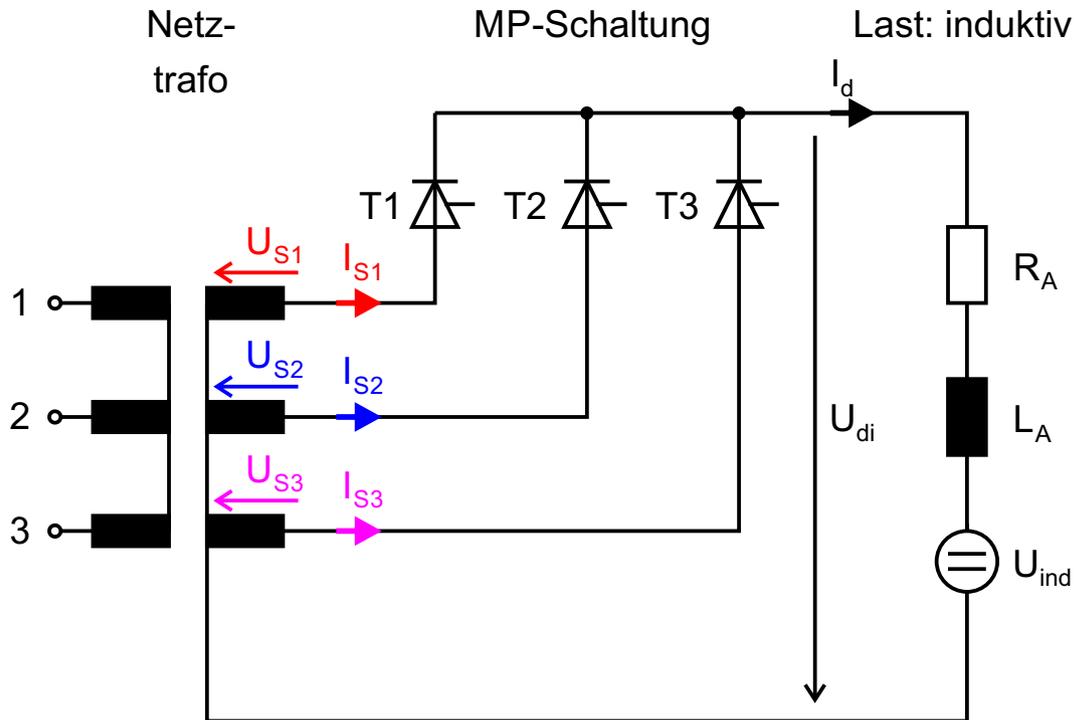
2.3 Dreipuls-Mittelpunktschaltung (M3c)

Gesteuerte Variante: Halbleiterventile = Thyristoren



2.3 Dreipuls-Mittelpunktschaltung (M3c)

Gesteuerte Variante: Steuerwinkel = 90°



2.3 Dreipuls-Mittelpunktschaltung (M3c)

Gesteuerte Variante: Steuergesetz

Vollausst.: $\alpha = 0$

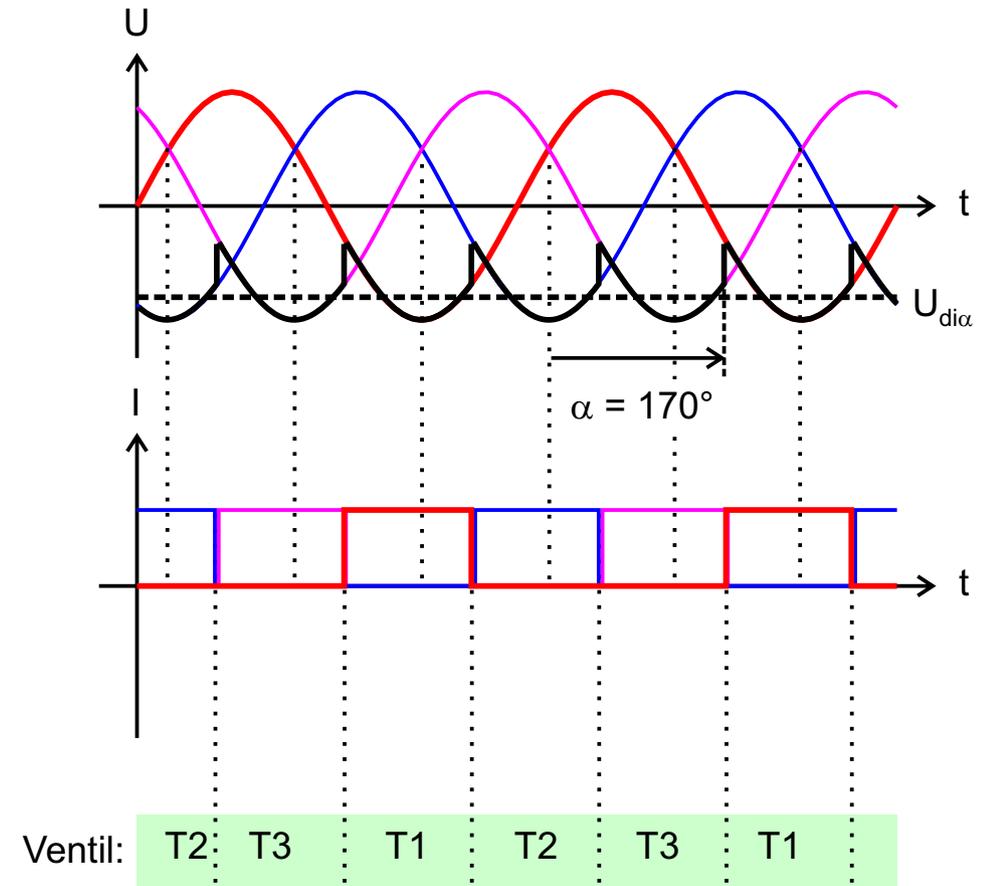
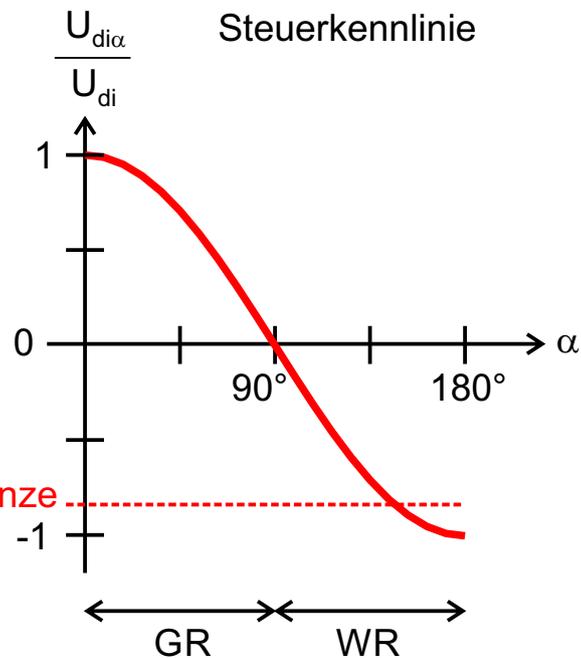
Steuergesetz

Zeitverläufe

$$U_{di} = 1.17 \cdot U_S$$

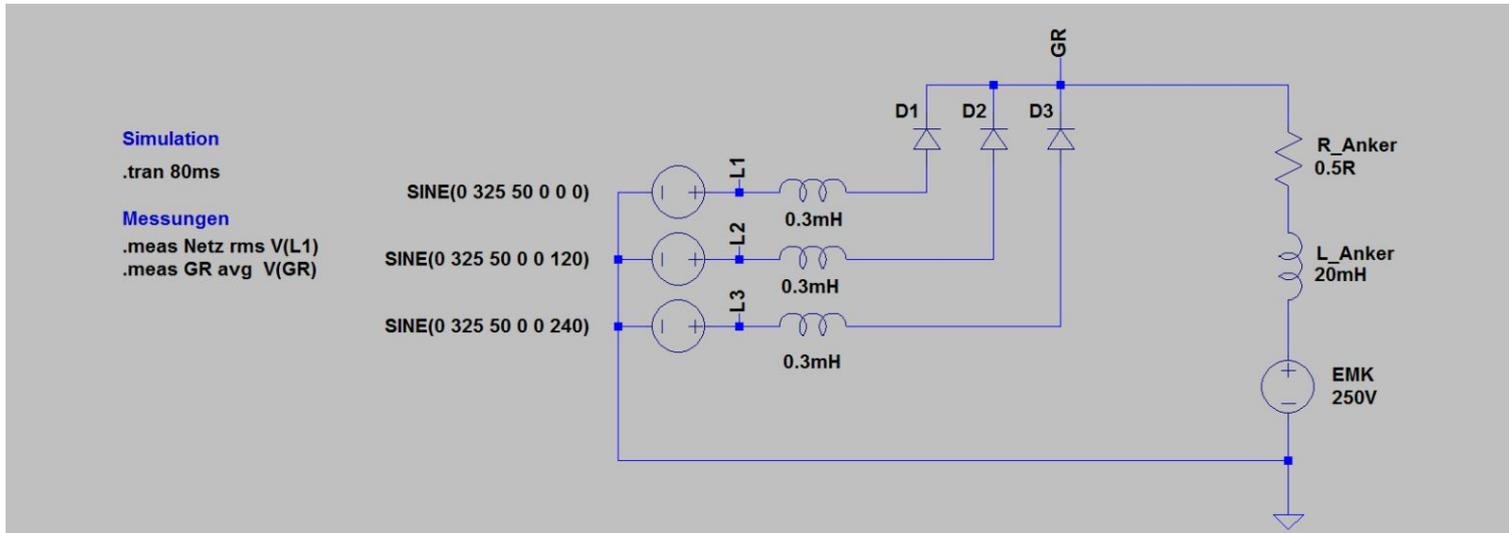
$$U_{di\alpha} = U_{di} \cdot \cos \alpha$$

$$U_{di,eff} = 1.19 \cdot U_S$$

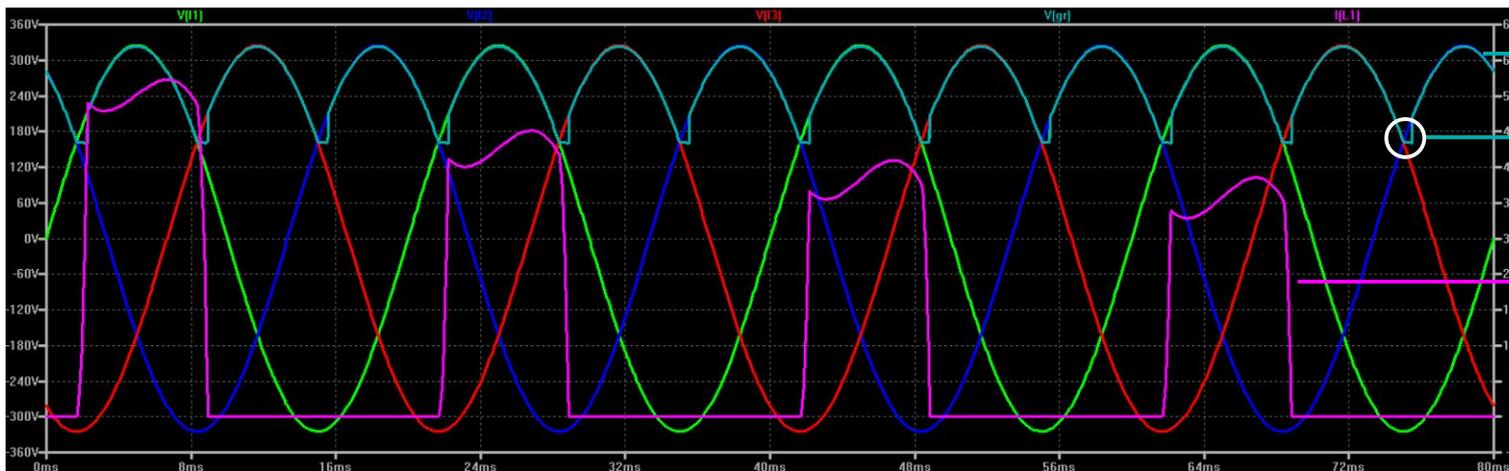


2.3 Dreipuls-Mittelpunktschaltung (M3c)

Simulation bei Vollaussteuerung (M3c = M3u)



Simulation mit
LTspice: **M3u.asc**

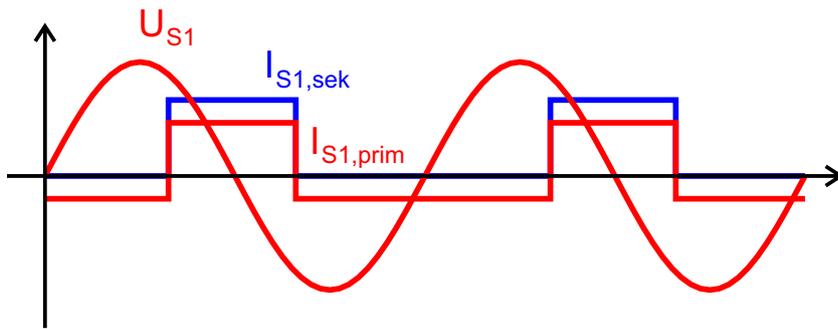


Simulationstool: LTspice Ersteller Simulationsmodell: A. Kleimaier

2.4 Netzurückwirkung und Kommutierung (M3c)

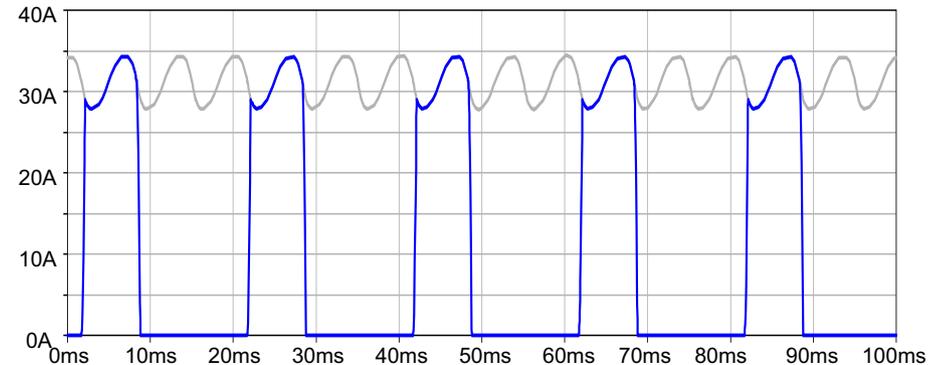
Netzurückwirkung

- Netzspannung und -strom in Strang 1 bei $\alpha = 90^\circ$

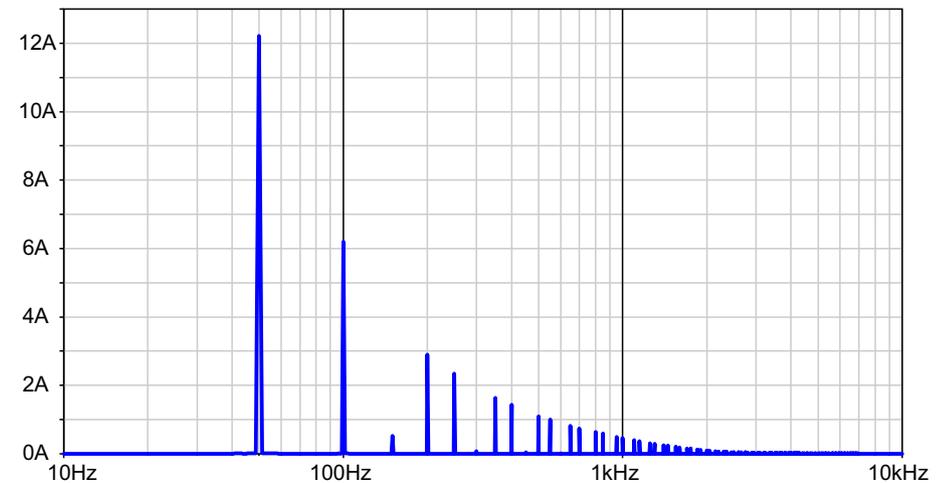


- Trafo: Gleichanteil von I_S verschwindet primärseitig
- "Steuerblindleistung":
Steuerung von $U_{di\alpha}$ durch Verschieben von I_S ,
d.h. über den $\cos \varphi$ der Grundschwingung
- "Verzerrungsleistung":
Ströme nicht sinusförmig, Oberwellen

Beispielsimulation

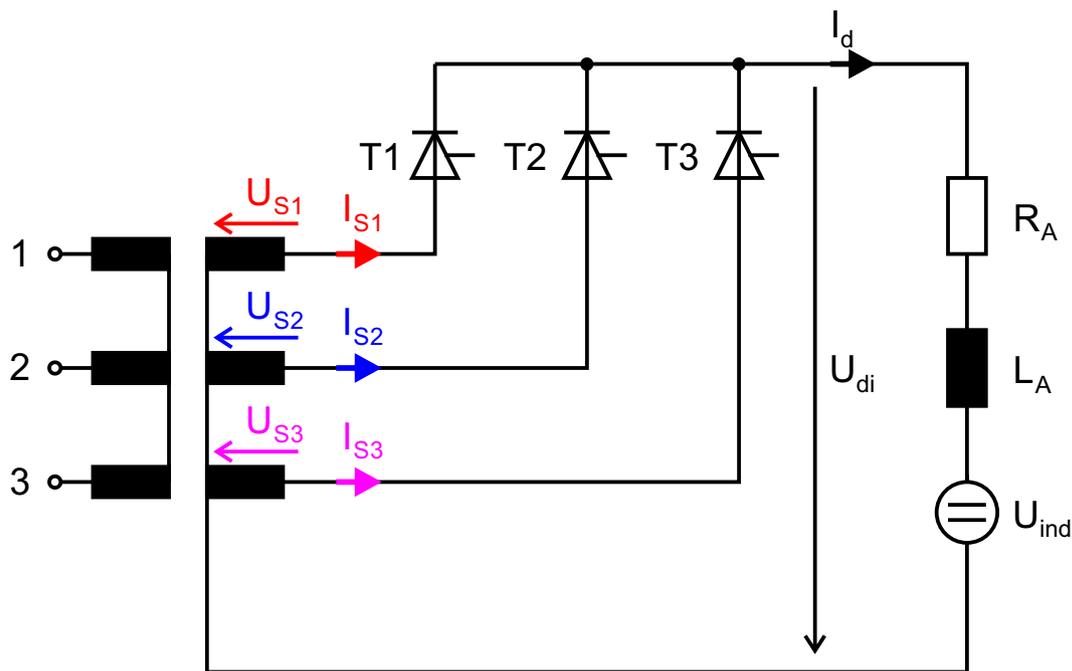


fft Strangstrom sek.



2.4 Netzurückwirkung und Kommutierung (M3c)

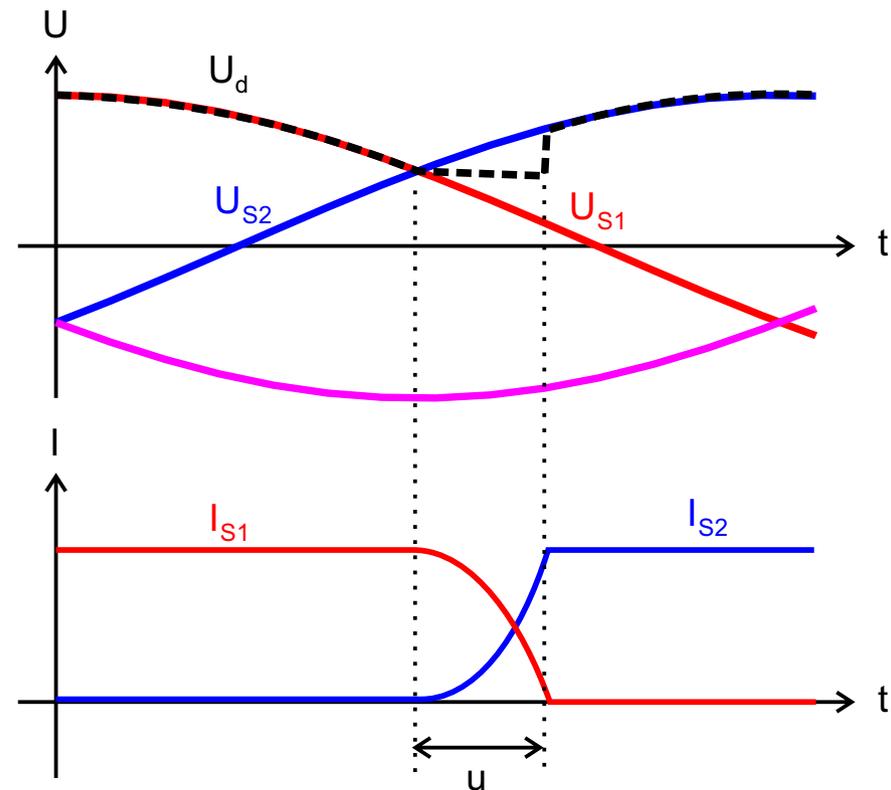
Kommutierung



Bsp. Kommutierung von T1 nach T2:

- Beide Ventile eingeschaltet
- Kurzschluss Phase 1-2: I_{S1} fällt, I_{S2} steigt

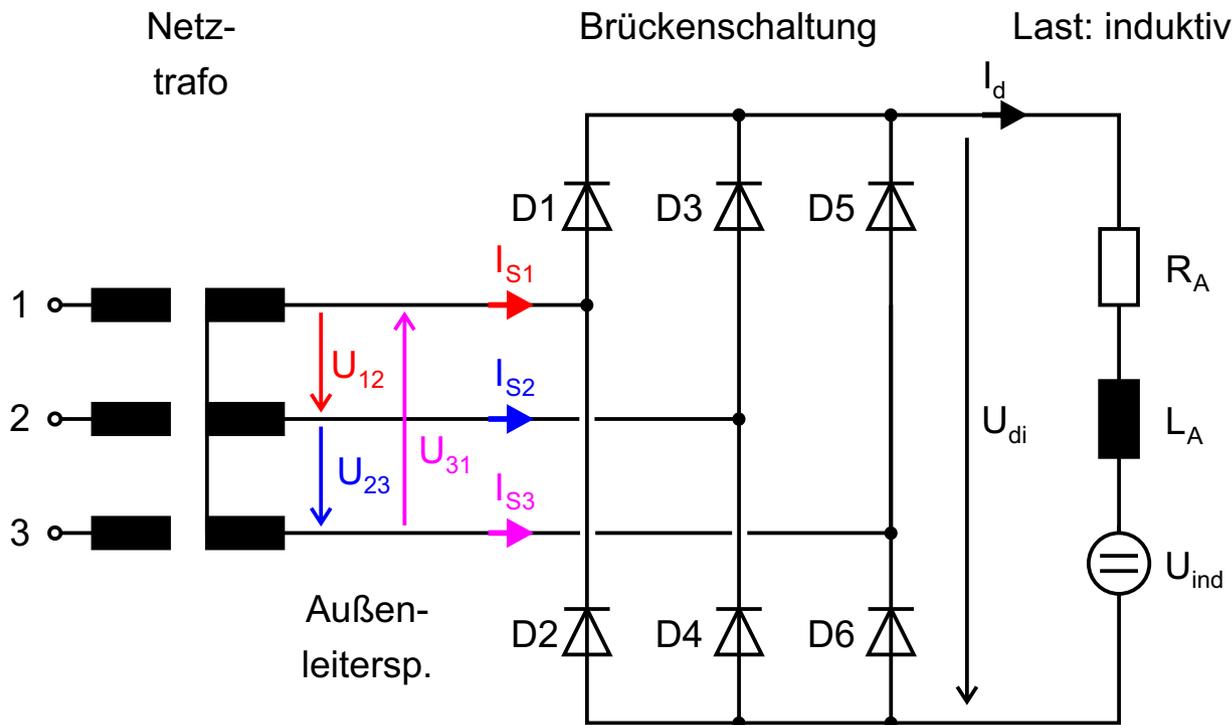
Zoom: Strom kommutiert von T1 auf T2



Überlappungswinkel "u"

2.5 Sechspuls-Brückenschaltung (B6u)

zwei M3-Schaltungen in Reihe ohne Mittelpunkt



**Gleichrichtung
mit 6 Diagonalen:**

D1 - D4: $U_d = U_{12}$

D3 - D2: $U_d = -U_{12}$

D3 - D6: $U_d = U_{23}$

D5 - D4: $U_d = -U_{23}$

D5 - D2: $U_d = U_{31}$

D1 - D6: $U_d = -U_{31}$

Grundregel:

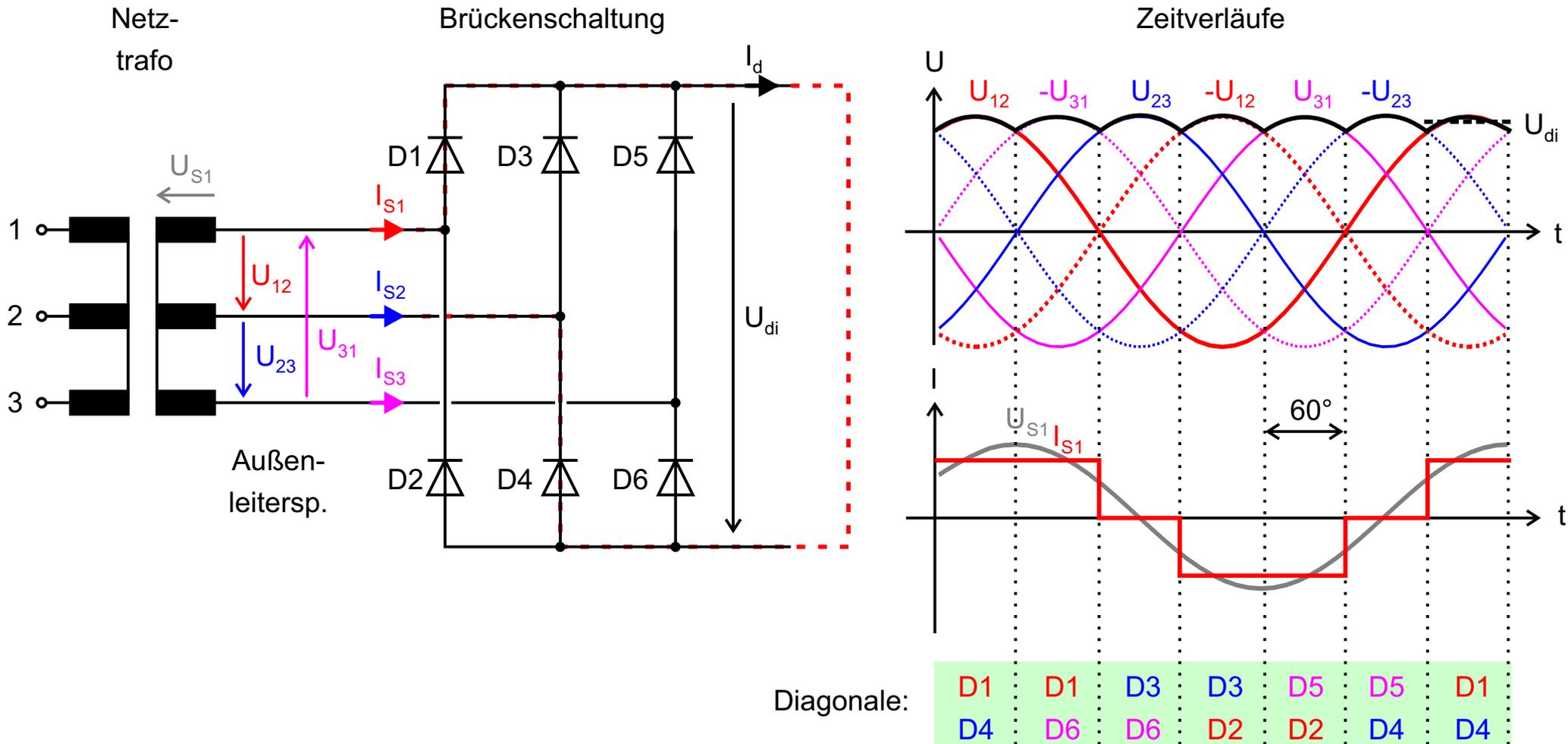
immer die Diagonale mit der
höchsten Spannung ist leitend!

Mittelpunktschaltung → Gleichrichtung von **Strangspannungen**

Brückenschaltungen → Gleichrichtung von **Außenleiterspannungen**

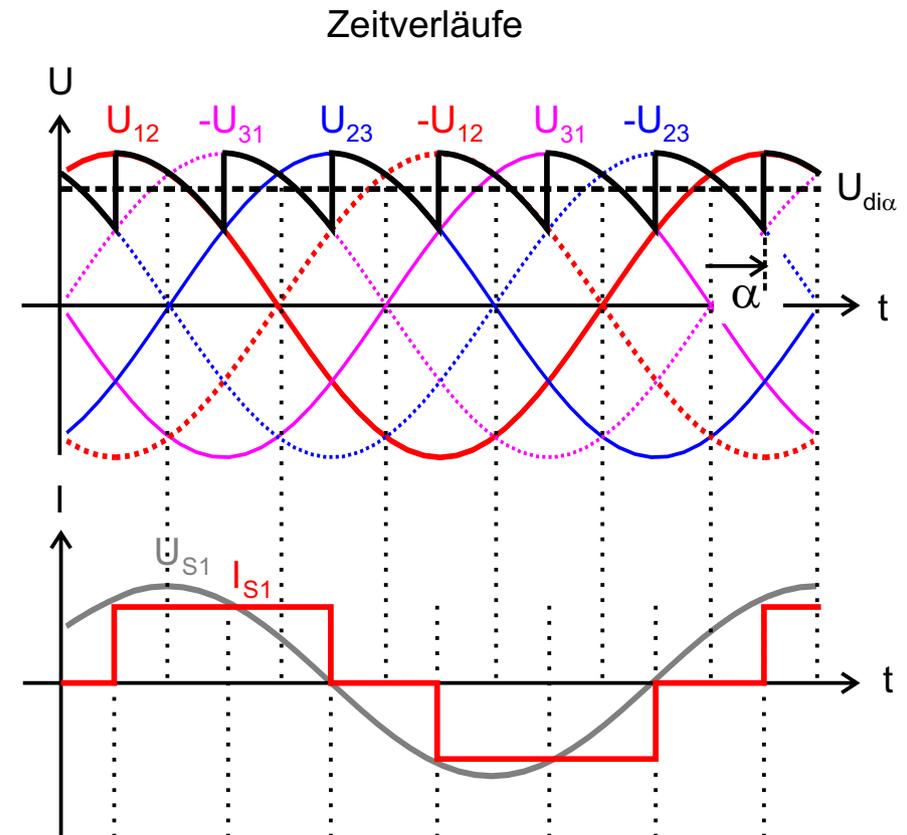
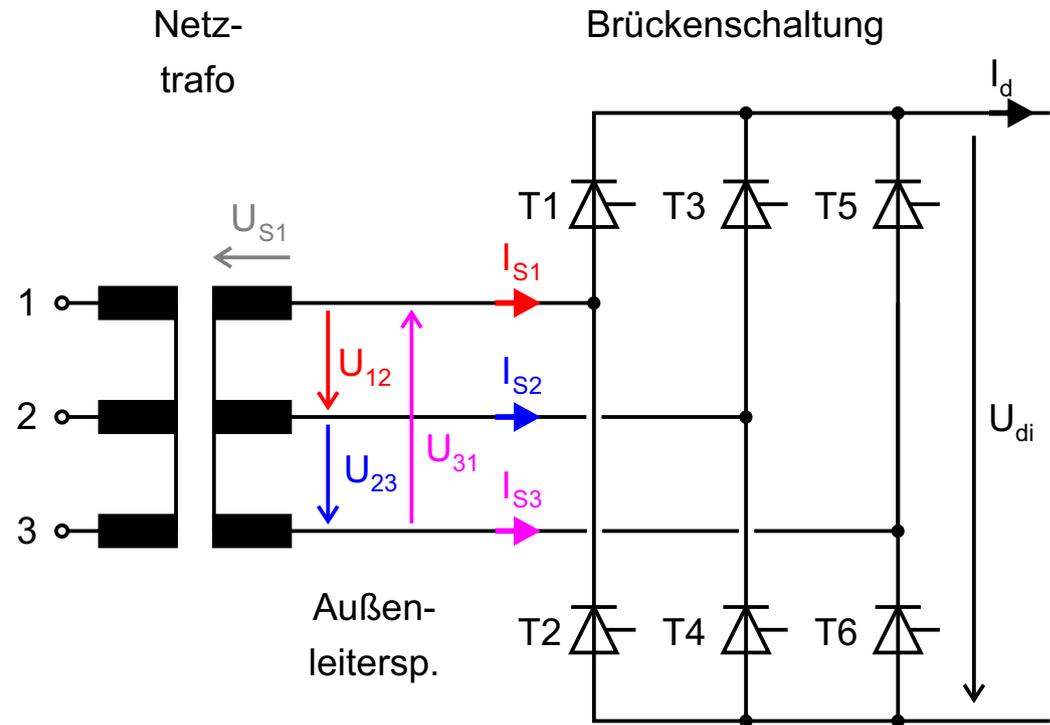
2.5 Sechspuls-Brückenschaltung (B6u)

zwei M3-Schaltungen in Reihe ohne Mittelpunkt



2.5 Sechspuls-Brückenschaltung (B6c)

Gesteuerte Variante: Steuerwinkel = 30°

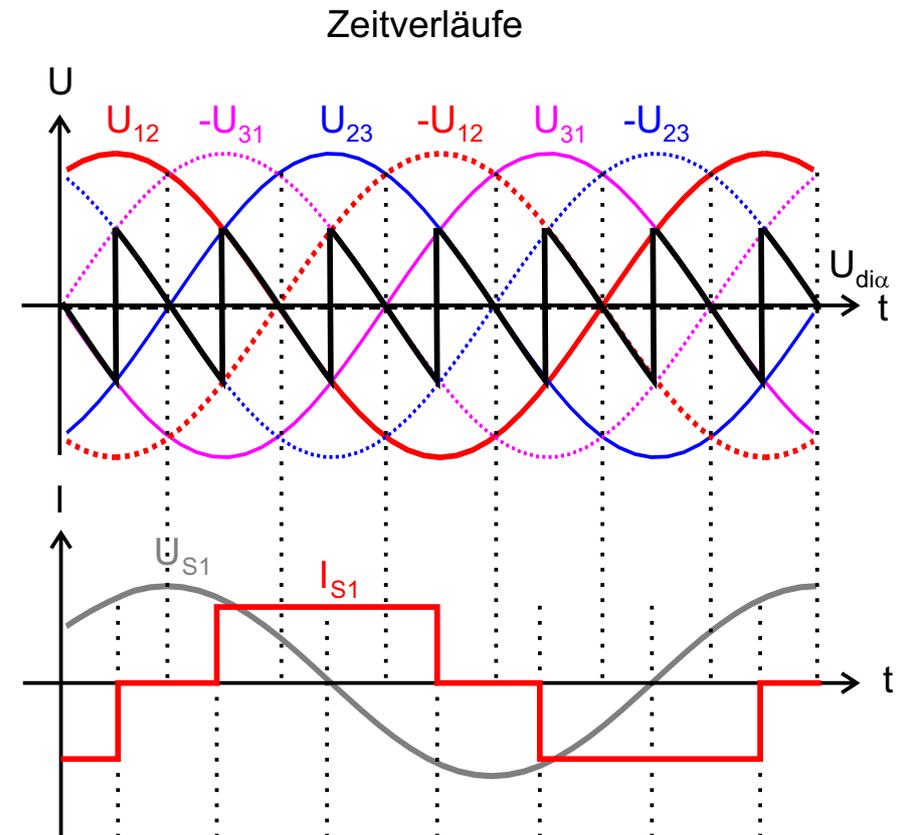
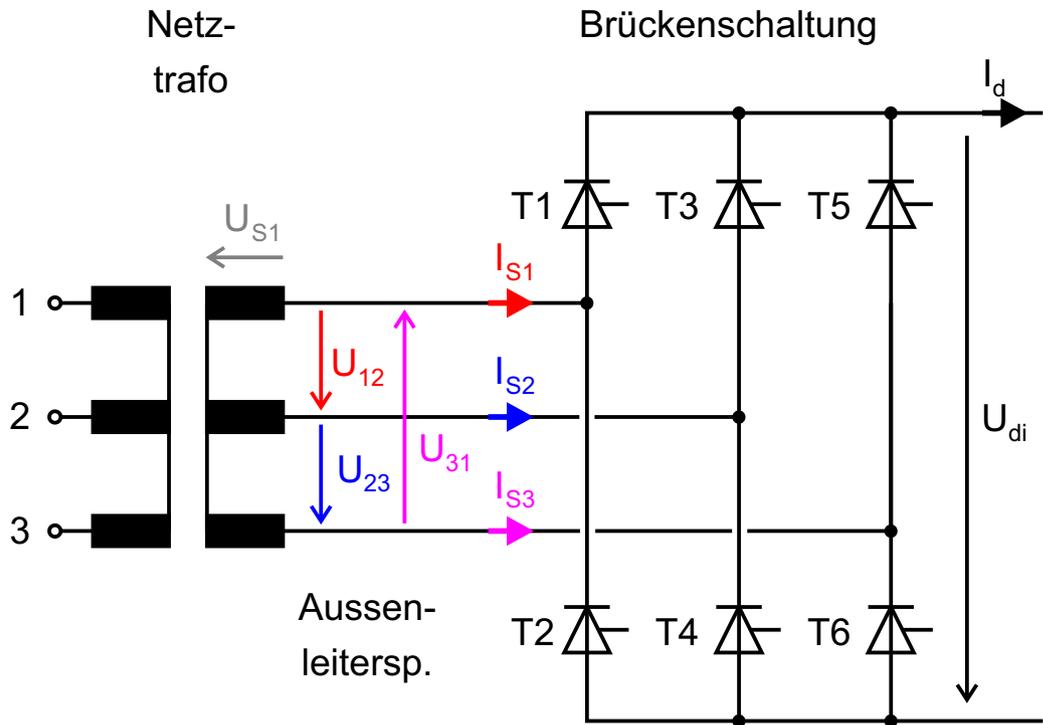


Diagonale:

D1	D1	D3	D3	D5	D5
D4	D6	D6	D2	D2	D4

2.5 Sechspuls-Brückenschaltung (B6c)

Gesteuerte Variante: Steuerwinkel = 90°



Diagonale:

D5	D1	D1	D3	D3	D5
D4	D4	D6	D6	D2	D2

2.5 Sechspuls-Brückenschaltung (B6c)

Gesteuerte Variante: Steuerwinkel = 150°

Vollausst.: $\alpha = 0$

Steuergesetz

$$U_{di} = 2.34 \cdot U_S$$

$$= 1.35 \cdot U_A$$

$$U_{di\alpha} = U_{di} \cdot \cos \alpha$$

U_A : Außenleiterspannung

$$U_{di,eff} \approx U_{di}$$

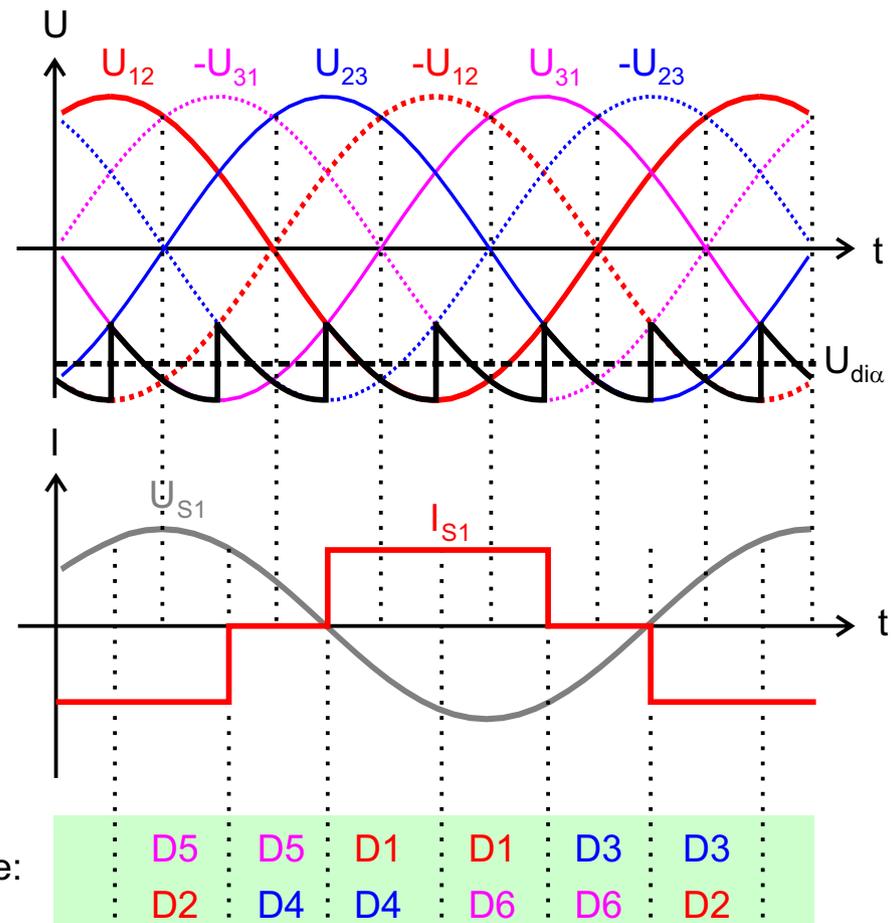
Beispiel:

$$U_S = 230V$$

$$U_A = 400V$$

$$U_{di} = 540V$$

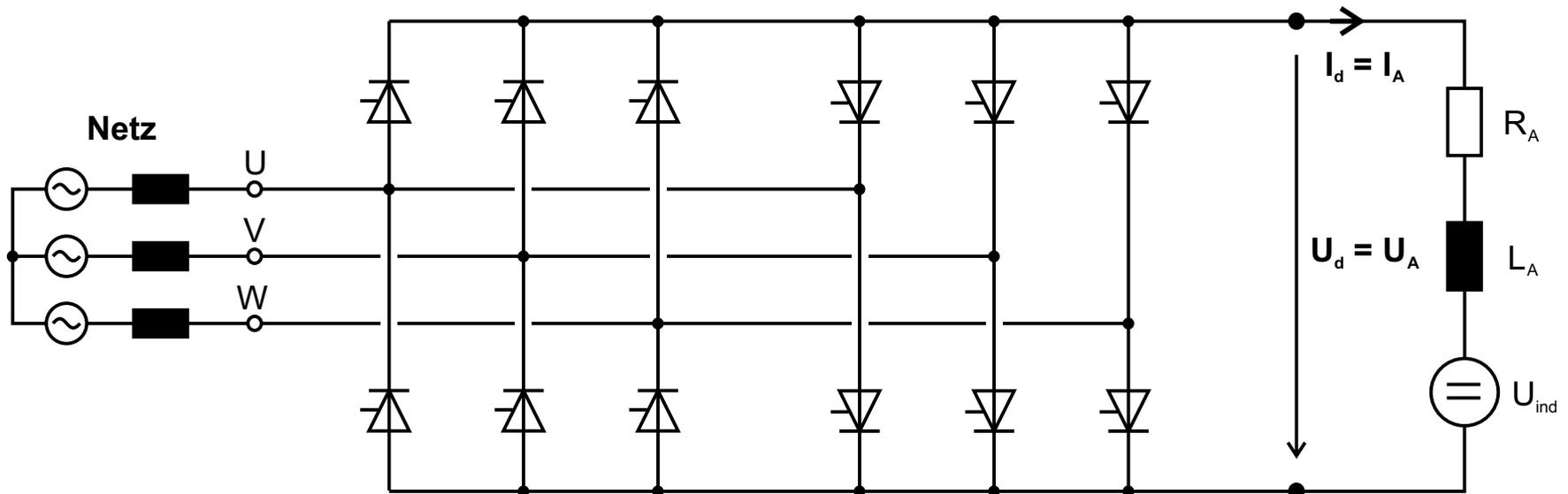
Zeitverläufe



2.6 Einsatzgebiete

4-Quadrantenbetrieb (2x B6 antiparallel)

Klassisches Einsatzgebiet: Gleichstrommaschine



Kreisstromfreie Variante:
Umschaltunkt zwischen
Brücke 1 und 2

I. und II. Quadrant:
Strom positiv
Spannung pos/neg

III. und IV. Quadrant:
Strom negativ
Spannung pos/neg

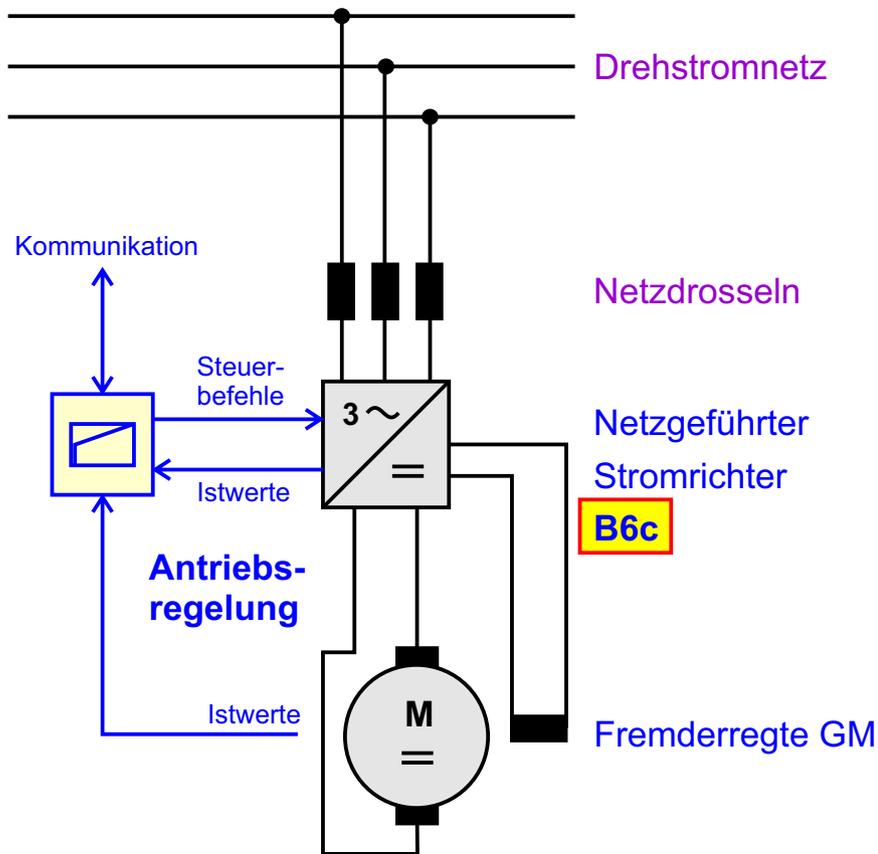
Gleichstrom-
maschine

2.6 Einsatzgebiete

Gegenüberstellung

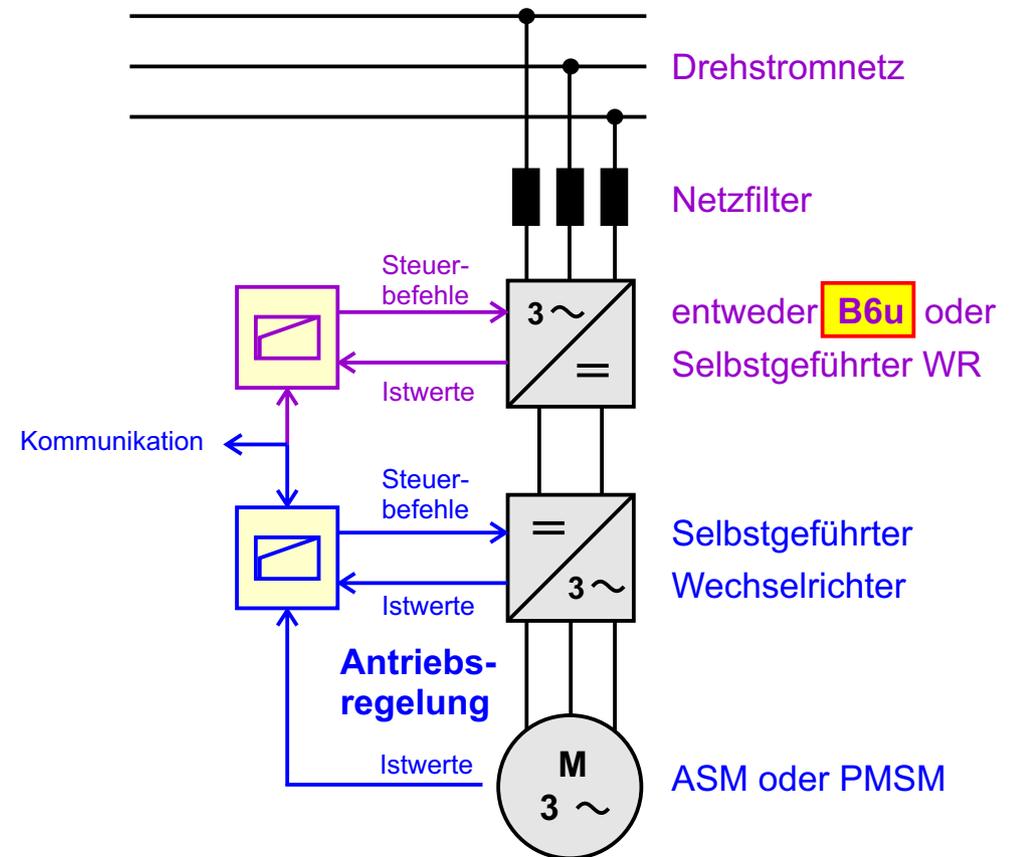
klassischer drehzahlvariabler Antrieb
mit Stromrichter und Gleichstrommaschine

Anlagenbestand und ggf. Neuanlagen



moderner drehzahlvariabler Antrieb
mit Frequenzumrichter und Drehfeldmaschine

nach wie vor größerer Invest



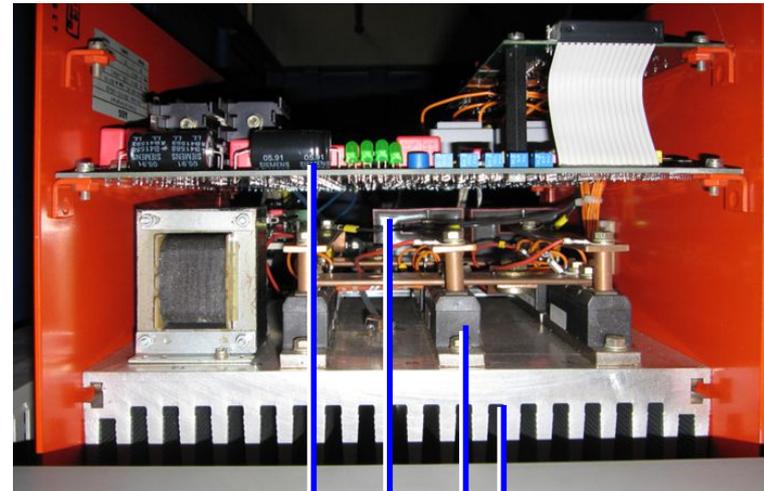
2.6 Einsatzgebiete

Beispiel: Netzgeführter Thyristorrichter DC 540V/50A

Draufsicht im Schaltschrank



Aufbau

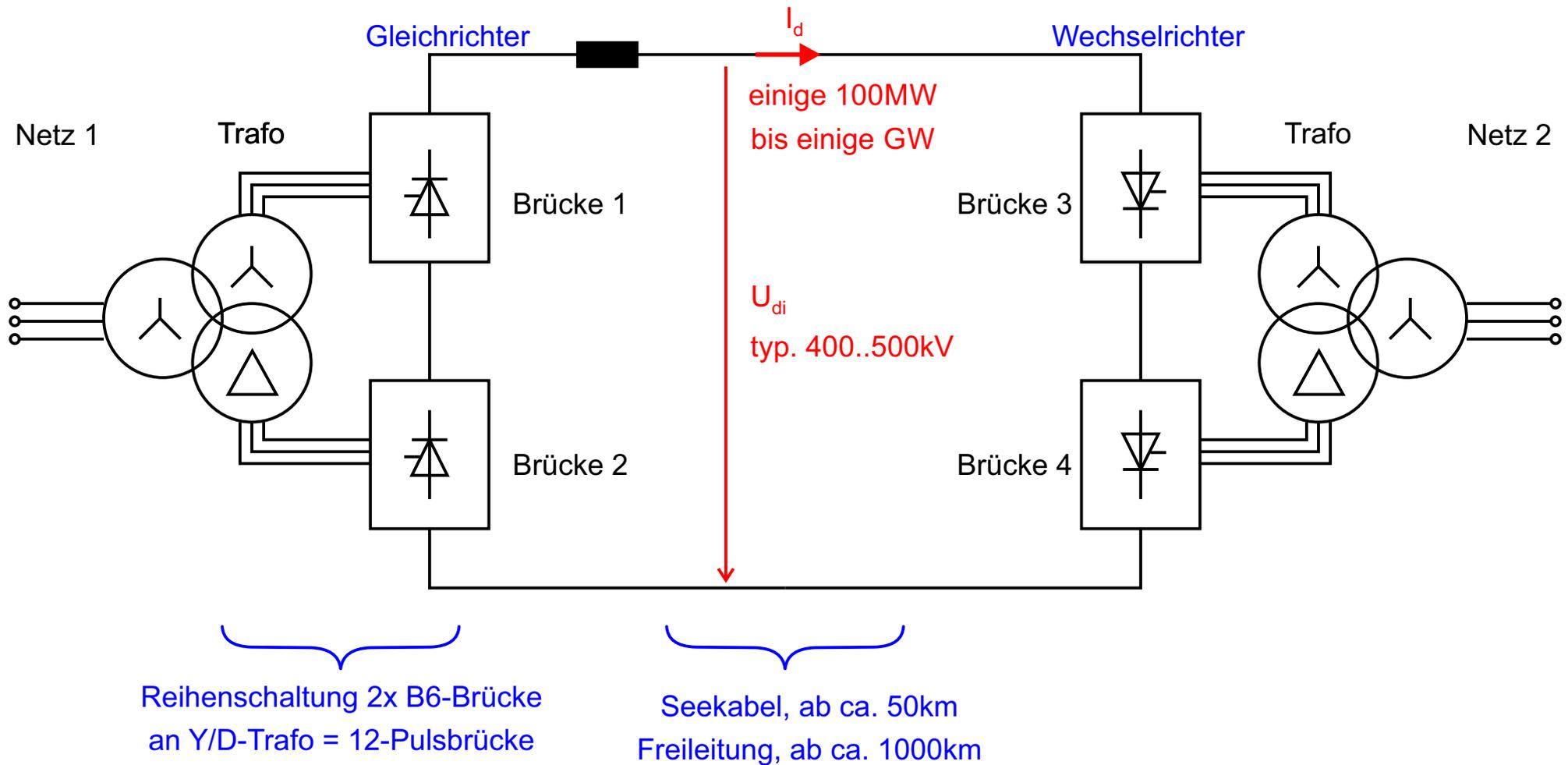


- Kühlkörper
- Thyristoren im Plastikgehäuse
- Stromwandler
- Ansteuersteuerplatine
mit Drehzahl- und Stromregler
- hier: rein analog, AEG 1986
- heute: dito, aber Regelung digital

Bilder: A. Kleimaier

2.6 Einsatzgebiete

HGÜ klassisch: z.B. B12 = 2x B6 in Serie



2.6 Einsatzgebiete

Vor- und Nachteile

netzseitiger Thyristorbrückenschaltungen

Vorteile

- einfache, robuste Technologie
- guter Ausbildungsstand
- kostengünstig



Nachteile

- Grundswingungsblindleistung
- Oberwellen



Alternativen

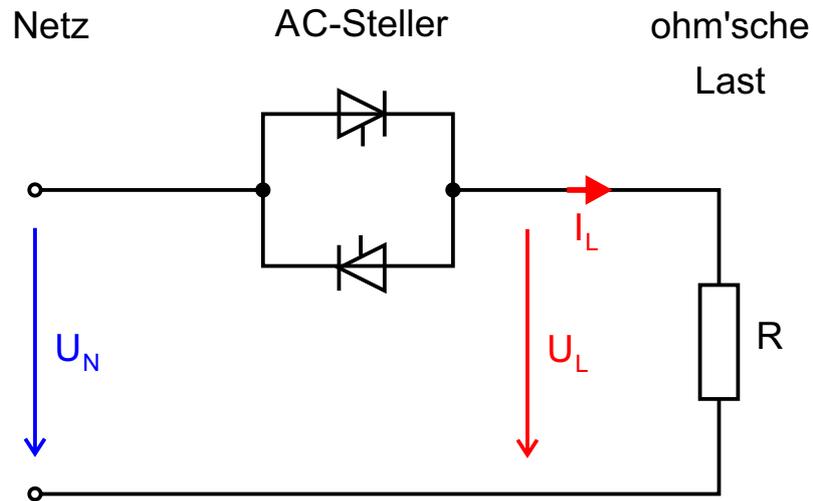
- selbstgeführte Umrichter mit abschaltbaren Halbleiterventilen
- Drehstromwechselrichter, Multilevelumrichter (für Elektrische Antriebe, HGÜ)

Vorteile

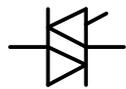
- Regelung auf $\cos \varphi = 1$ möglich
- geringer Stromripple
- ggf. aktive Blindleistungskompensation

2.7 Wechselstromsteller

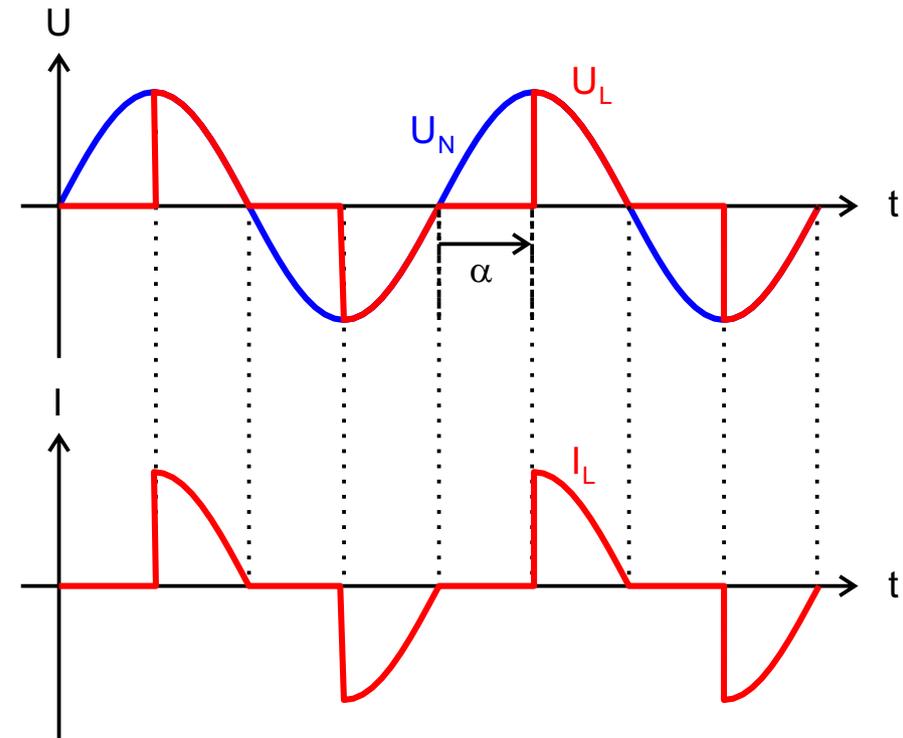
Phasenanschnittsteuerung



Triac
(ohm'sche Last)

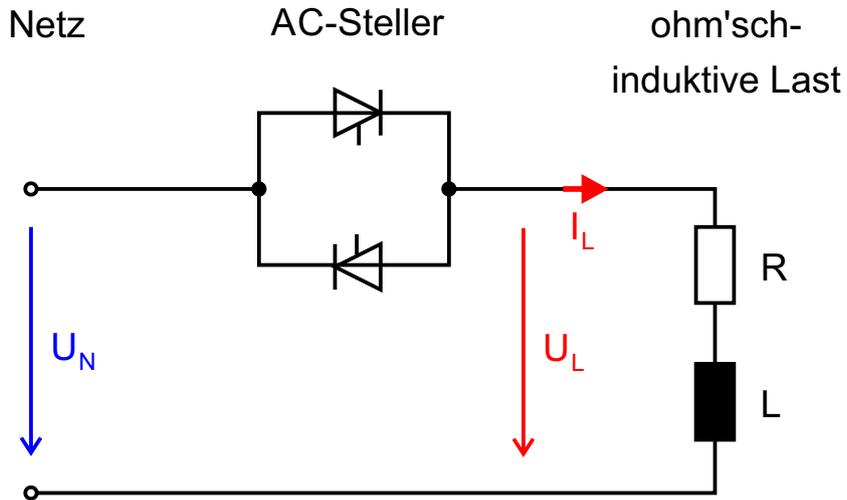


Zeitverläufe

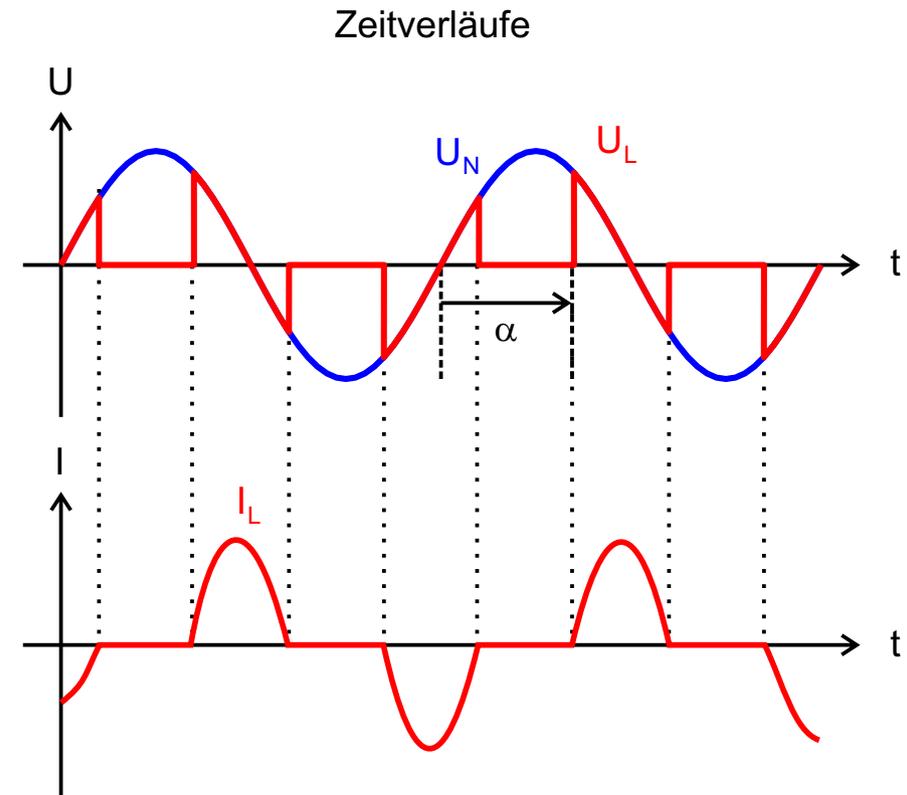


2.7 Wechselstromsteller

Phasenanschnittsteuerung



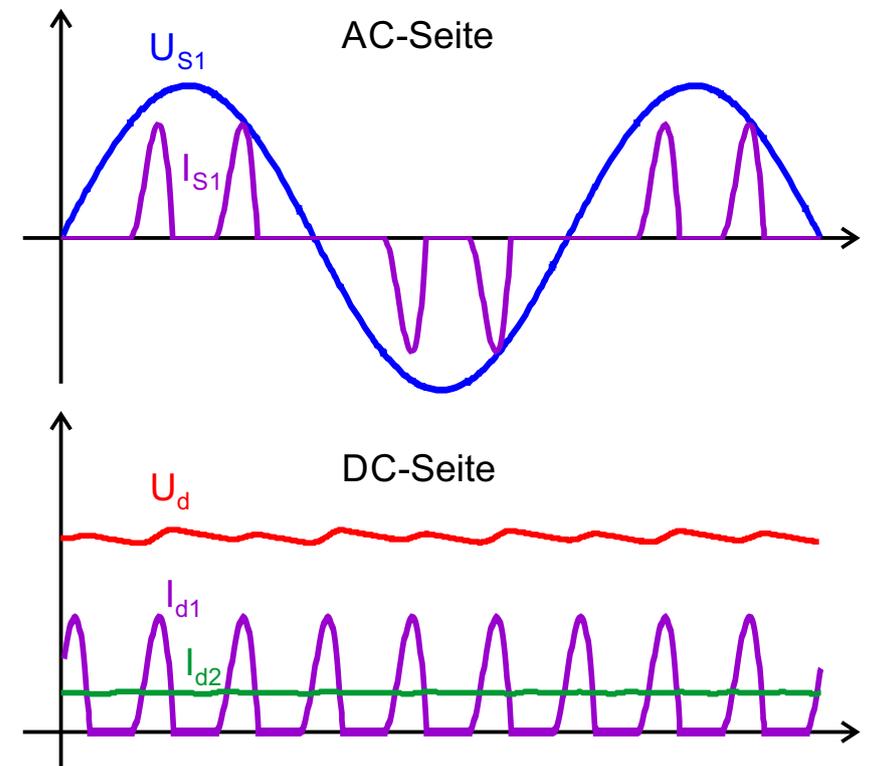
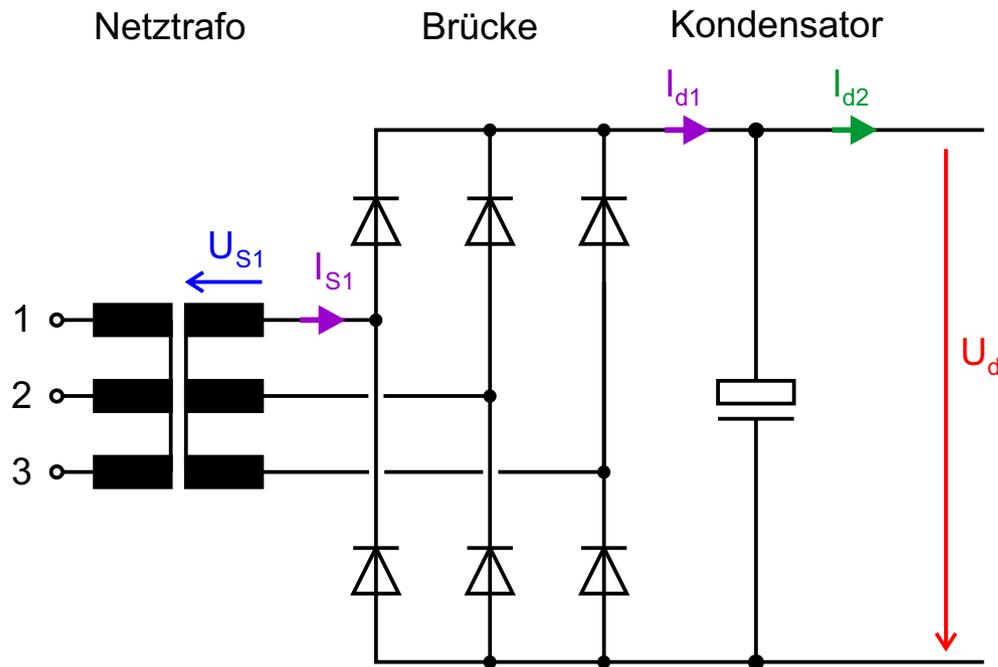
3-phasige Ausführung: "Drehstromsteller"
(= kein Frequenzumrichter!!!)



- Strom steigt mit $di/dt = U_L$ an
- Thyristor sperrt erst, wenn I_L null erreicht hat

2.8 Gleichrichter mit PFC

B6u: Speisung Zwischenkreis mit Kondensator

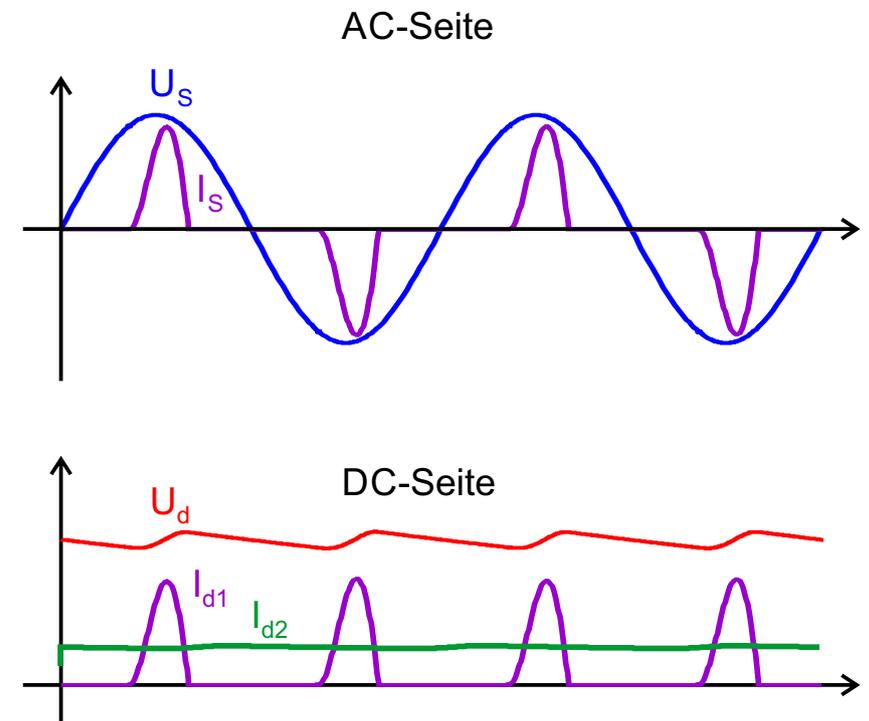
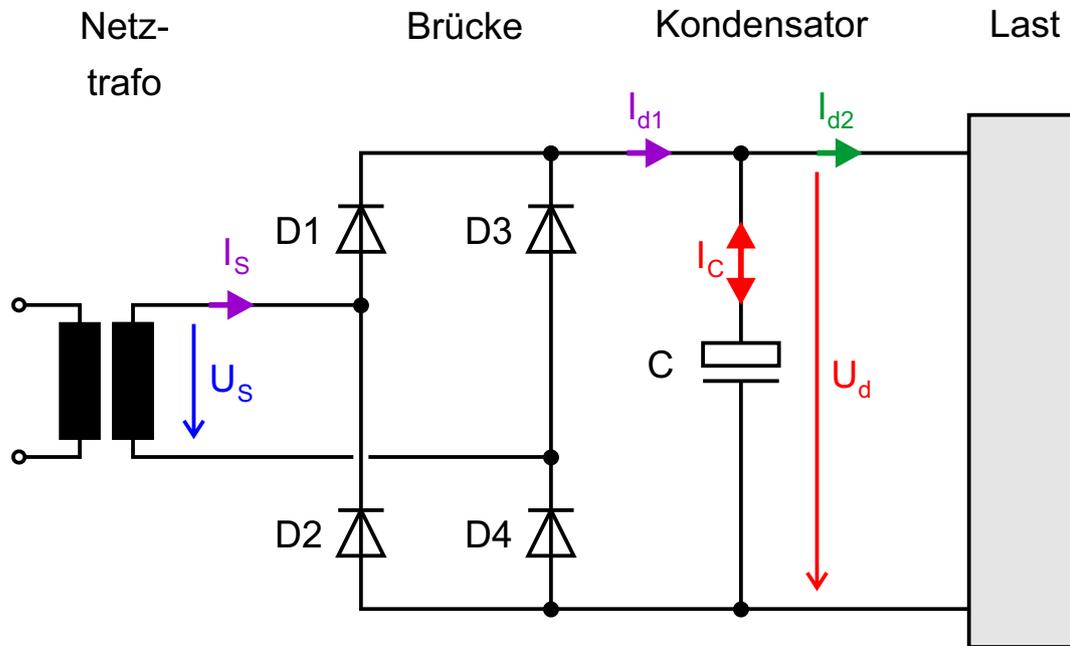


Simulation mit LTspice: **B6u.asc**

Problem: Stromkurvenform mit kurzen hohen Peaks
⇒ netzseitig hohe Verzerrungsblindleistung
⇒ erhöhter Effektivwert gegenüber Sinusgrundwelle

2.8 Gleichrichter mit PFC

B2u: verschärfte Problematik



Beispiel aus Simulation:

Netzspannung	$U_s = 230V \text{ rms}$	
Netzstrom	$I_s = 49A \text{ rms} / 80A \text{ peak}$	
DC-Spannung	$U_d = 310V \text{ mean}$	} 3.1kW
DC-Strom	$I_{d2} = 10A \text{ mean}$	

• Steckdose 230V 16A 1~ \Rightarrow 3680W

\Rightarrow 3.1kW sollten kein Problem sein...

☠ aber nicht mit dieser Stromkurvenform!!!

2.8 Gleichrichter mit PFC

Abhilfe: sinusförmiger Eingangsstrom

