

3. Übung: Energieübertragung und Netzregelung

Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik



Themen 3. Übung EÜN

- Hochspannungsgleichstromübertragung
 - Einsatzgebiete
 - Derzeitiger Stand in Europa
 - Planungen in Deutschland

- Netzgeführter Umrichter
 - Aufbau
 - Funktion
 - Kommutierungsvorgang
 - Ersatzschaltbild
 - Betrieb

- Aufgaben

Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)

- Einsatzgebiete:



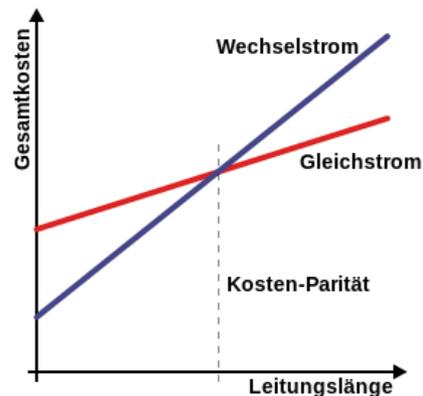
Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)

- Einsatzgebiete:
 - Kopplung asynchroner Netze
 - Fernübertragung elektrischer Leistung



Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)

- Einsatzgebiete:
 - Kopplung asynchroner Netze
 - Fernübertragung elektrischer Leistung
 - Freileitung über Land ab ca. 600 km kostengünstiger als HDÜ
 - Kabel (im Meer) ab ca. 80 km kostengünstiger als HDÜ



Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)

- Einsatzgebiete:
 - Kopplung asynchroner Netze
 - Fernübertragung elektrischer Leistung
 - Freileitung über Land ab ca. 600 km kostengünstiger als HDÜ
 - Kabel (im Meer) ab ca. 80 km kostengünstiger als HDÜ

Hauptgrund für effizientere Übertragung:
Bei Gleichstrom gibt es **keine** Blindleistung
→ Weniger Verlustleistung
→ Weniger Stabilitätsprobleme



Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)

- Einsatzgebiete:
 - Kopplung asynchroner Netze
 - Fernübertragung elektrischer Leistung
 - Freileitung über Land ab ca. 600 km kostengünstiger als HDÜ
 - Kabel (im Meer) ab ca. 80 km kostengünstiger als HDÜ

Relativ schmale Trassenbreite
im Vergleich zu HDÜ mit
gleicher Leistung



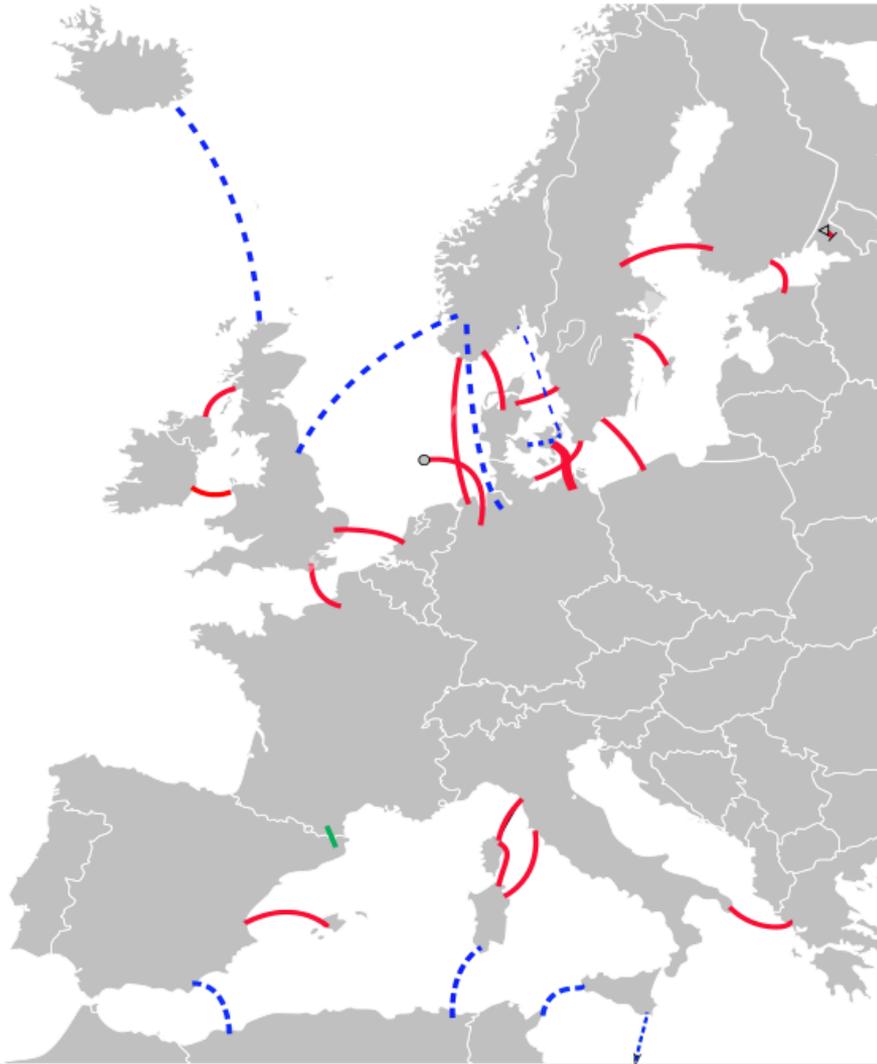
Themen 3. Übung EÜN

- Hochspannungsgleichstromübertragung
 - Einsatzgebiete
 - **Derzeitiger Stand in Europa**
 - Planungen in Deutschland

- Netzgeführter Umrichter
 - Aufbau
 - Funktion
 - Kommutierungsvorgang
 - Ersatzschaltbild
 - Betrieb

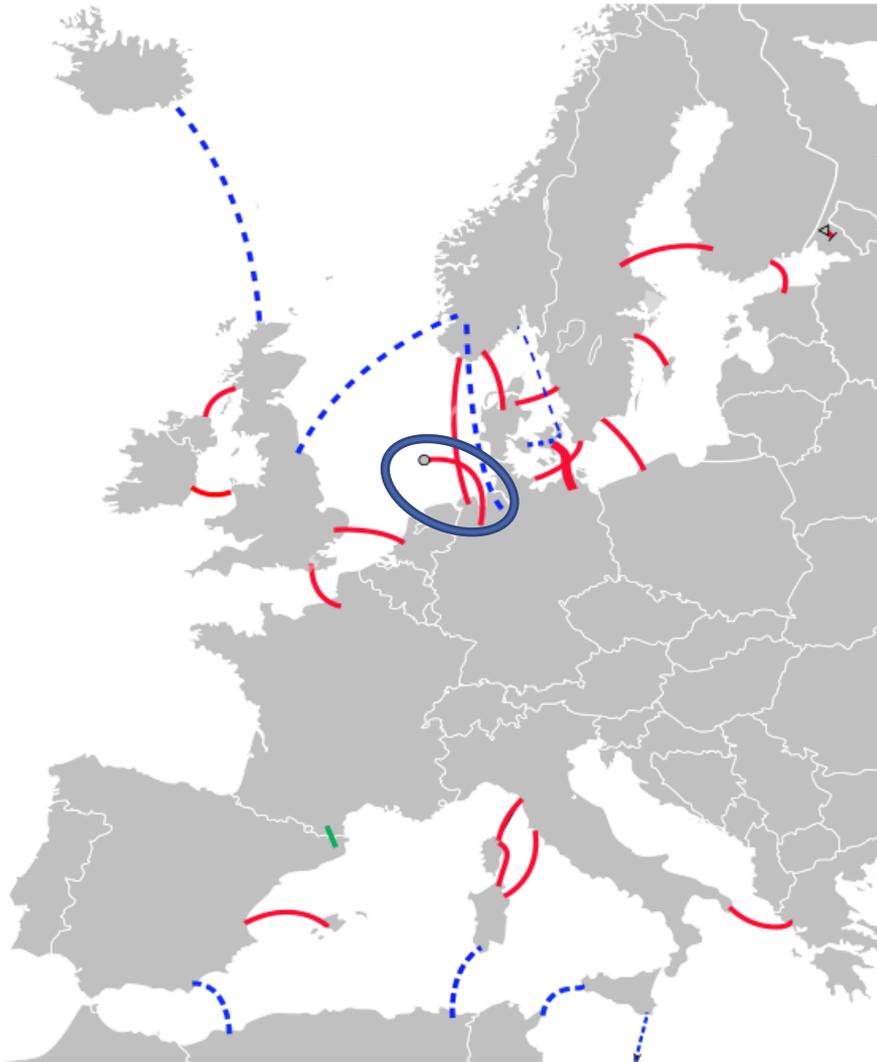
- Aufgaben

HGÜ – Derzeitiger Stand in Europa



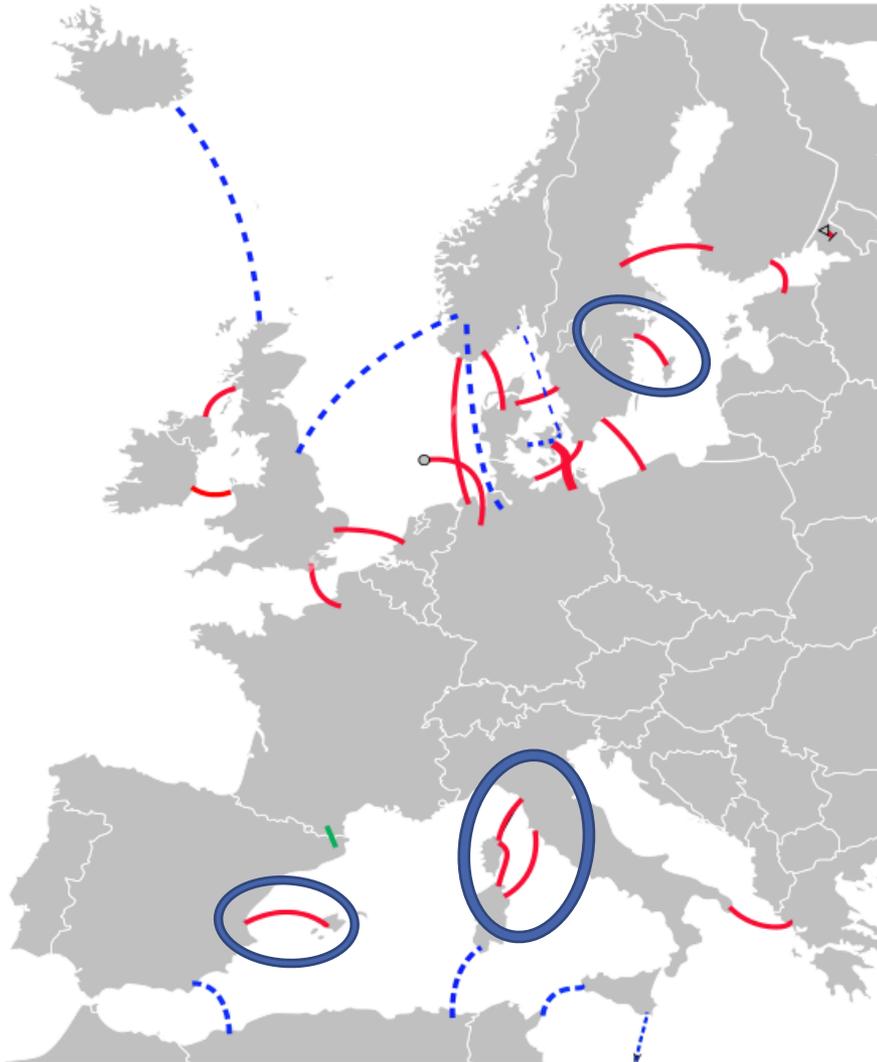
■ Hauptsächlich Offshore

HGÜ – Derzeitiger Stand in Europa



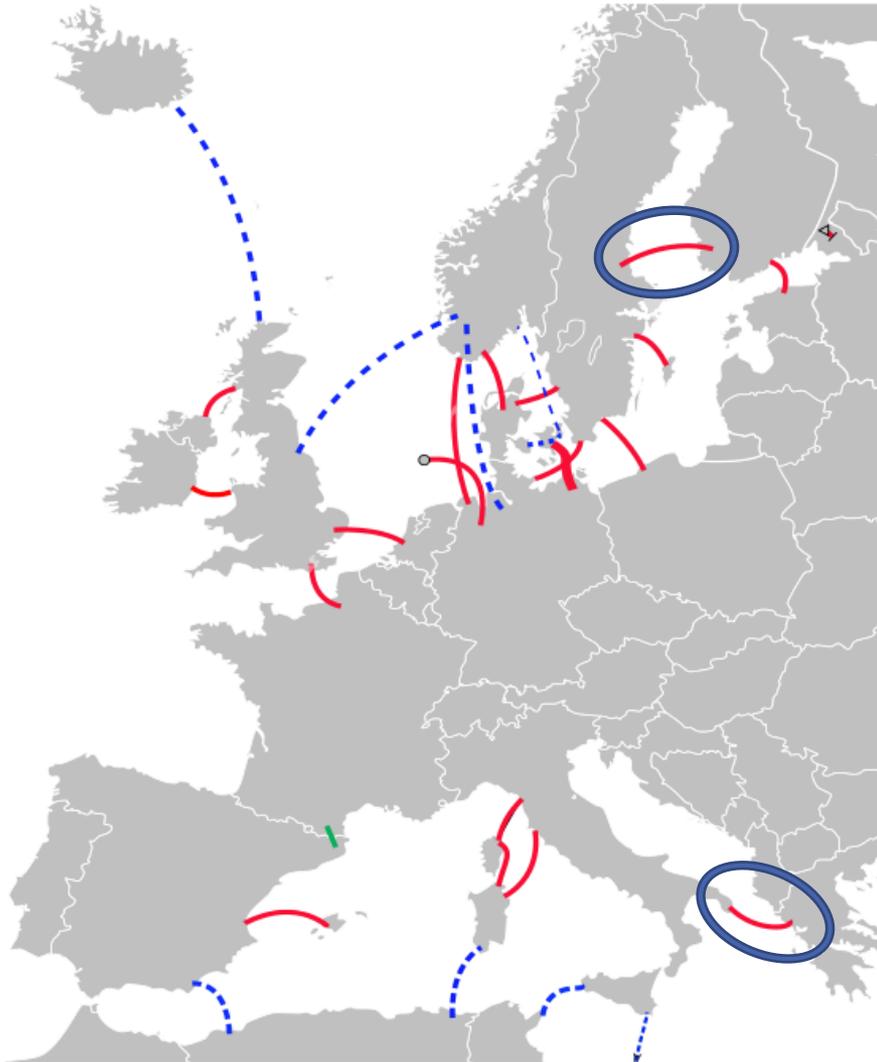
- Hauptsächlich Offshore
- Anbindung Windparks

HGÜ – Derzeitiger Stand in Europa



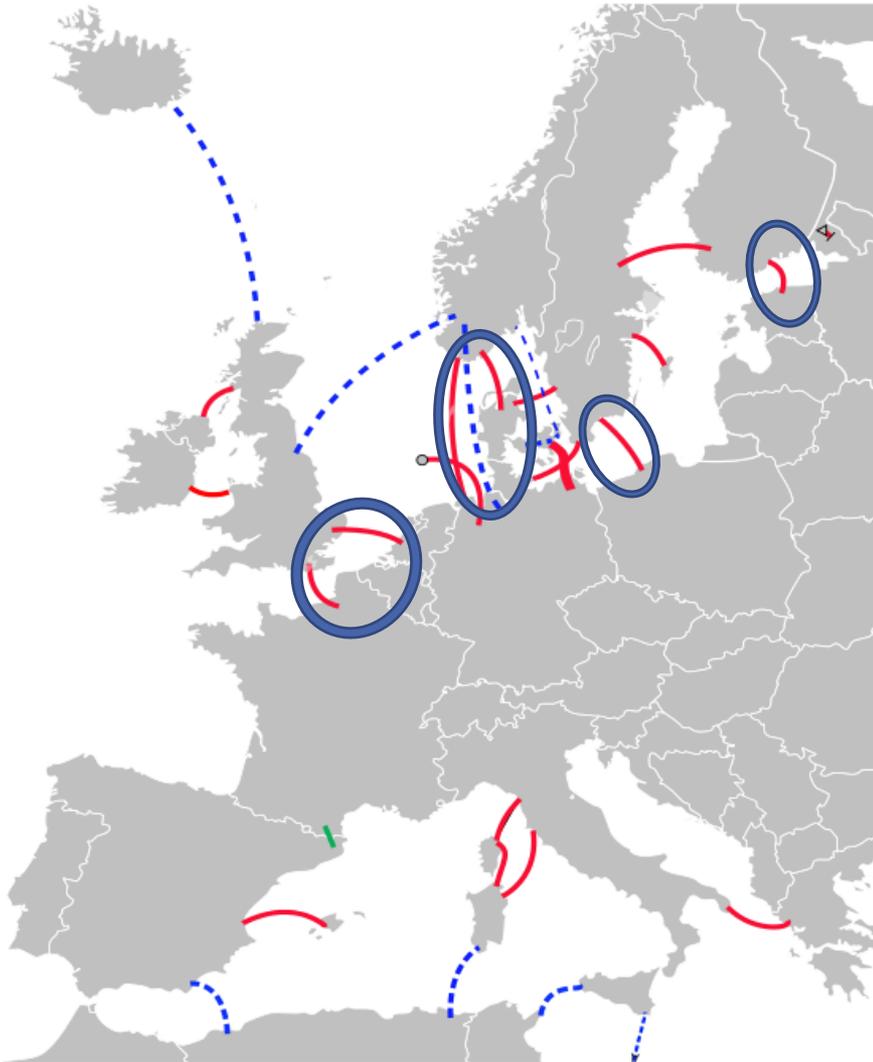
- Hauptsächlich Offshore
- Anbindung Windparks
- Anbindung Inseln

HGÜ – Derzeitiger Stand in Europa



- Hauptsächlich Offshore
- Anbindung Windparks
- Anbindung Inseln
- Energieübertragung zwischen synchronen Netzen

HGÜ – Derzeitiger Stand in Europa



- **Hauptsächlich Offshore**
- Anbindung Windparks
- Anbindung Inseln
- Energieübertragung zwischen synchronen Netzen
- **Energieübertragung zwischen asynchronen Netzen**

Themen 3. Übung EÜN

- Hochspannungsgleichstromübertragung
 - Einsatzgebiete
 - Derzeitiger Stand in Europa
 - **Planungen in Deutschland**

- Netzgeführter Umrichter
 - Aufbau
 - Funktion
 - Kommutierungsvorgang
 - Ersatzschaltbild
 - Betrieb

- Aufgaben

HGÜ – Planungen in Deutschland



Motivation:

- Überschuss im Norden durch Offshore Windkraft
- Abschaltung großer Kernkraftwerke und hoher Bedarf für Energie im Süden

Mehrere Trassen geplant

- Stand derzeit: Möglichst viel Kabel (unterirdisch), Teilstrecken als Freileitung

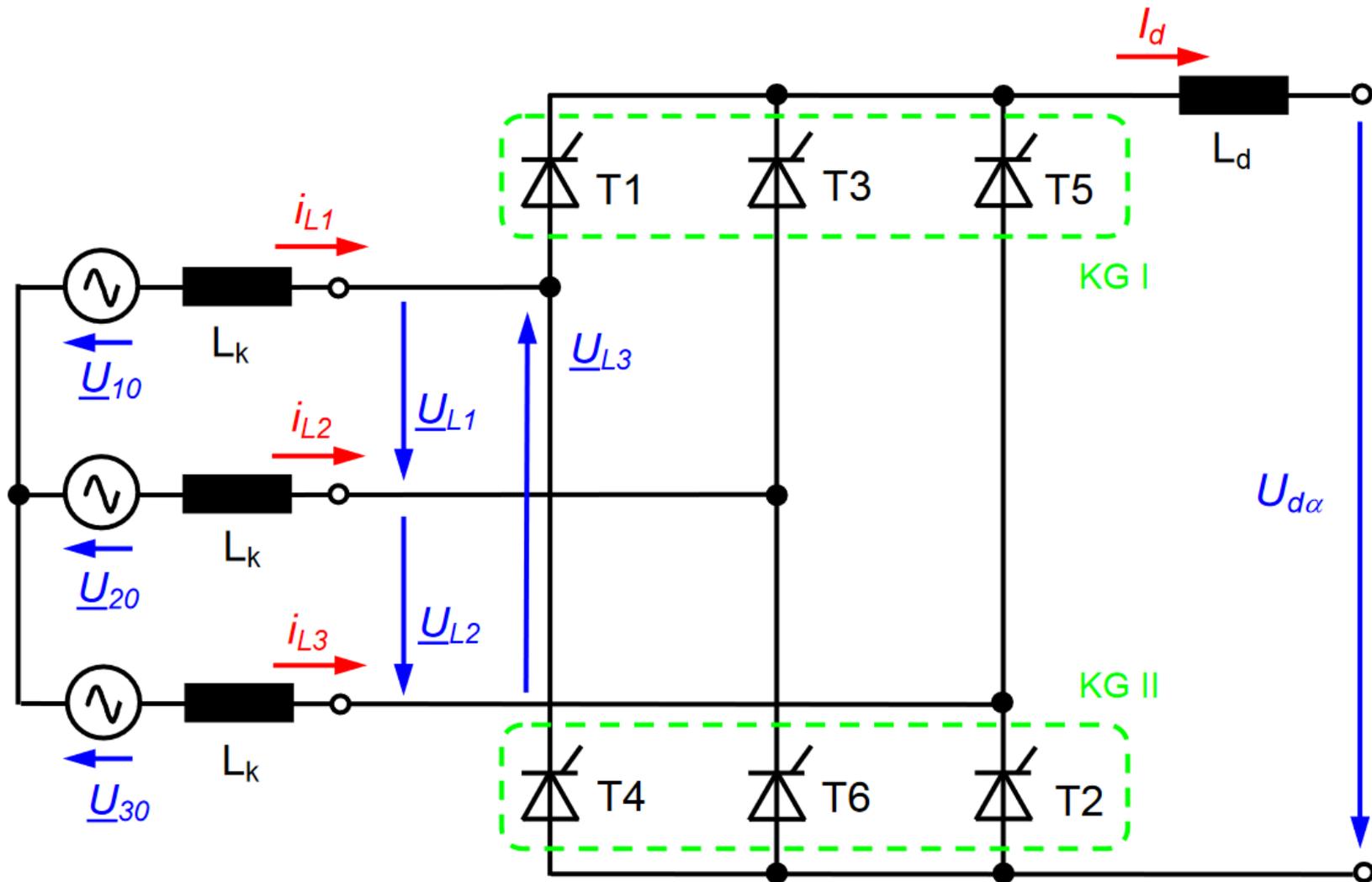
Themen 3. Übung EÜN

- Hochspannungsgleichstromübertragung
 - Einsatzgebiete
 - Derzeitiger Stand in Europa
 - Planungen in Deutschland

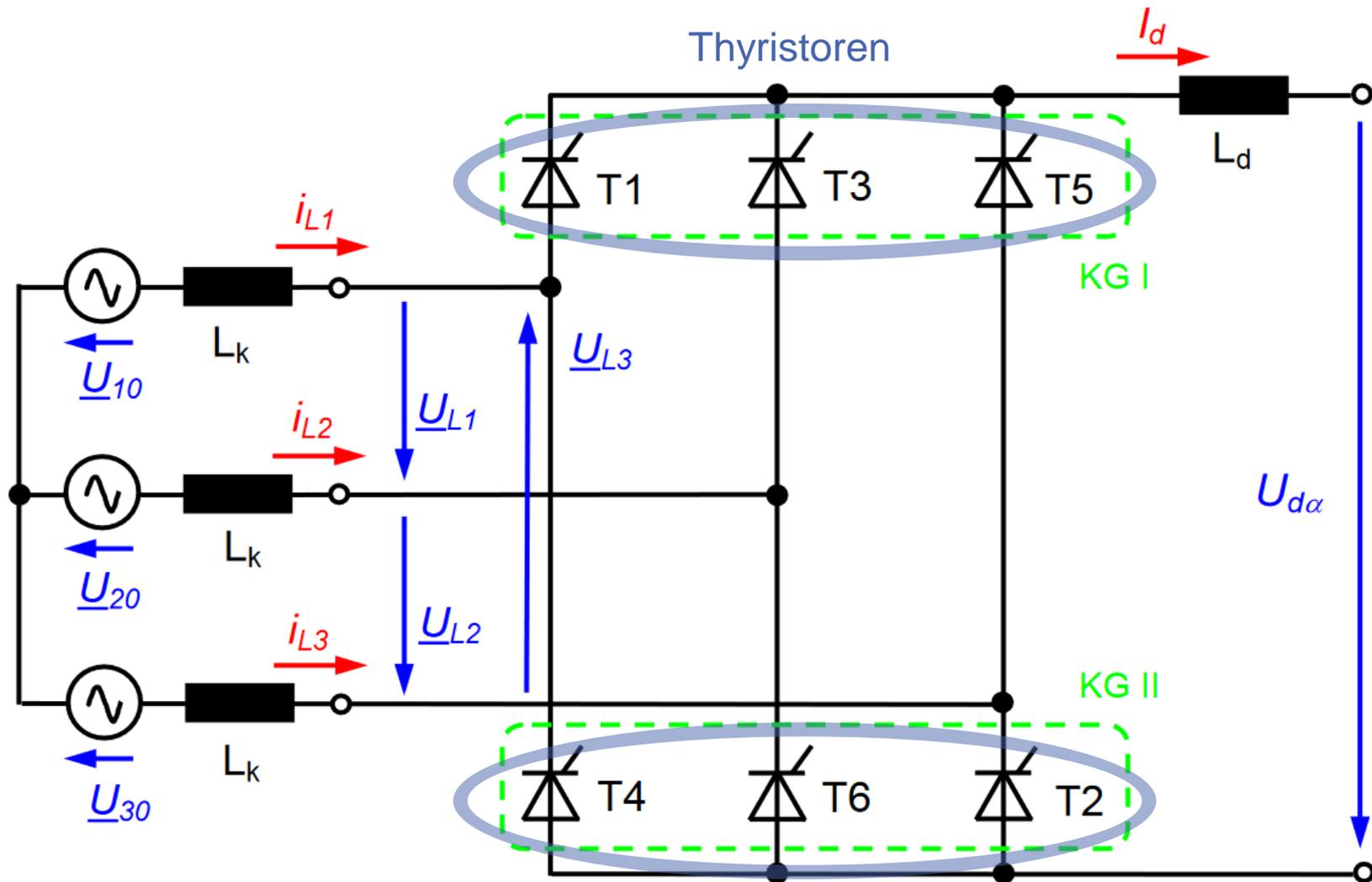
- Netzgeführter Umrichter
 - **Aufbau**
 - Funktion
 - Kommutierungsvorgang
 - Ersatzschaltbild
 - Betrieb

- Aufgaben

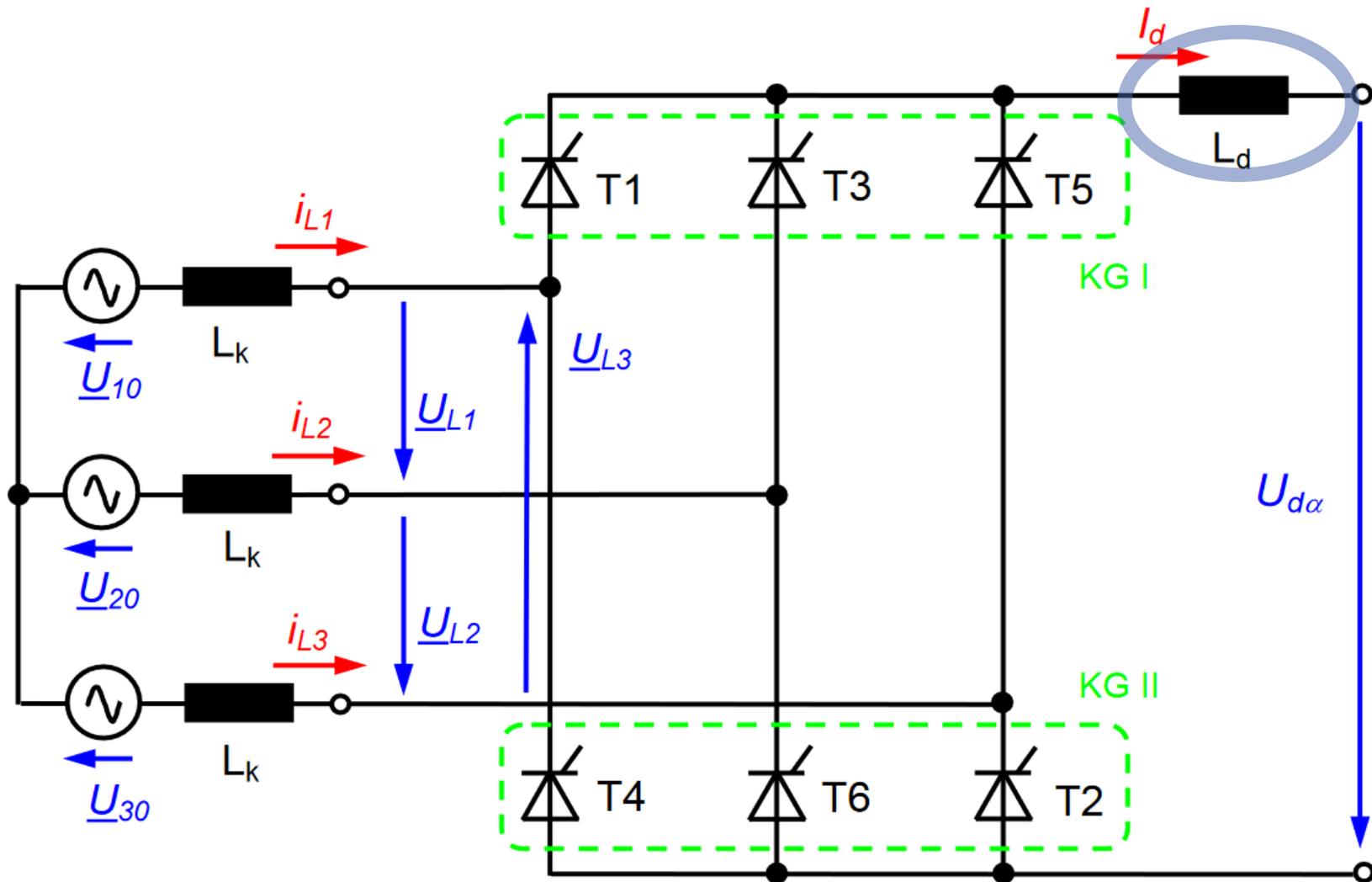
Netzgeführter Umrichter – Aufbau



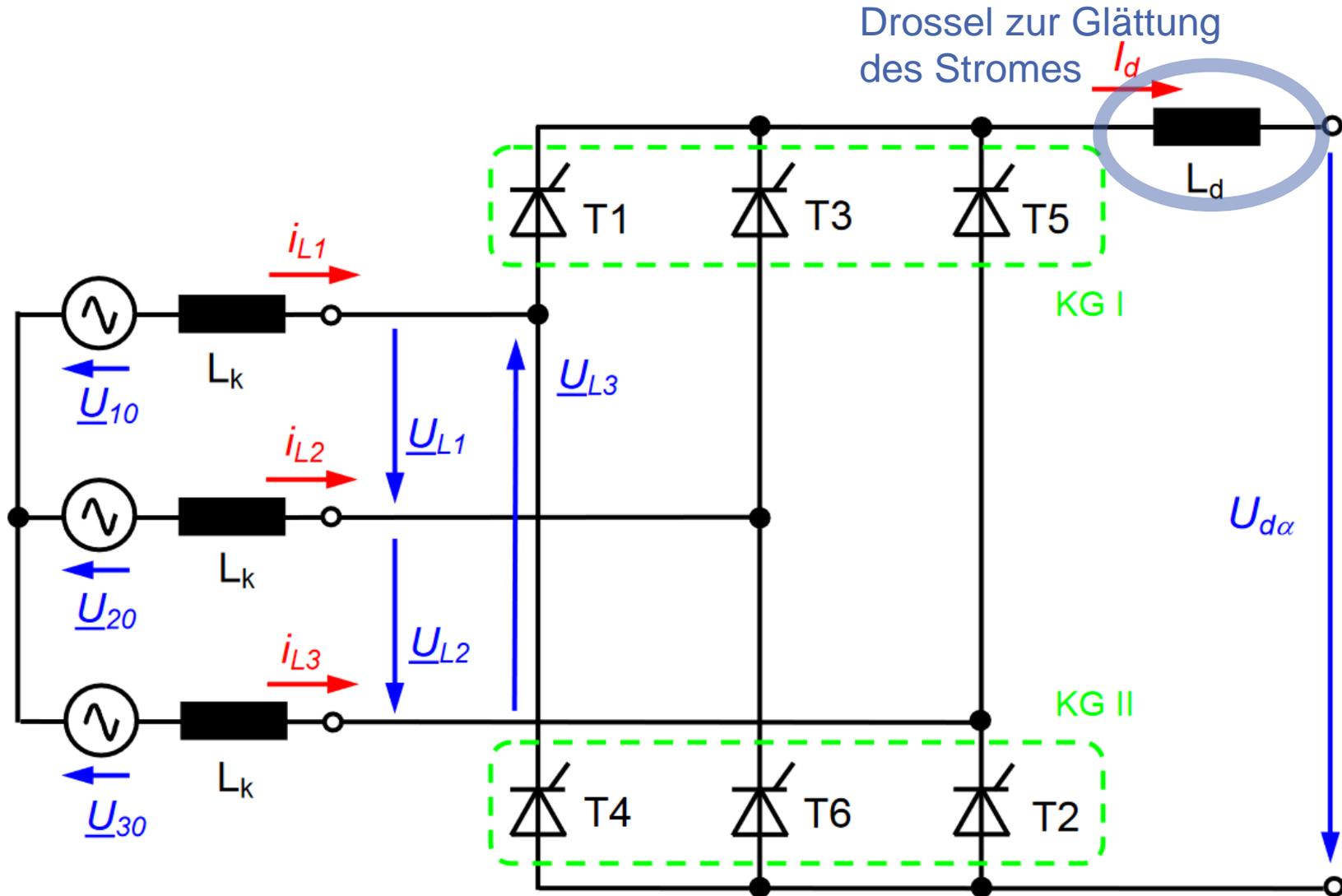
Netzgeführter Umrichter – Aufbau



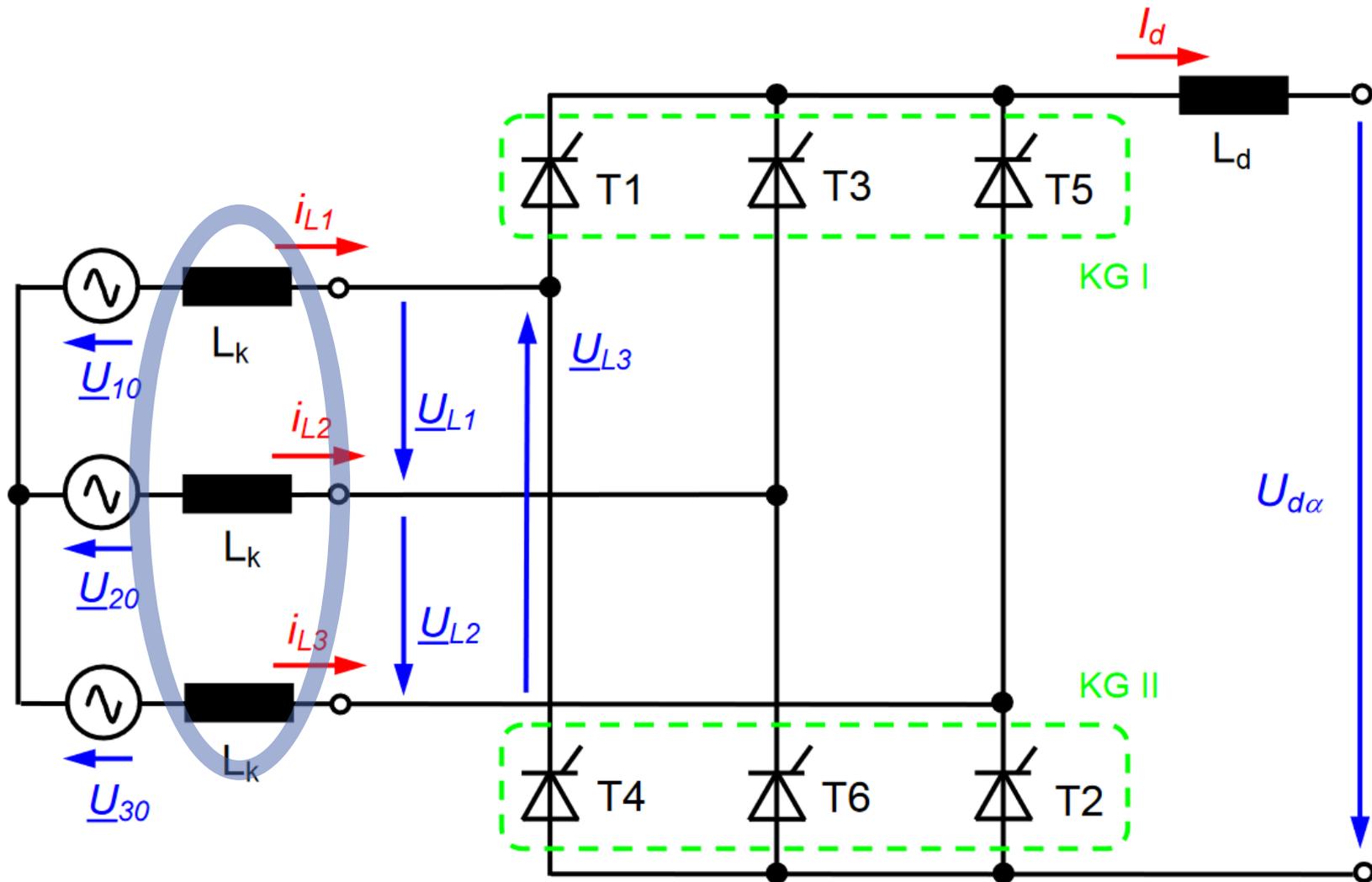
Netzgeführter Umrichter – Aufbau



Netzgeführter Umrichter – Aufbau

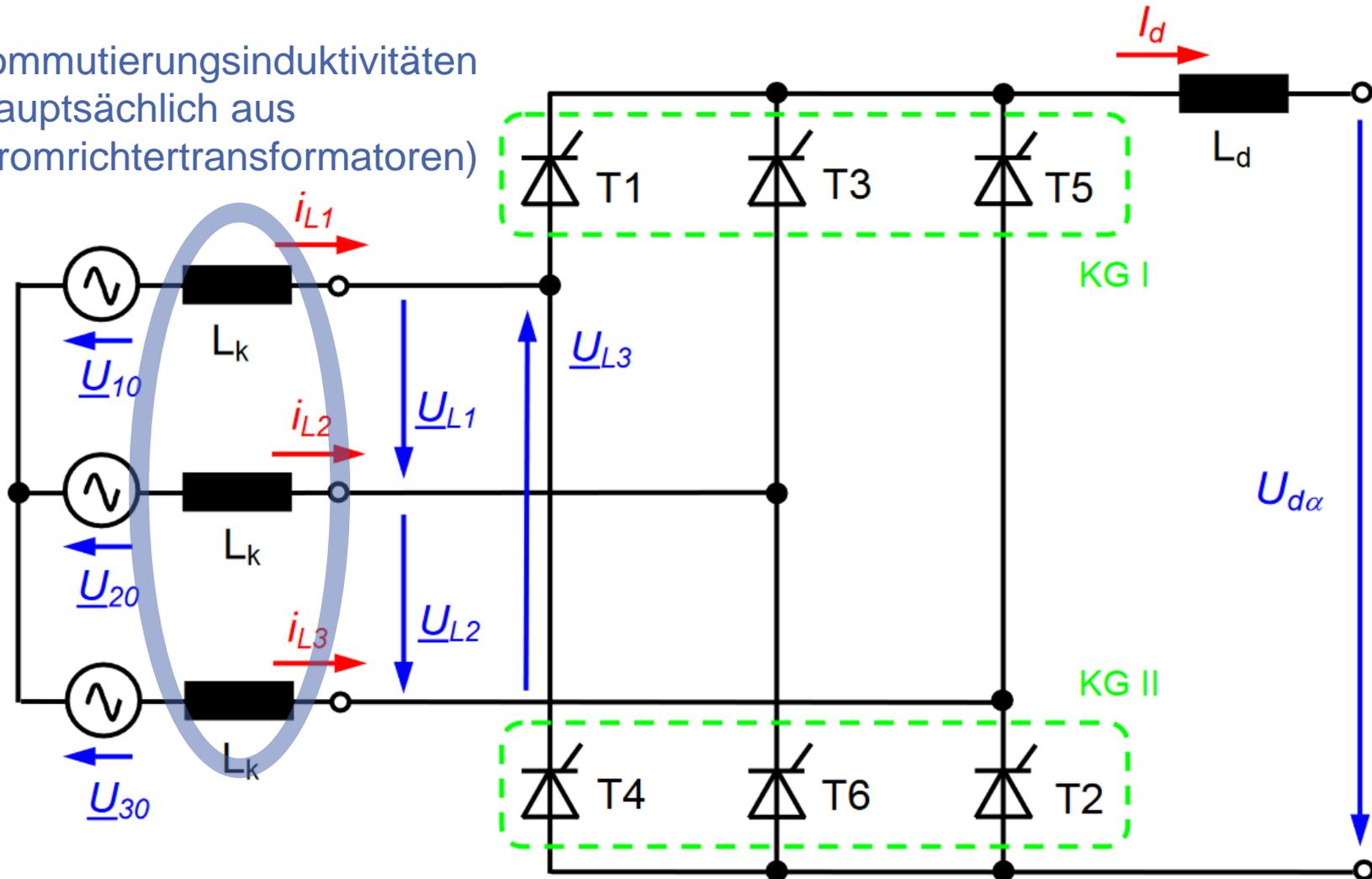


Netzgeführter Umrichter – Aufbau



Netzgeführter Umrichter – Aufbau

Kommutierungsinduktivitäten
(hauptsächlich aus
Stromrichtertransformatoren)



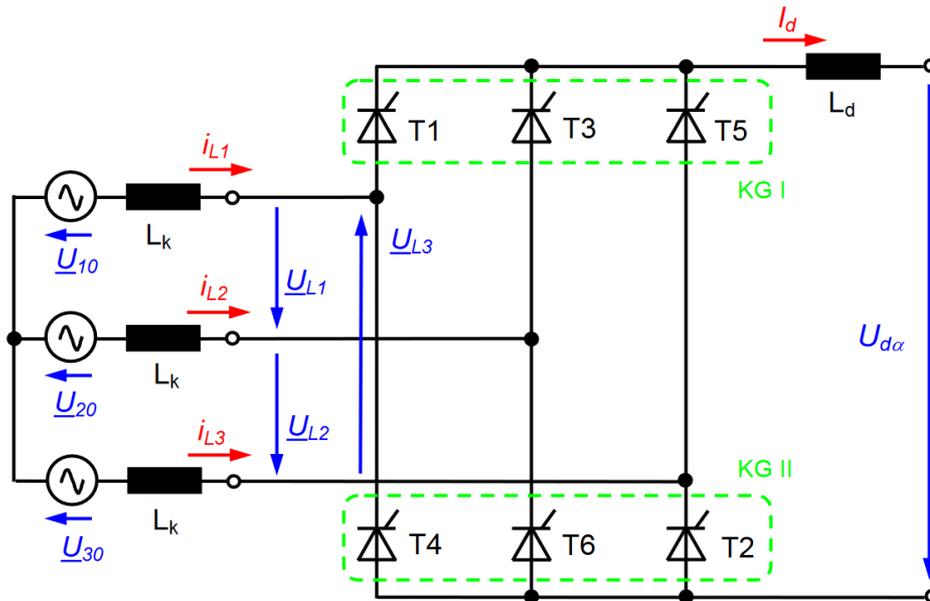
Themen 3. Übung EÜN

- Hochspannungsgleichstromübertragung
 - Einsatzgebiete
 - Derzeitiger Stand in Europa
 - Planungen in Deutschland

- Netzgeführter Umrichter
 - Aufbau
 - **Funktion**
 - Kommutierungsvorgang
 - Ersatzschaltbild
 - Betrieb

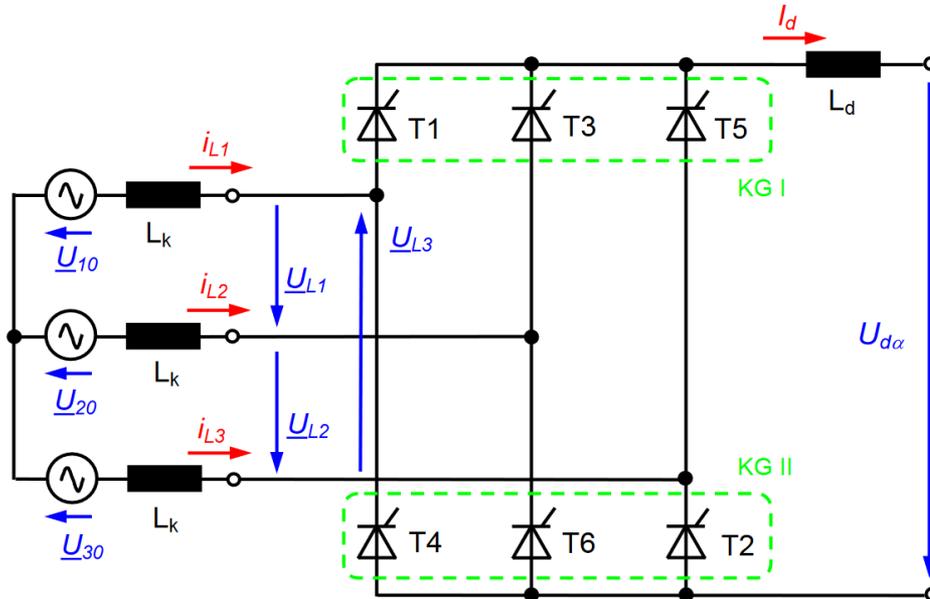
- Aufgaben

Netzgeführter Umrichter – Funktion



Wie viele verschiedene Spannungen können durch die Thyristoren eingestellt werden?

Netzgeführter Umrichter – Funktion

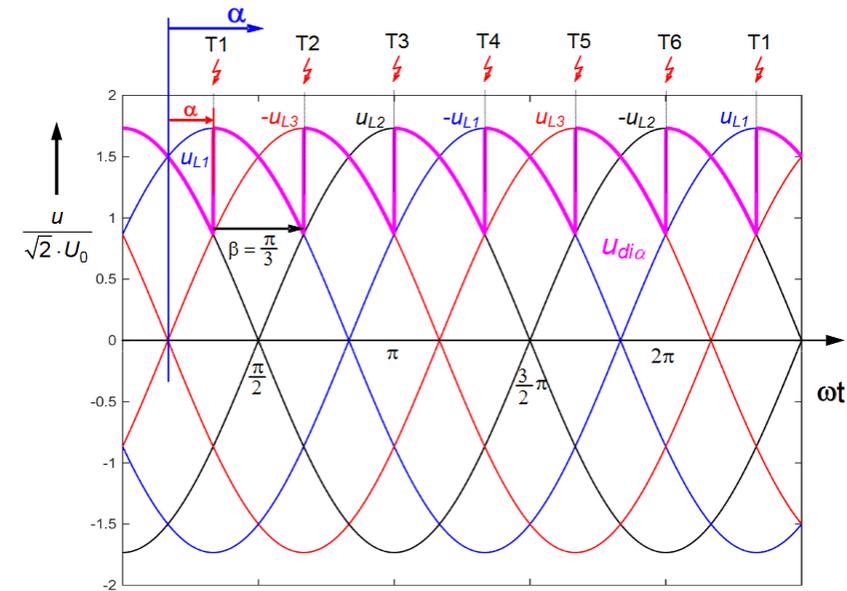
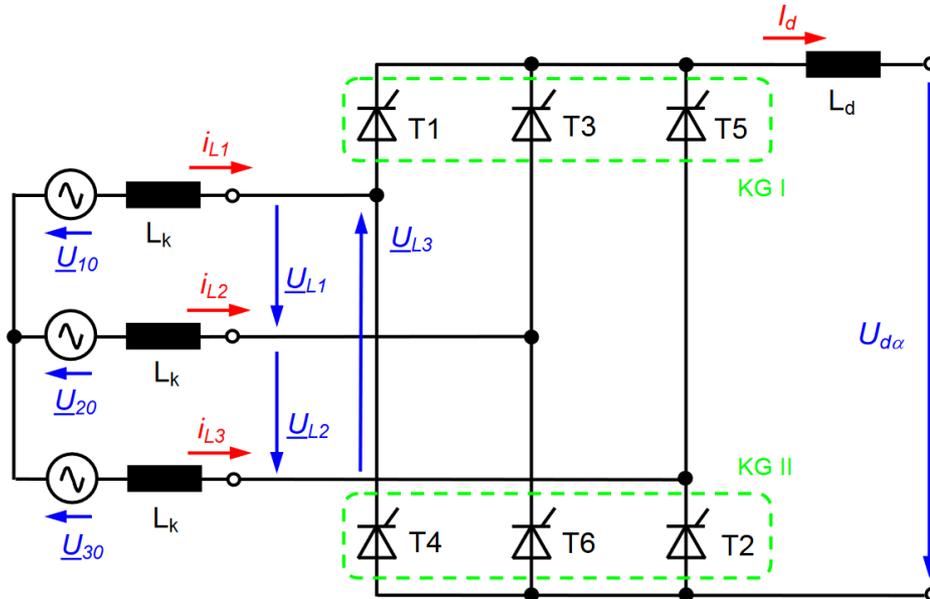


Es leiten die Thyristoren	$U_{d\alpha} =$
T1 und T2	$-u_{L3}(t)$
T2 und T3	$u_{L2}(t)$
T3 und T4	$-u_{L1}(t)$
T4 und T5	$u_{L3}(t)$
T5 und T6	$-u_{L2}(t)$
T6 und T1	$u_{L1}(t)$

Wie viele verschiedene Spannungen können durch die Thyristoren eingestellt werden?

→ 6

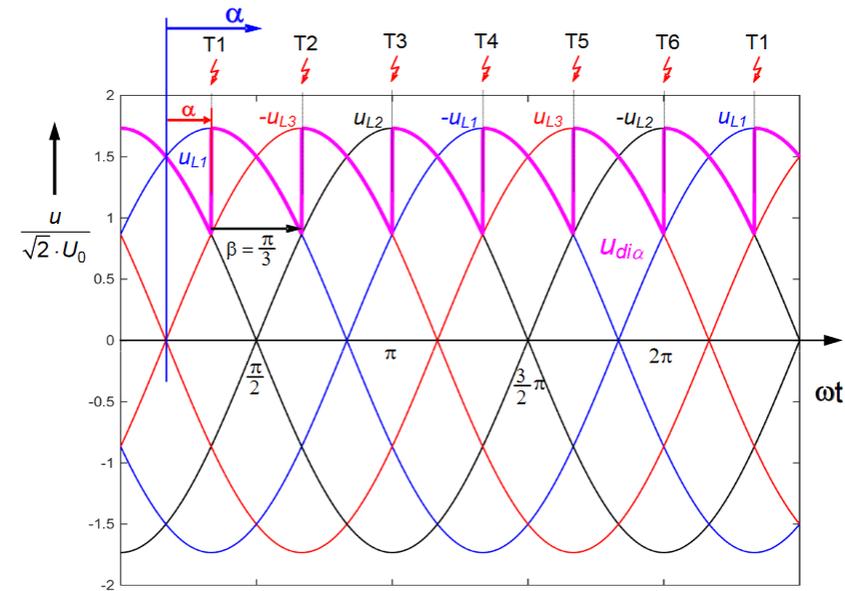
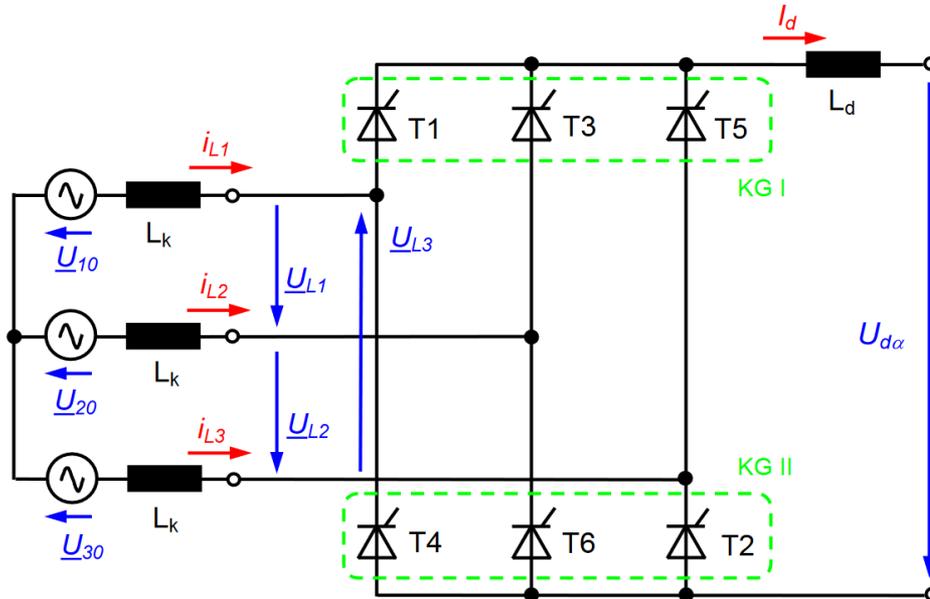
Netzgeführter Umrichter – Funktion



Wie viele verschiedene Spannungen können durch die Thyristoren eingestellt werden?

→ 6

Netzgeführter Umrichter – Funktion



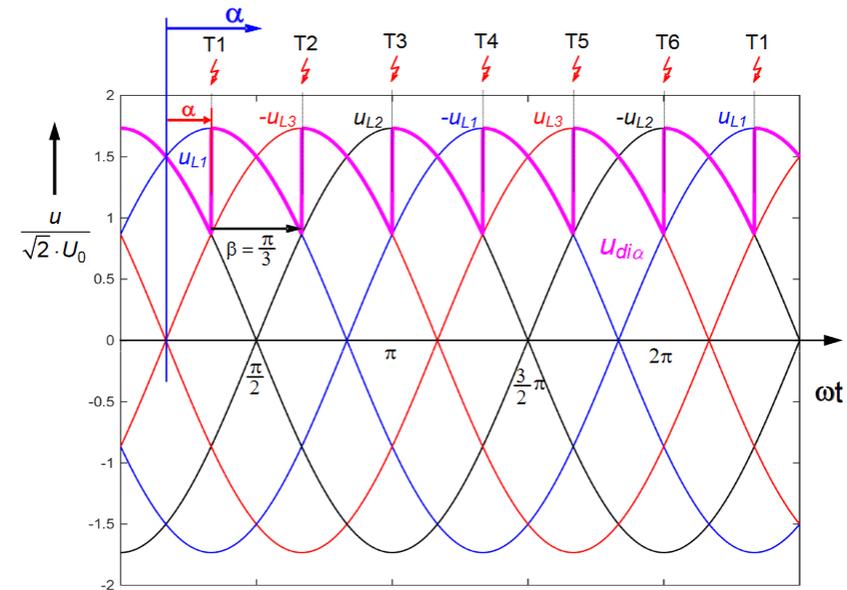
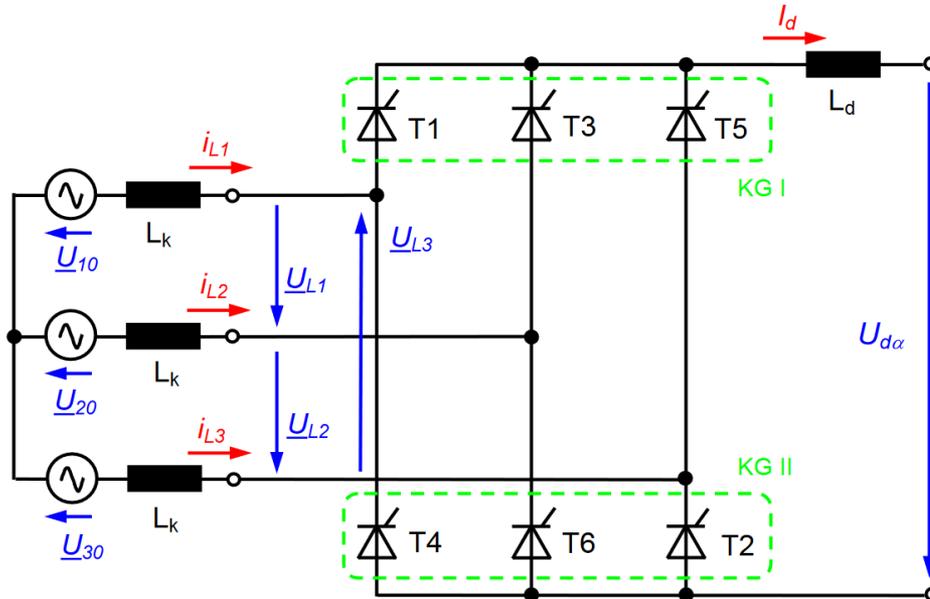
Wie viele verschiedene Spannungen können durch die Thyristoren eingestellt werden?

→ 6

Erkennbar:

Je größer α , desto kleiner $U_{d\alpha}$

Netzgeführter Umrichter – Funktion



$$U_{di\alpha} \approx 1,35 \cdot U_L \cdot \cos(\alpha) = U_{di} \cdot \cos(\alpha)$$

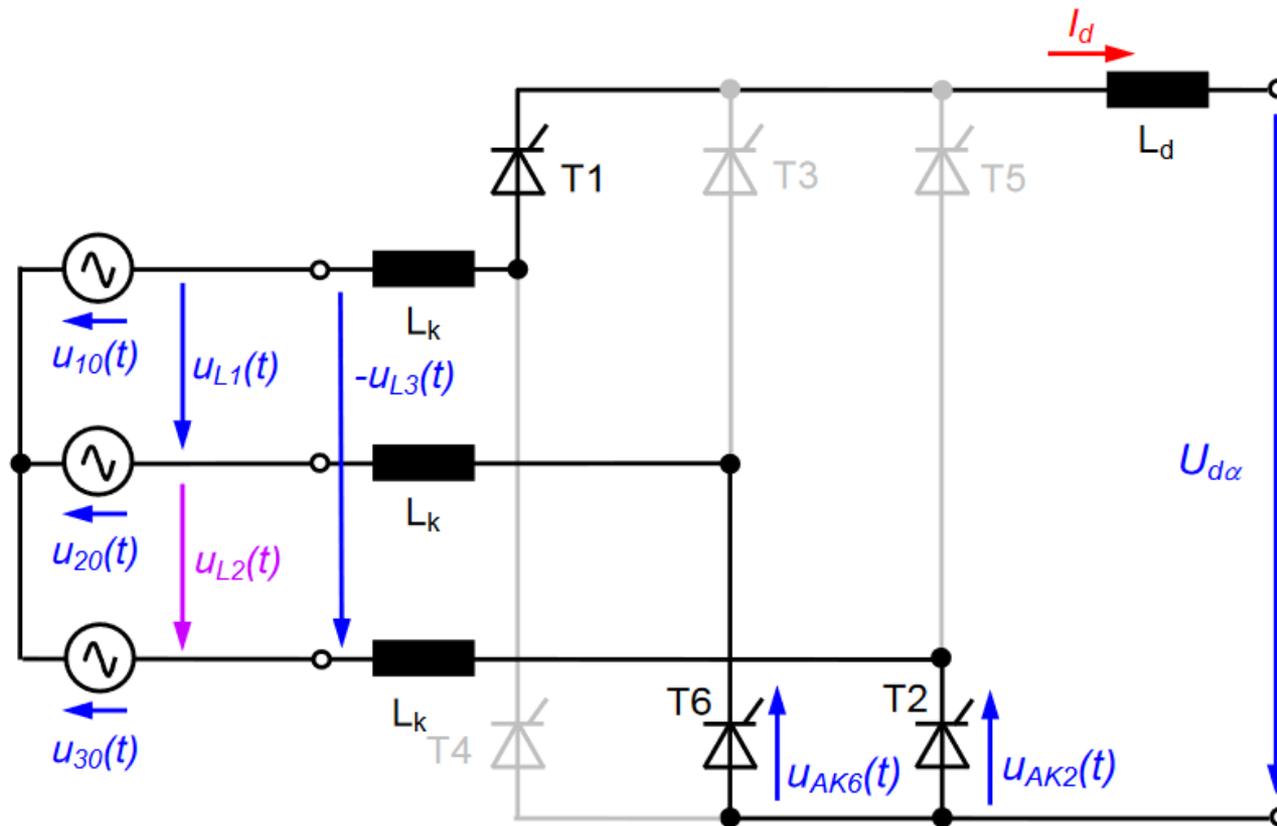
Themen 3. Übung EÜN

- Hochspannungsgleichstromübertragung
 - Einsatzgebiete
 - Derzeitiger Stand in Europa
 - Planungen in Deutschland

- Netzgeführter Umrichter
 - Aufbau
 - Funktion
 - **Kommutierungsvorgang**
 - Ersatzschaltbild
 - Betrieb

- Aufgaben

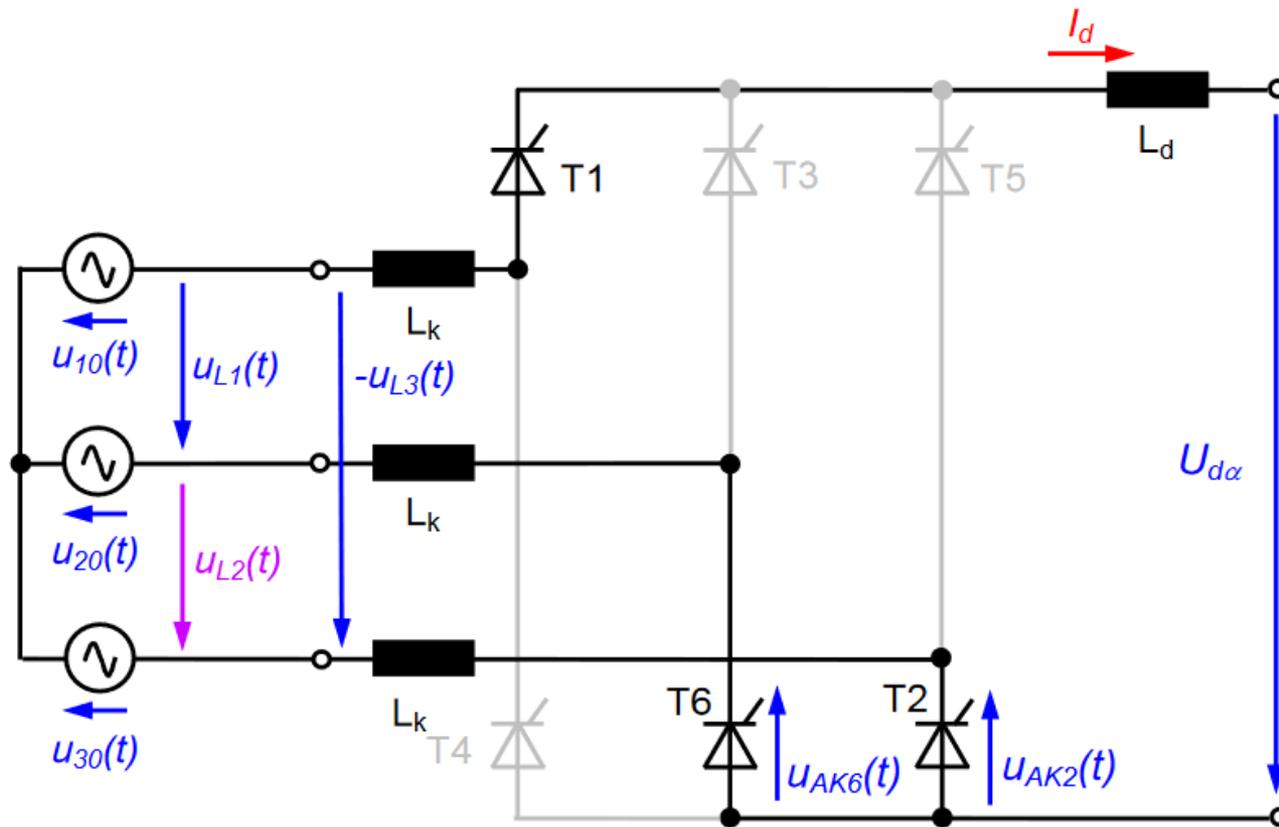
Netzgeführter Umrichter – Kommutierungsvorgang



Übergang von
T6 auf T2.

Annahme:
 I_d konstant

Netzgeführter Umrichter – Kommutierungsvorgang



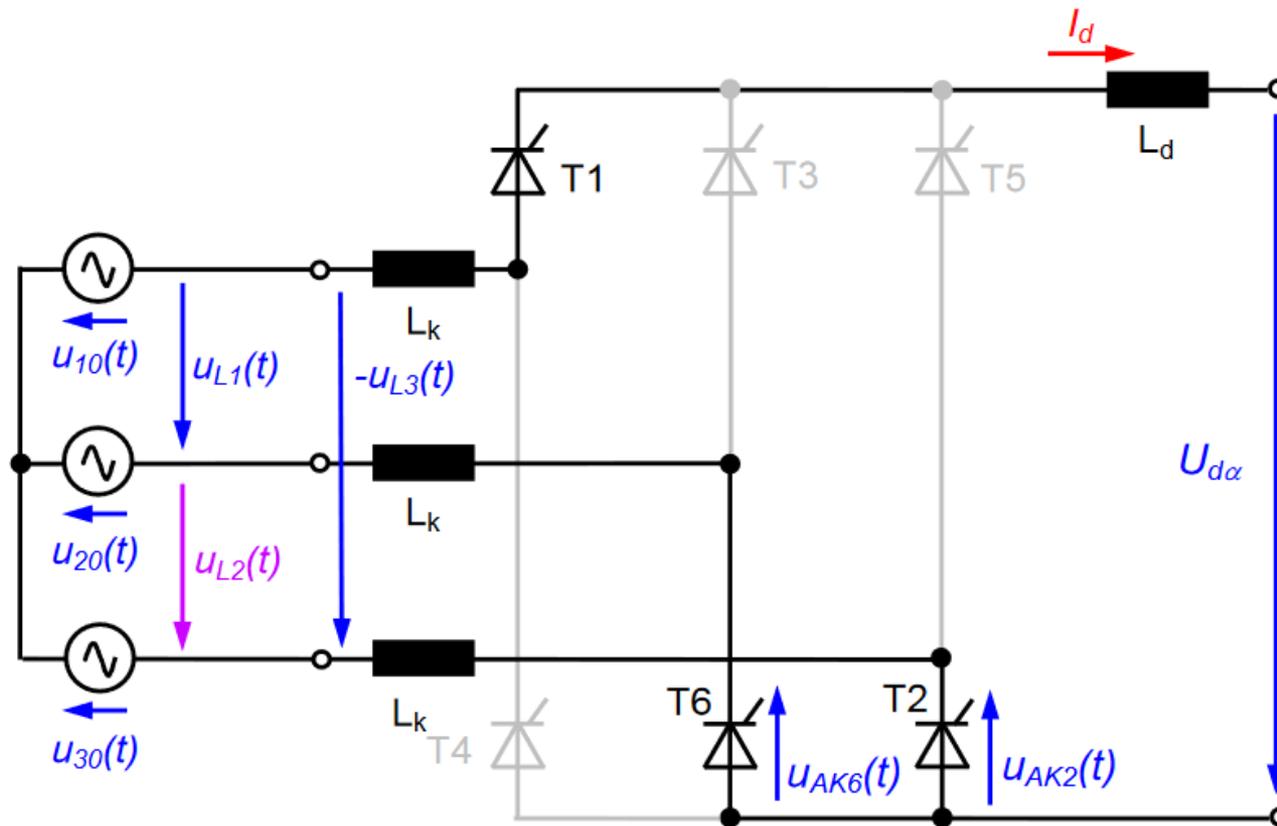
Übergang von T6 auf T2.

Annahme:
 I_d konstant

$$\frac{di_{T2}}{dt} = \frac{u_{20} - u_{30}}{2L_k} = \frac{u_{L2}}{2L_k}$$

$$\frac{di_{T6}}{dt} = -\frac{u_{20} - u_{30}}{2L_k} = -\frac{u_{L2}}{2L_k}$$

Netzgeführter Umrichter – Kommutierungsvorgang



Übergang von
T6 auf T2.

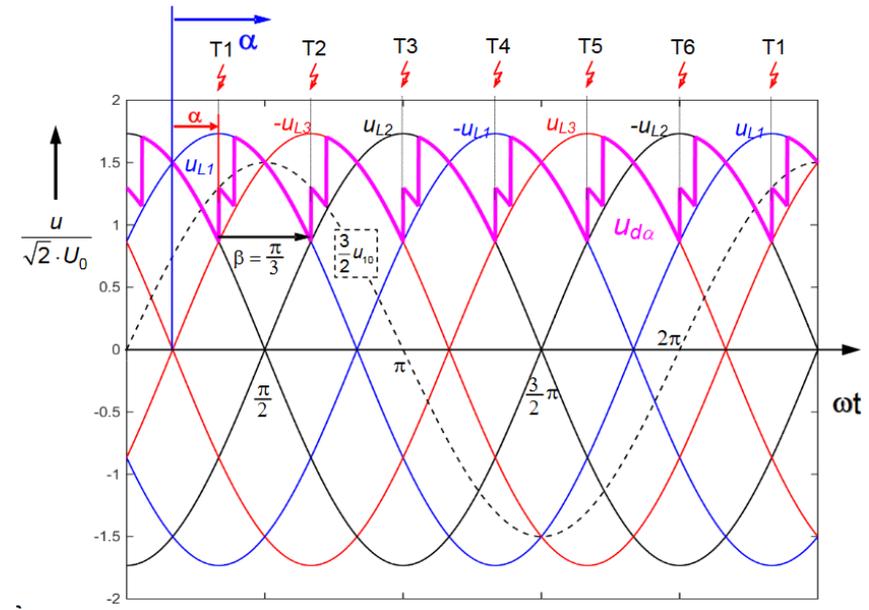
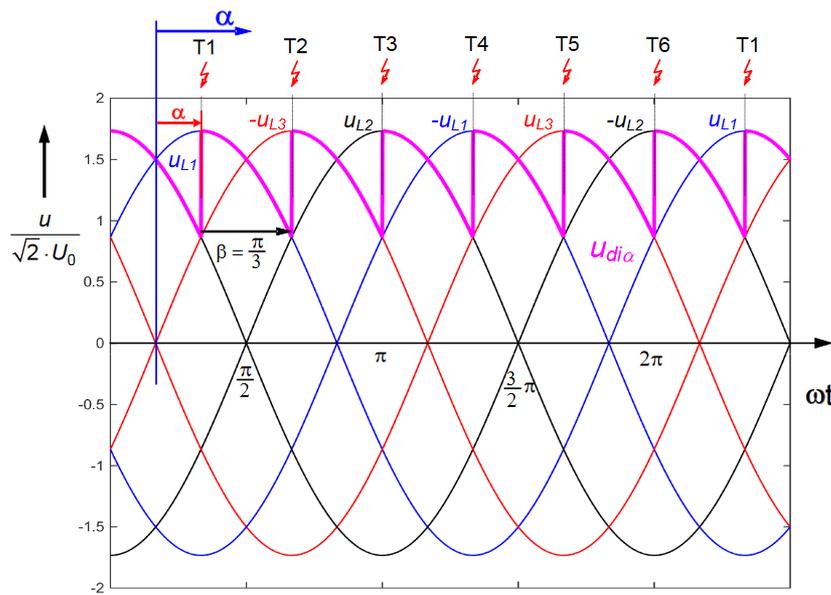
Annahme:
 I_d konstant

$$\frac{di_{T2}}{dt} = \frac{u_{20} - u_{30}}{2L_k} = \frac{u_{L2}}{2L_k}$$

$$\frac{di_{T6}}{dt} = -\frac{u_{20} - u_{30}}{2L_k} = -\frac{u_{L2}}{2L_k}$$

→ I_d und L_k beschränken
Geschwindigkeit der
Kommutierung

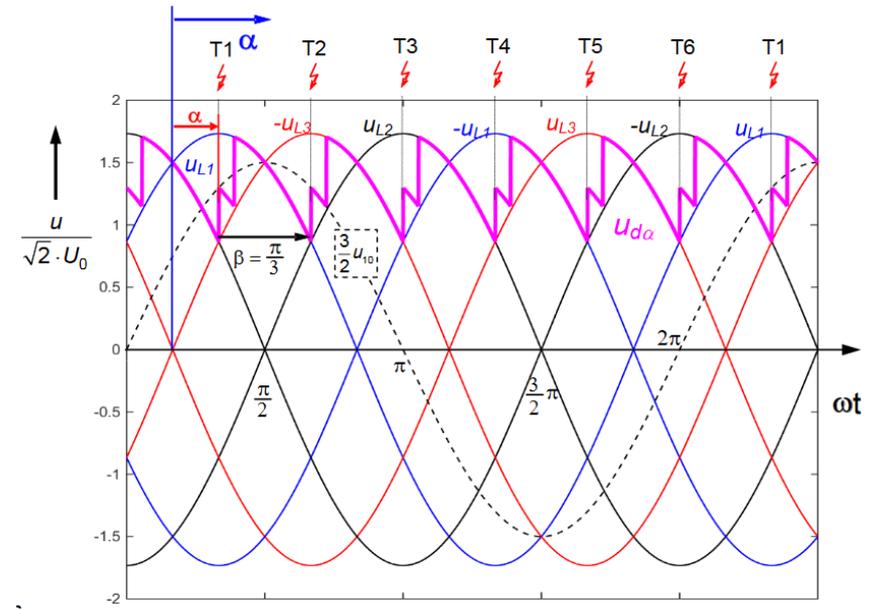
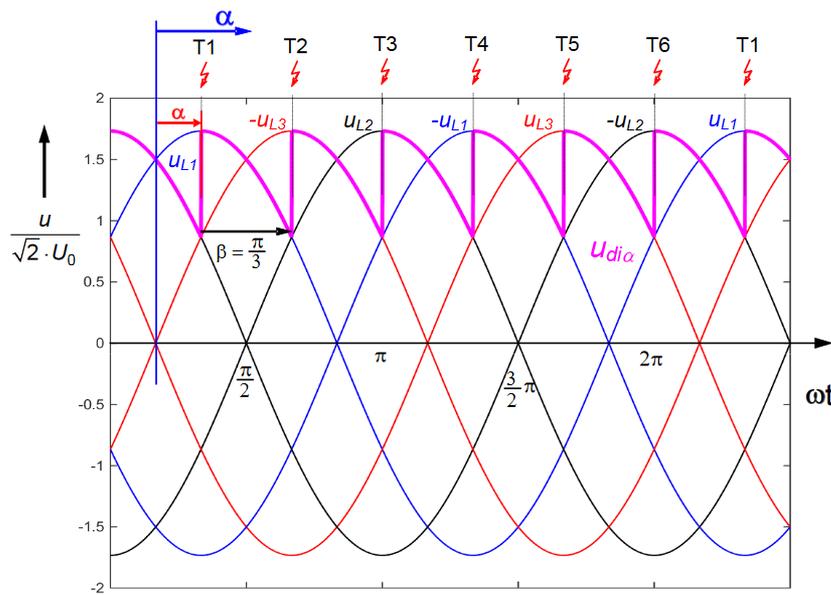
Netzgeführter Umrichter – Kommutierungsvorgang



Durchschnittliche Spannung wird durch Kommutierungsvorgang verringert.

1. Verringerung Spannung proportional zu Kommutierungsdauer
2. Kommutierungsdauer proportional zu Strom I_d

Netzgeführter Umrichter – Kommutierungsvorgang



Durchschnittliche Spannung wird durch Kommutierungsvorgang verringert.

1. Verringerung Spannung proportional zu Kommutierungsdauer
2. Kommutierungsdauer proportional zu Strom I_d

→ Verringerung Spannung proportional zu Strom → **Ohmsches Verhalten**

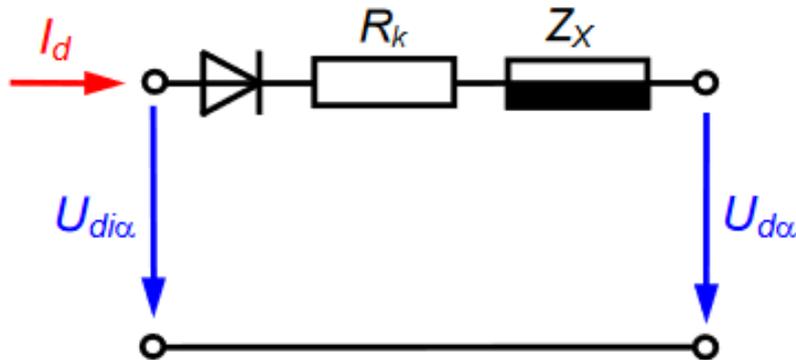
Themen 3. Übung EÜN

- Hochspannungsgleichstromübertragung
 - Einsatzgebiete
 - Derzeitiger Stand in Europa
 - Planungen in Deutschland

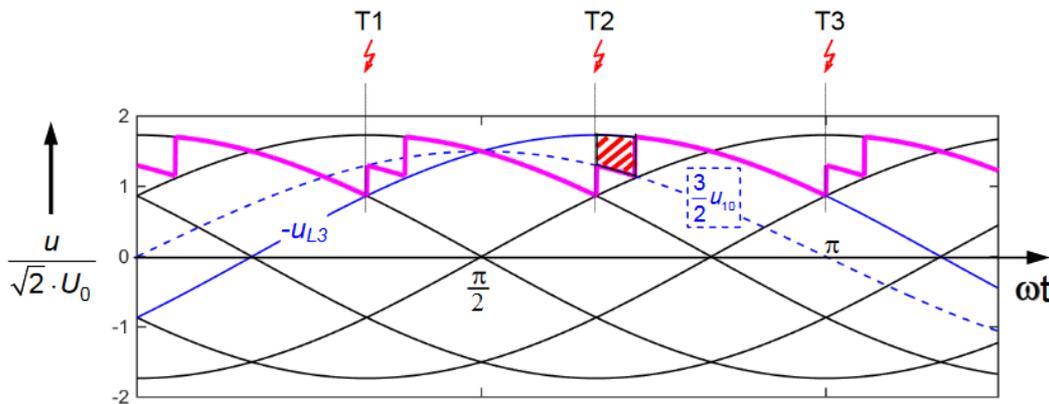
- Netzgeführter Umrichter
 - Aufbau
 - Funktion
 - Kommutierungsvorgang
 - **Ersatzschaltbild**
 - Betrieb

- Aufgaben

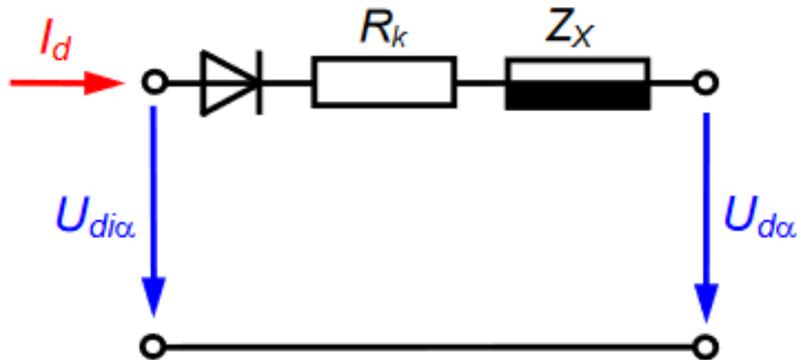
Netzgeführter Stromrichter – Ersatzschaltbild



- R_k simuliert ohmsche Verluste in Bauteilen
- Z_k simuliert Spannungsverlust aufgrund der Kommutierung
- Keine Wirkleistung wird umgesetzt (ähnlich wie Induktivität)
- Spannungsabfall proportional zum Strom (ähnlich wie ohmscher Widerstand)



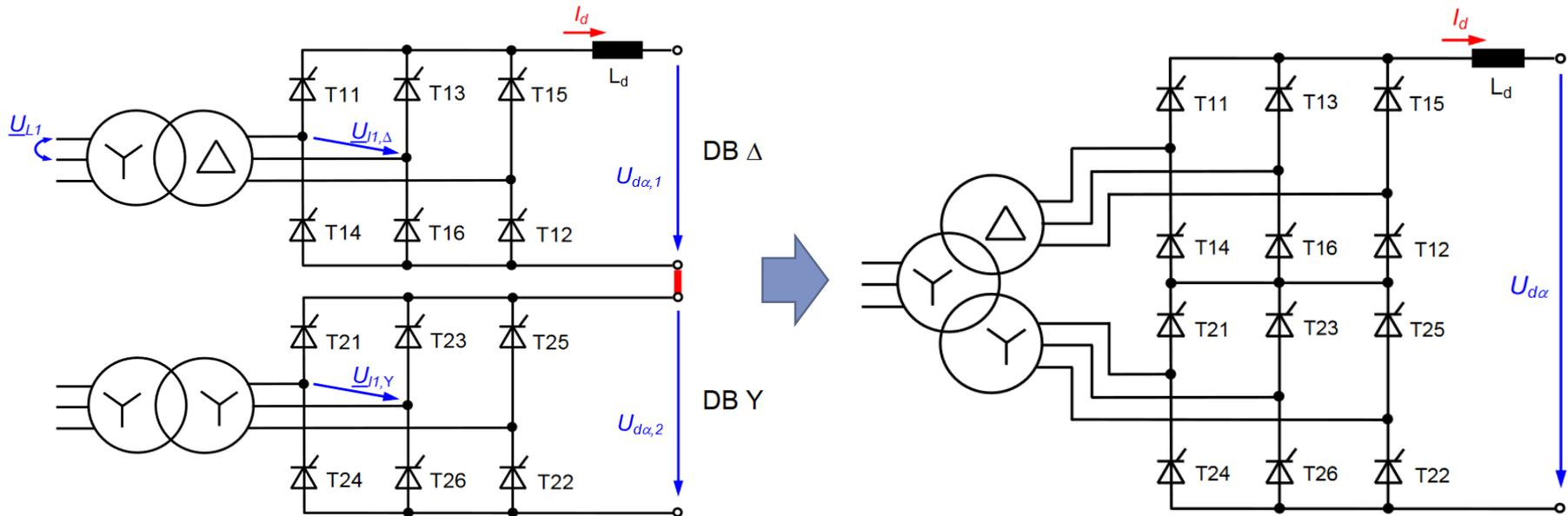
Netzgeführter Stromrichter – Ersatzschaltbild



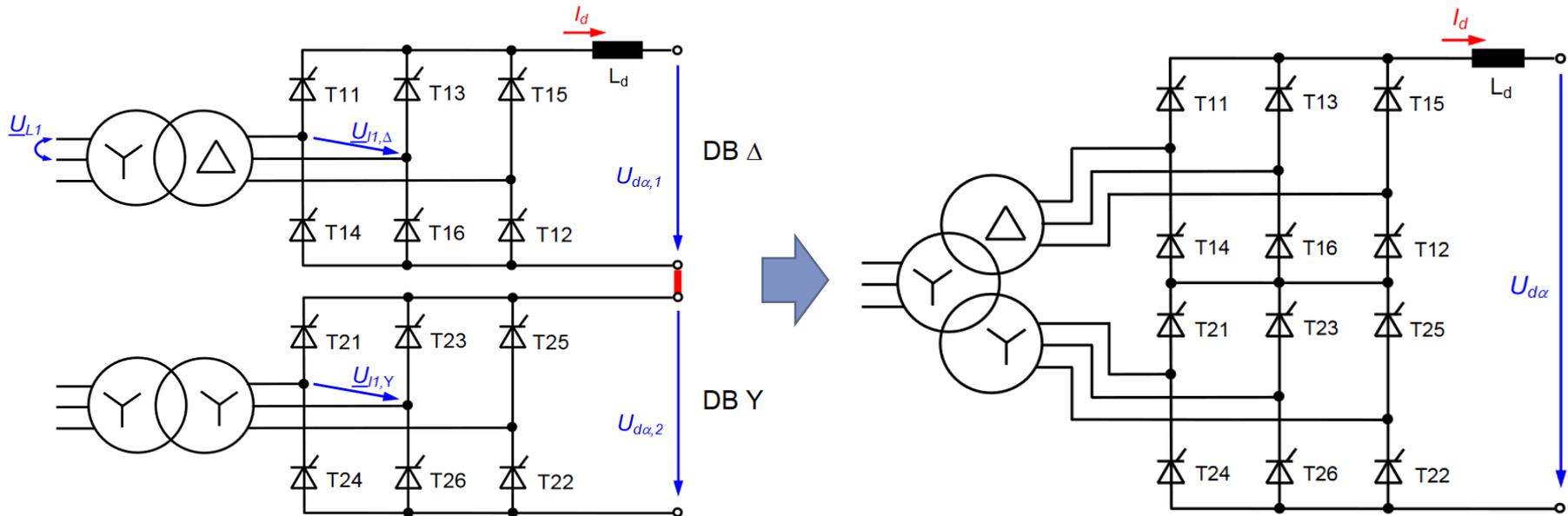
$$Z_X = p \cdot f \cdot L_k \quad , \quad p = \text{Pulszahl}$$

- R_k simuliert ohmsche Verluste in Bauteilen
- Z_k simuliert Spannungsverlust aufgrund der Kommutierung
 - Keine Wirkleistung wird umgesetzt (ähnlich wie Induktivität)
 - Spannungsabfall proportional zum Strom (ähnlich wie ohmscher Widerstand)

Netzgeführte Stromrichter – 12-pulsige Stromrichtergruppe



Netzgeführte Stromrichter – 12-pulsige Stromrichtergruppe

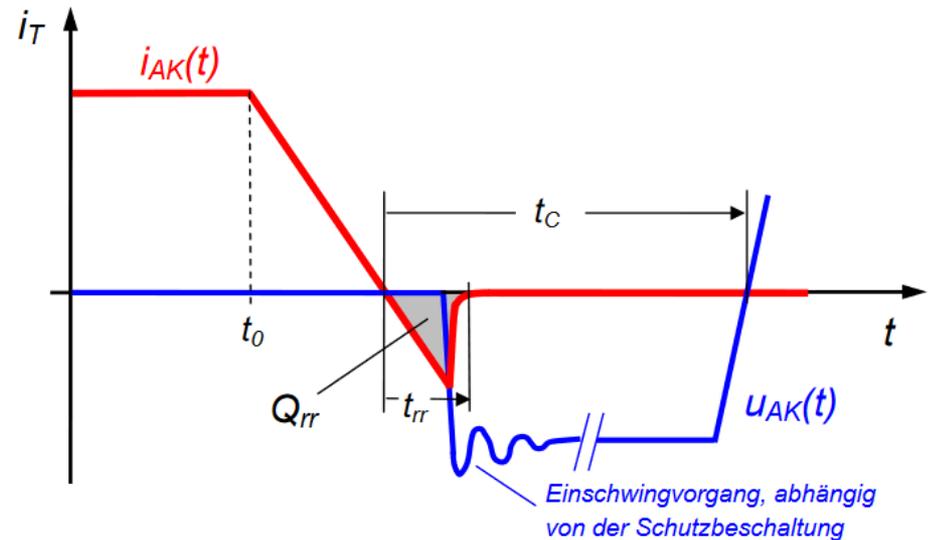


Zwei 6-pulsige Stromrichter bilden durch Verschaltung einen 12-pulsigen Stromrichter.

Vorteil: Feinere Spannungsstufen einstellbar → **Weniger Oberschwingungen**

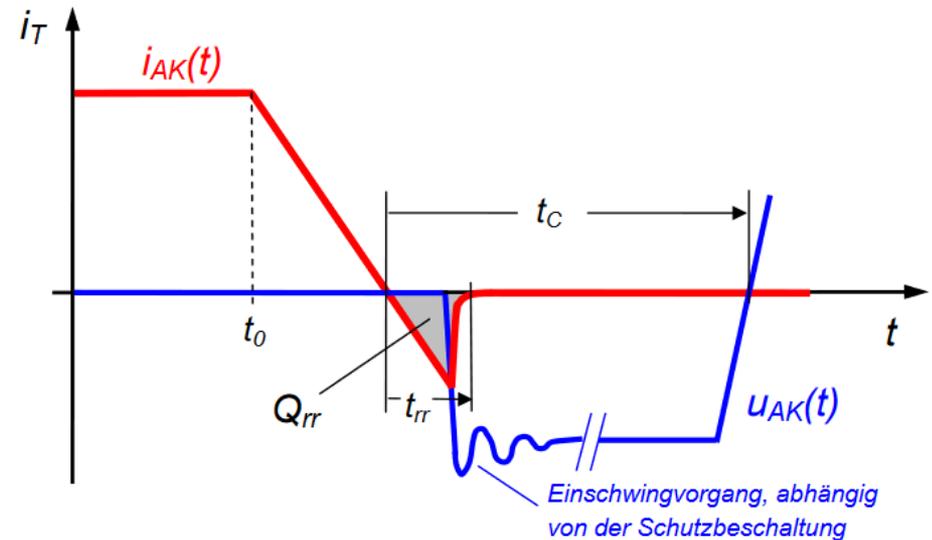
Netzgeführte Stromrichter – Dynamisches Verhalten eines Thyristors

1. Kommutierung beginnt
2. Strom nimmt ab
3. Strom wird kurzzeitig negativ (Sperrverzugsladung ausräumen)
4. Nach der Schonzeit t_c muss der Thyristor eine positive Spannung sperren



Netzgeführte Stromrichter – Dynamisches Verhalten eines Thyristors

1. Kommutierung beginnt
2. Strom nimmt ab
3. Strom wird kurzzeitig negativ (Sperrverzugsladung ausräumen)
4. Nach der Schonzeit t_c **muss** der Thyristor eine positive Spannung sperren

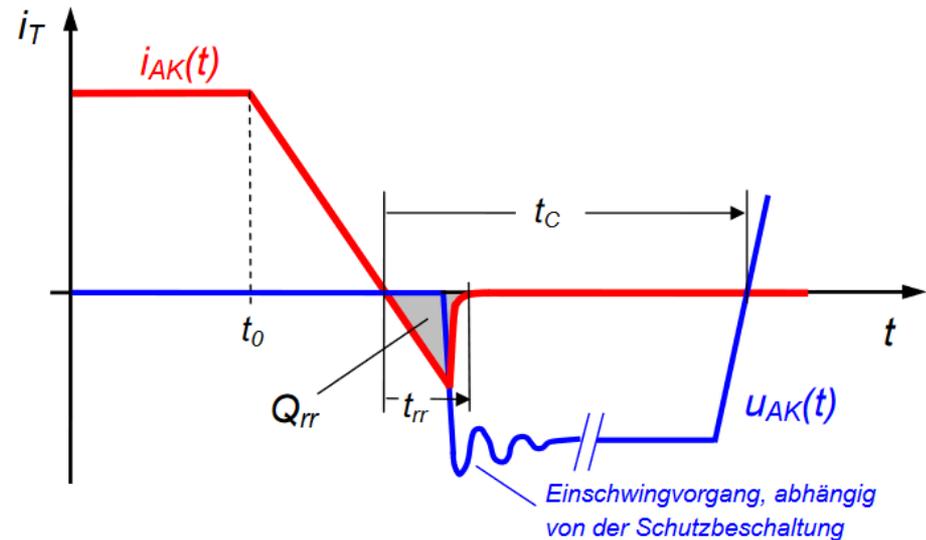


Die Freiwerdezeit t_q beschreibt, ab wann der Thyristor wieder eine positive Spannung sperren **kann**.

Für den Betrieb muss also gelten:

Netzgeführte Stromrichter – Dynamisches Verhalten eines Thyristors

1. Kommutierung beginnt
2. Strom nimmt ab
3. Strom wird kurzzeitig negativ (Sperrverzugsladung ausräumen)
4. Nach der Schonzeit t_c **muss** der Thyristor eine positive Spannung sperren



Die Freiwerdezeit t_q beschreibt, ab wann der Thyristor wieder eine positive Spannung sperren **kann**.

Für den Betrieb muss also gelten: $t_c > t_q$

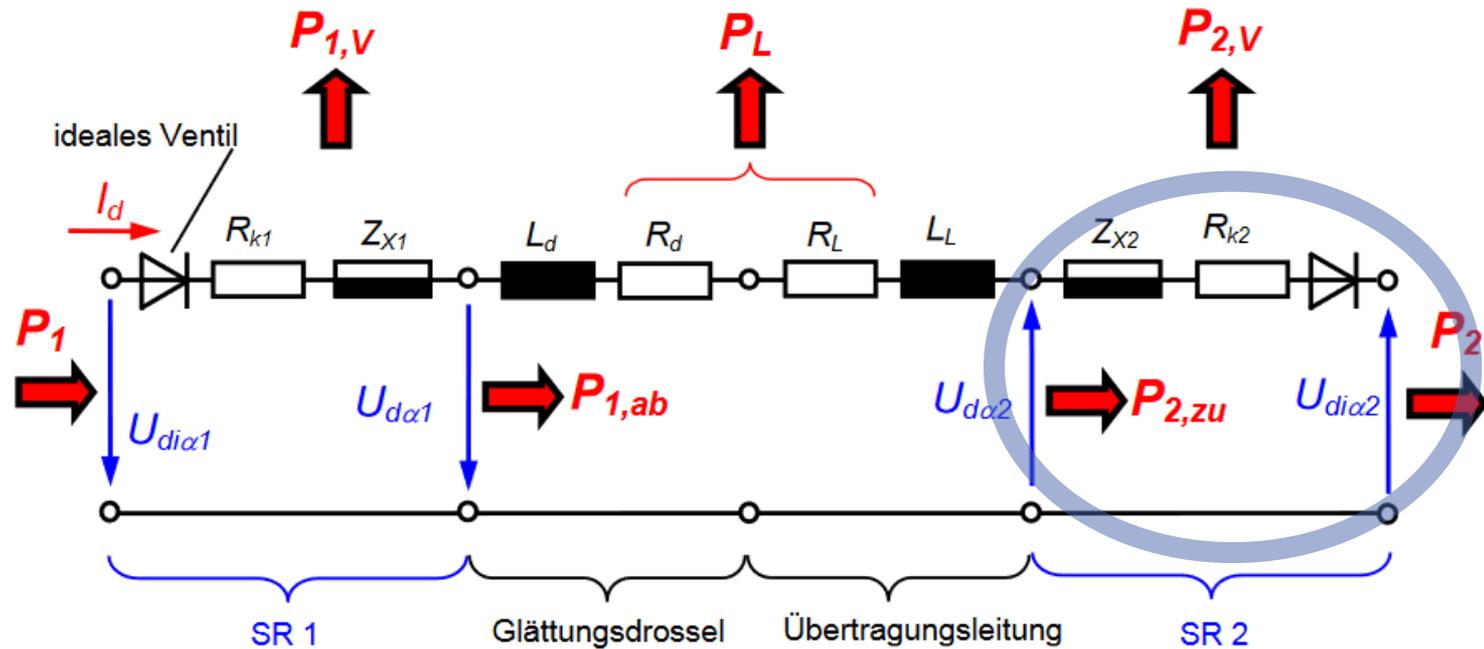
Themen 3. Übung EÜN

- Hochspannungsgleichstromübertragung
 - Einsatzgebiete
 - Derzeitiger Stand in Europa
 - Planungen in Deutschland

- Netzgeführter Umrichter
 - Aufbau
 - Funktion
 - Kommutierungsvorgang
 - Ersatzschaltbild
 - **Betrieb**

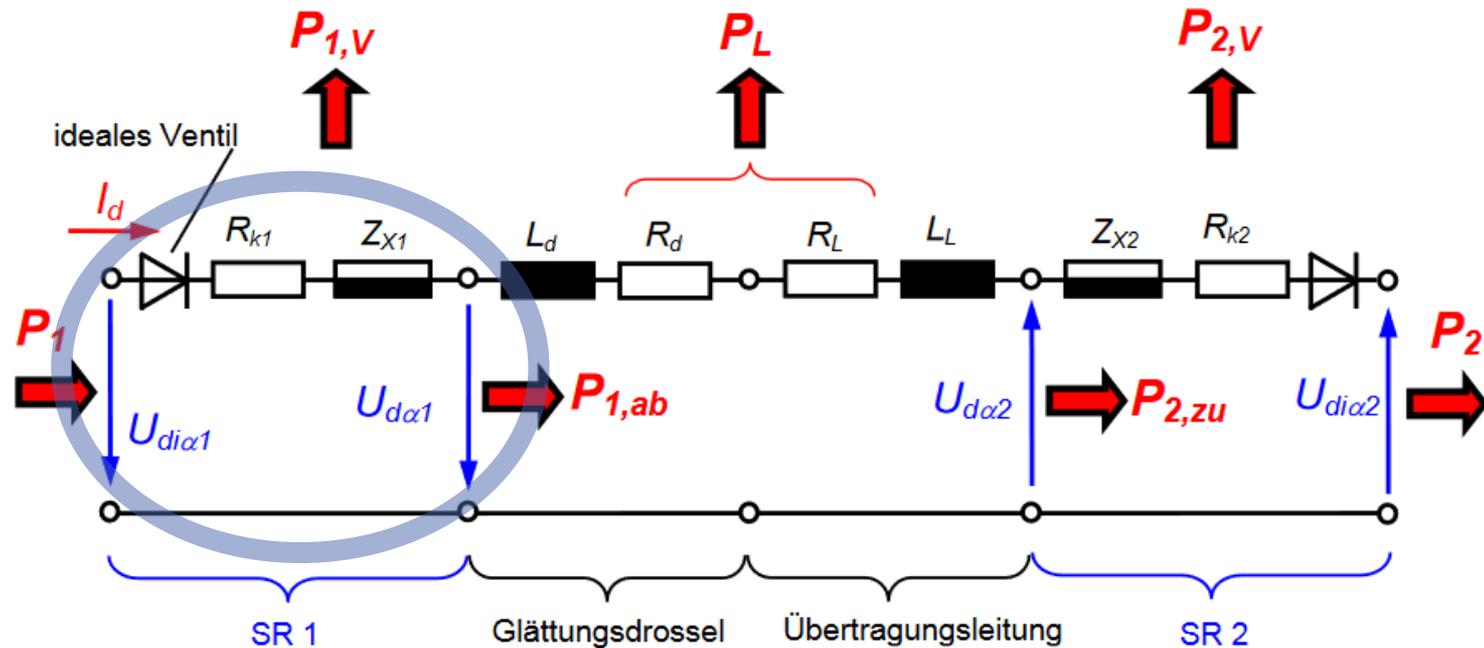
- Aufgaben

Netzgeführter Stromrichter – Betrieb einer HGÜ



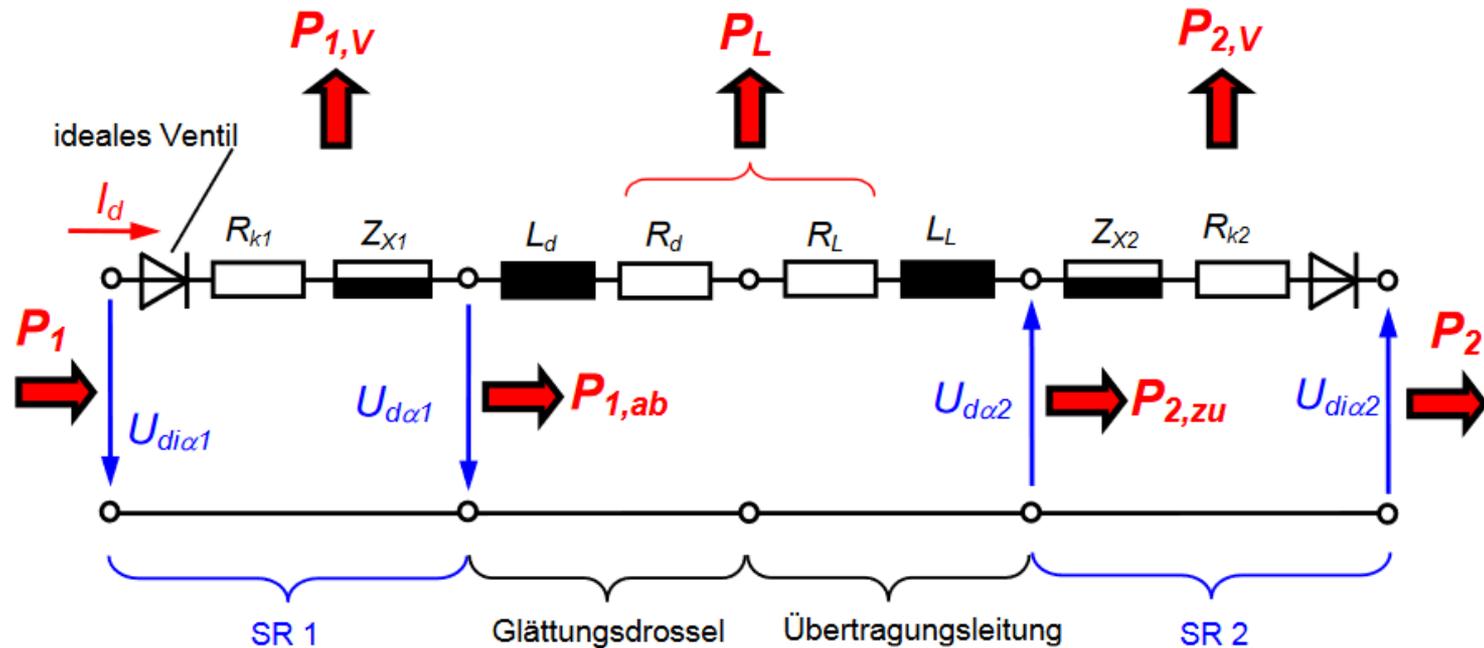
- **Wechselrichter:** übernimmt Spannungsregelung

Netzgeführter Stromrichter – Betrieb einer HGÜ



- Wechselrichter: übernimmt Spannungsregelung
- Gleichrichter: übernimmt Leistungsregelung bzw. Stromregelung

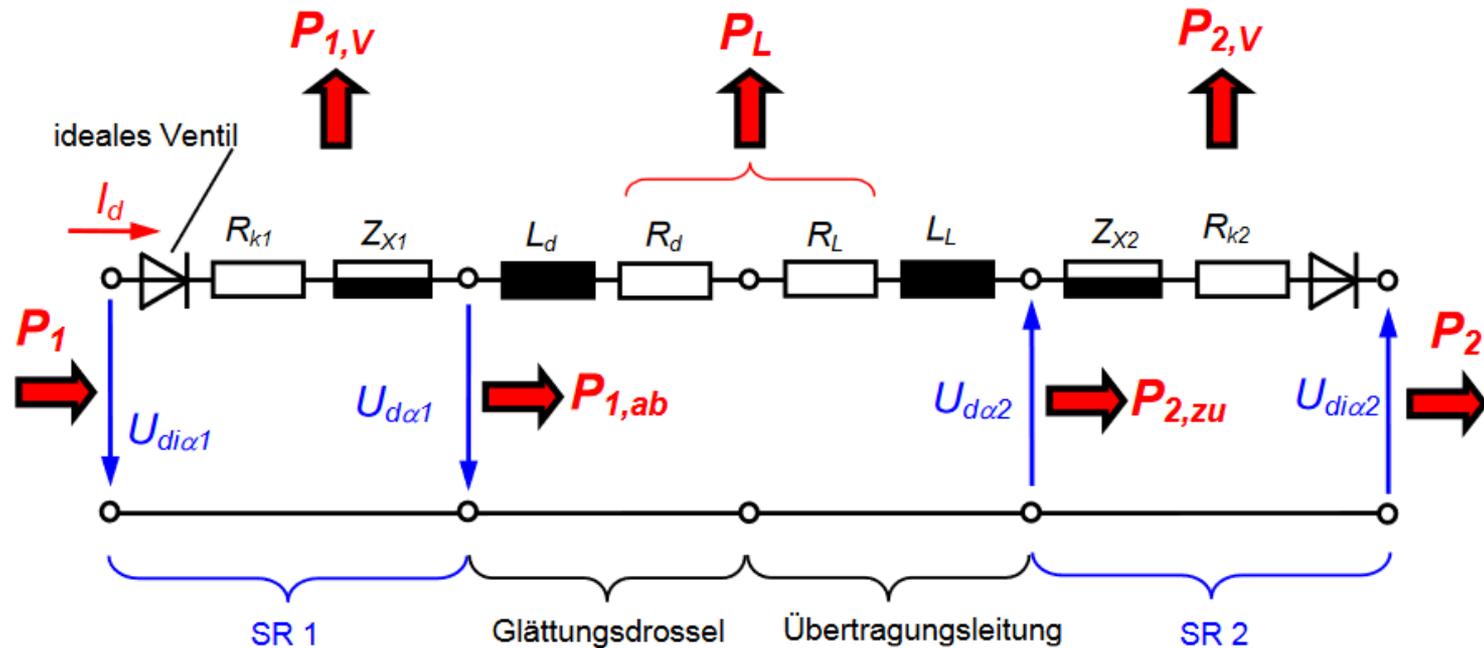
Netzgeführter Stromrichter – Betrieb einer HGÜ



Gedankenexperiment:

$U_{d\alpha 1}$ und $U_{d\alpha 2}$ seien genau gleich groß. Jetzt nimmt $U_{d\alpha 2}$ kontinuierlich ab bis auf 0V. Wie verläuft die Leistung P_2 ?

Netzgeführter Stromrichter – Betrieb einer HGÜ



Gedankenexperiment:

$U_{d\alpha 1}$ und $U_{d\alpha 2}$ seien genau gleich groß. Jetzt nimmt $U_{d\alpha 2}$ kontinuierlich ab bis auf 0V. Wie verläuft die Leistung P_2 ?

→ Leistung ist zu Beginn 0W. Steigt auf ein Maximum. Sinkt wieder auf 0W.

Themen 3. Übung EÜN

- Hochspannungsgleichstromübertragung
 - Einsatzgebiete
 - Derzeitiger Stand in Europa
 - Planungen in Deutschland

- Netzgeführter Umrichter
 - Aufbau
 - Funktion
 - Kommutierungsvorgang
 - Ersatzschaltbild
 - Betrieb

- **Aufgaben**