



Technische  
Universität  
Braunschweig

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



# Grundlagen der Energietechnik

## Teil 3: Grundlagen der Leistungselektronik

Vorlesung (4)

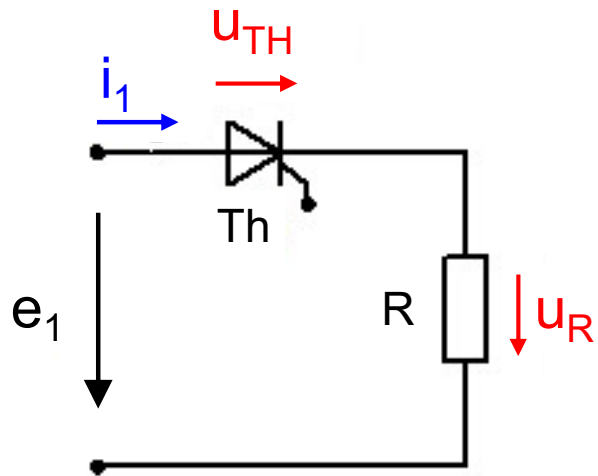
Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz

Institut für Elektrischen Maschinen, Antriebe und Bahnen - IMAB

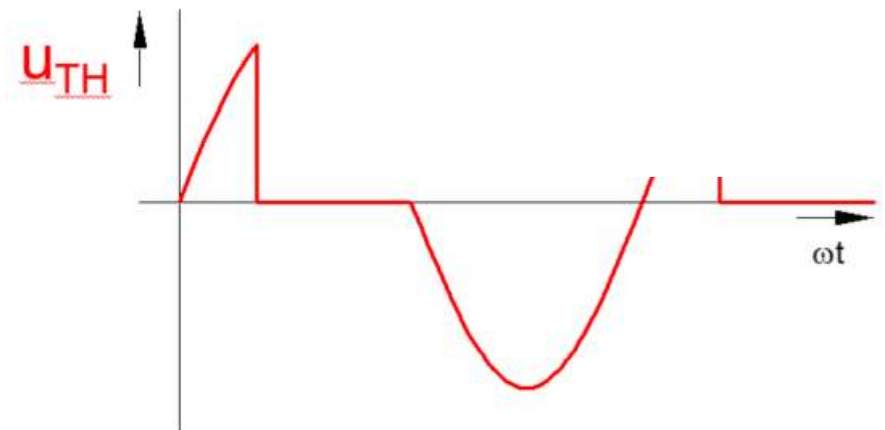
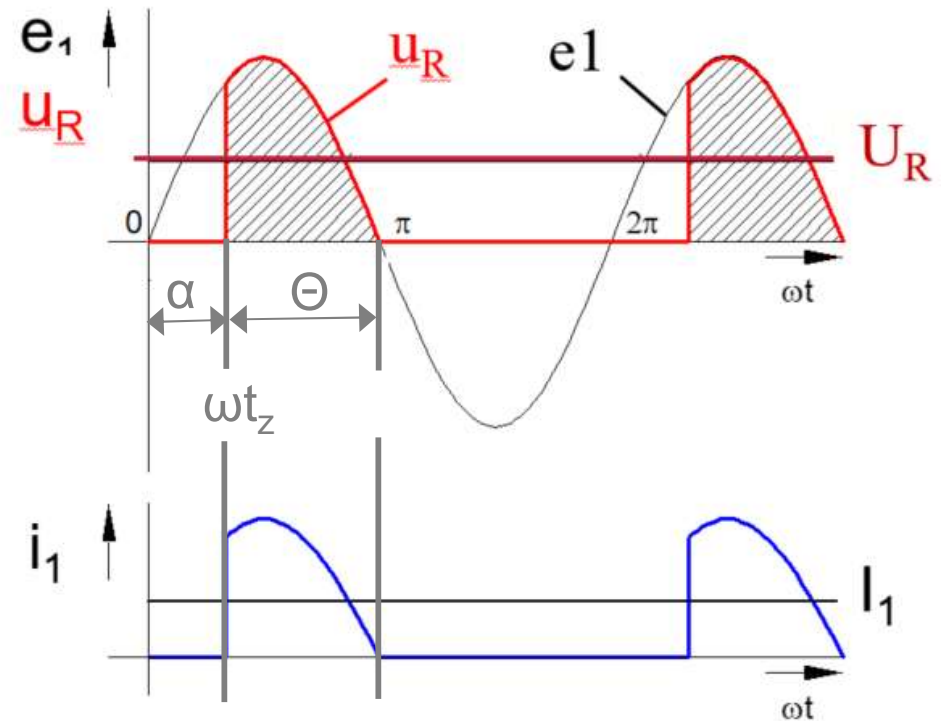
# Was machen wir heute ?

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)

# M1C – Schaltung mit ohmscher Last



- Zündwinkel (auch: Steuerwinkel):  $\alpha$
- Stromflusswinkel:  $\Theta$



# M1C – Schaltung mit ohmscher Last

- mittlere Gleichspannung:

$$\bar{U}_d = \frac{\hat{E}_1}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$

- mittlerer Gleichstrom:

$$\bar{I}_d = \frac{\bar{U}_d}{R_1}$$

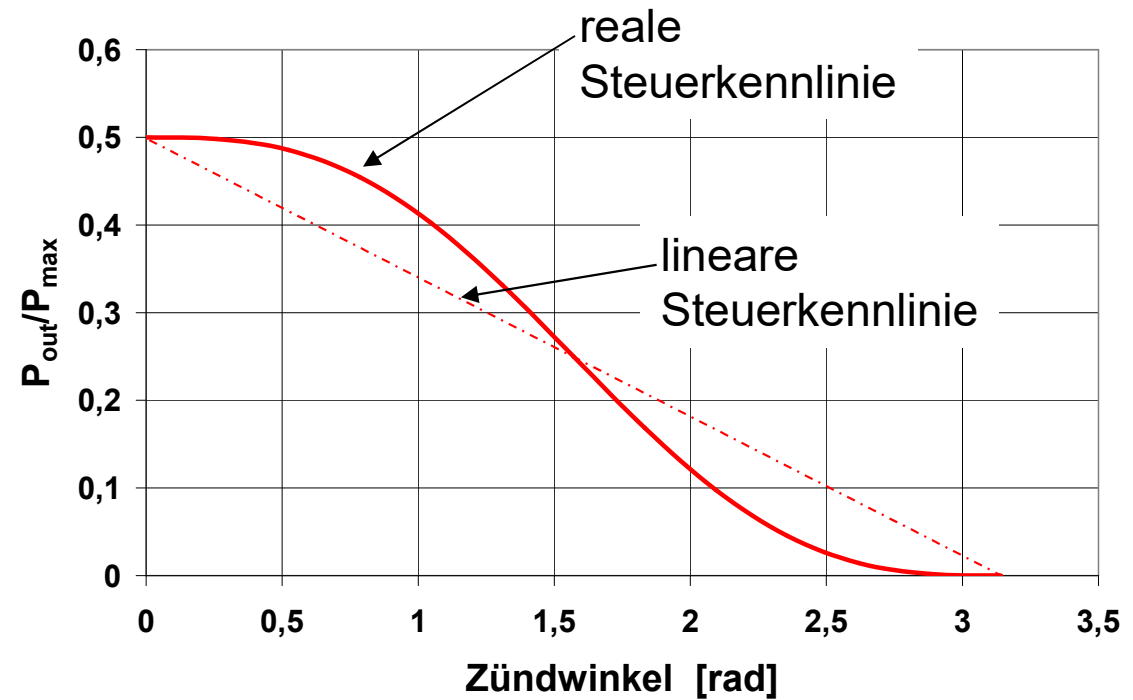
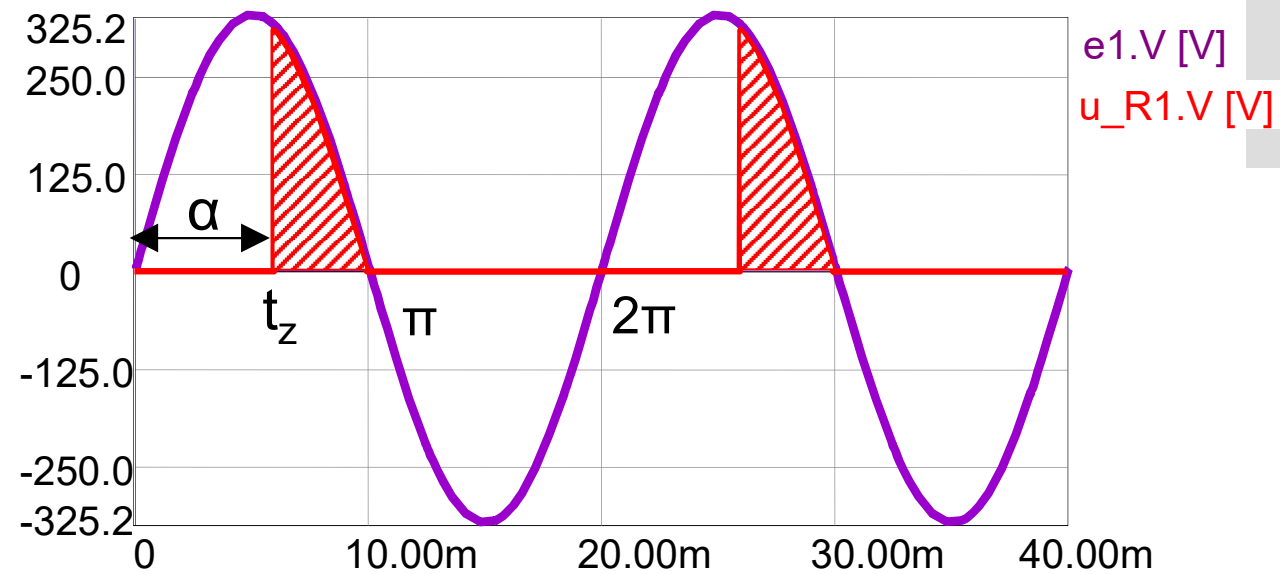
- Wirkleistung:

$$P = \frac{E^2}{\pi \cdot R_1} \left( \frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right)$$

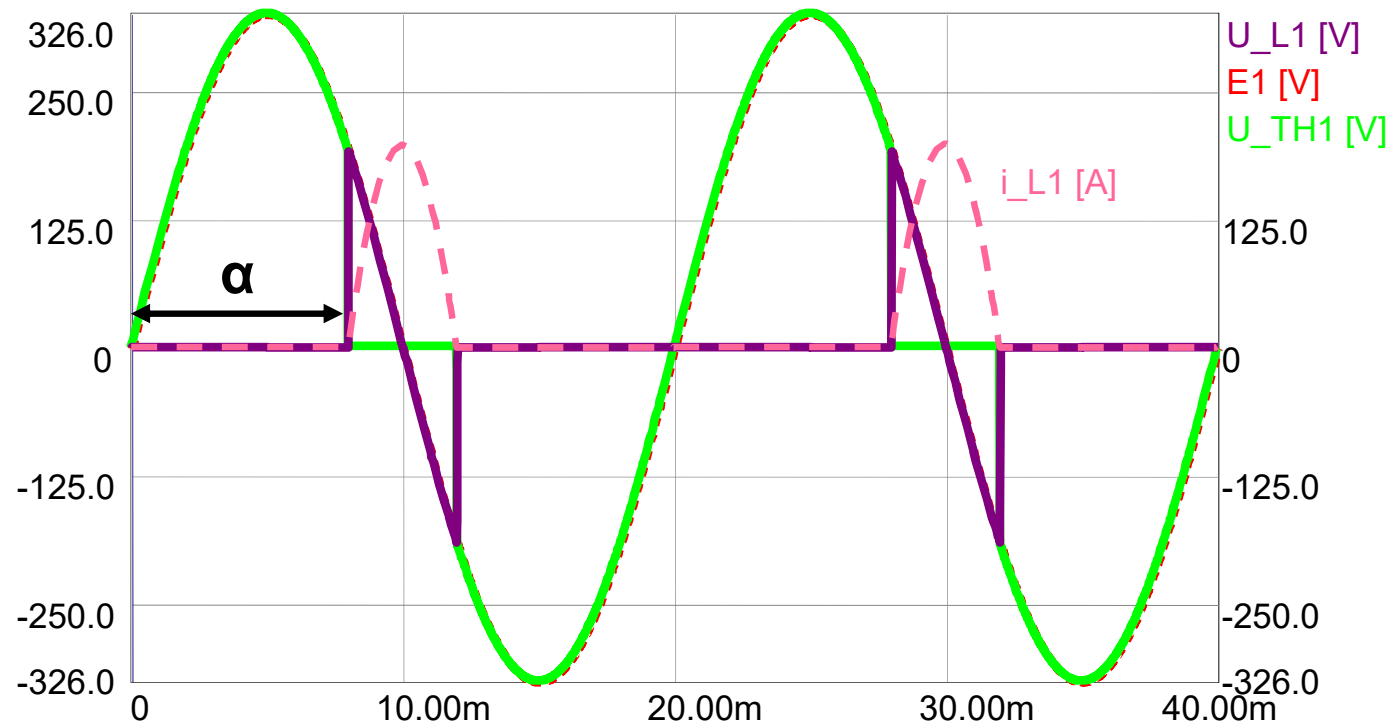
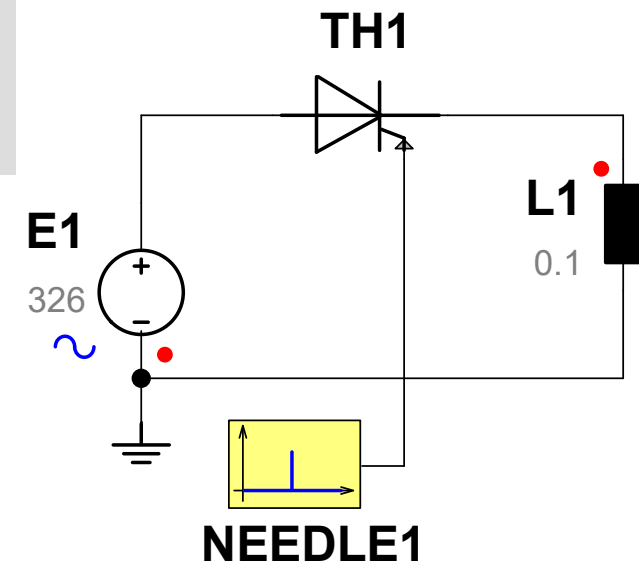
$$\frac{P}{P_{\max}} = \frac{P}{\frac{E^2}{R_1}} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right)$$

# M1C – Schaltung mit ohmscher Last

$$\frac{P}{P_{\max}} = \frac{P}{\frac{E^2}{R_1}} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right)$$



# M1C mit induktiver Last



# M1C mit induktiver Last

- Drosselstrom:  $i_{L1}(t) = \frac{\hat{e}_1}{\omega L1} \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\omega t))$

- Mittelwert des Drosselstroms:

➤ **Stellkennlinie für L-Last:**

$$I_{d\_wL} = \frac{\sqrt{2}E_1}{\omega L1} \cdot \frac{1}{2\pi} ((2\pi - 2\alpha) \cdot \cos(\alpha) - \sin(2\pi - \alpha) + \sin(\alpha))$$

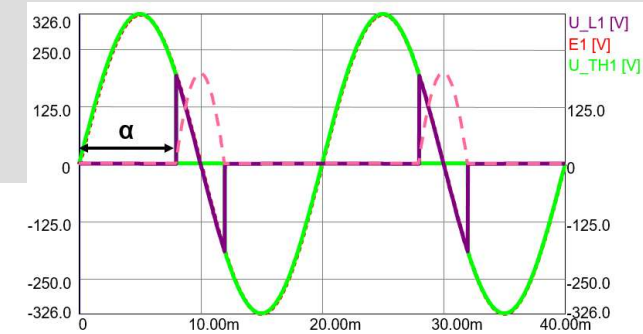
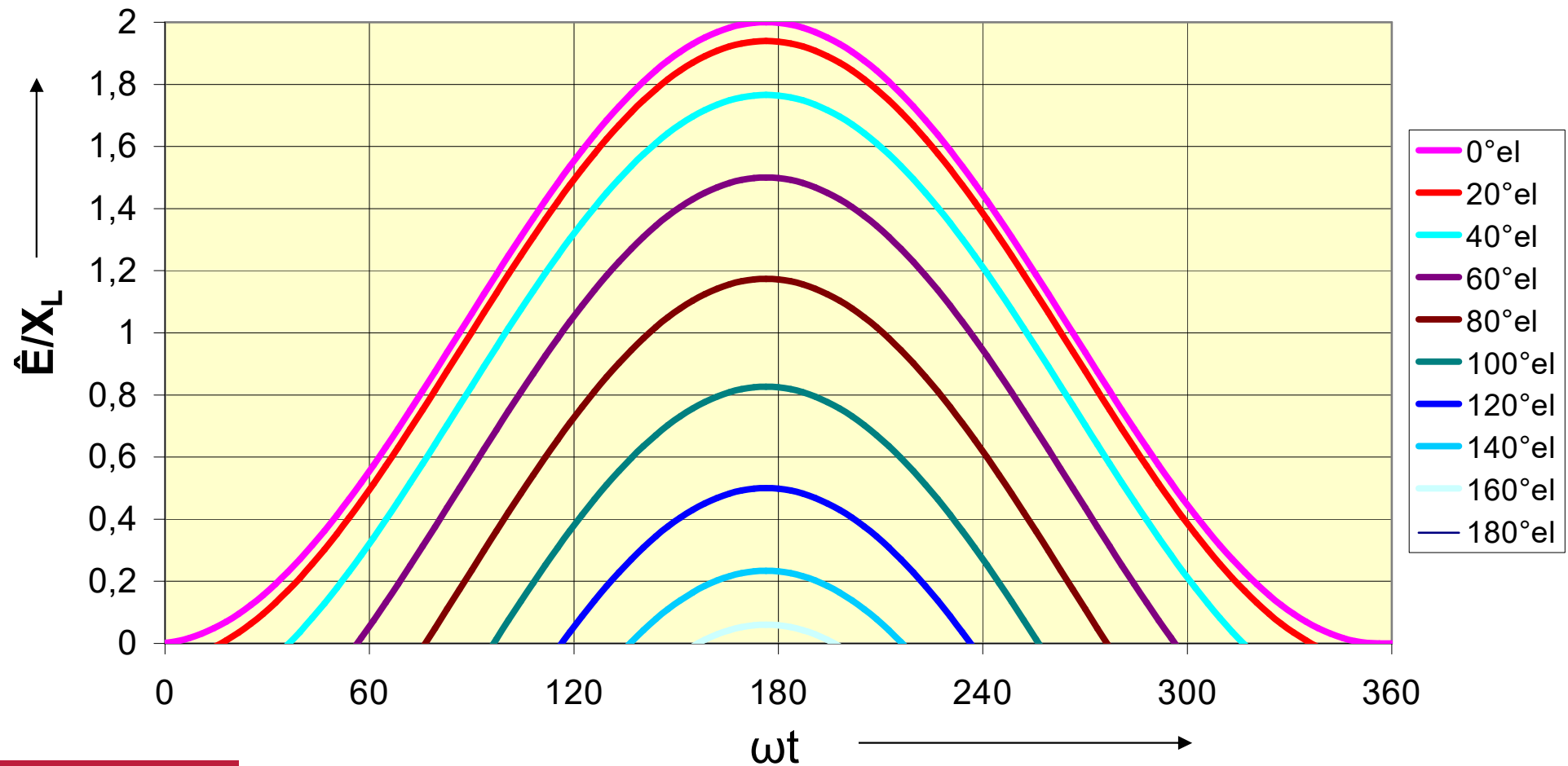
**Zum Vergleich Stellkennlinie bei R-Last:**

$$I_{d\_R} = \frac{\sqrt{2}E_1}{R} \cdot \frac{1}{2\pi} (1 - \cos(\alpha))$$



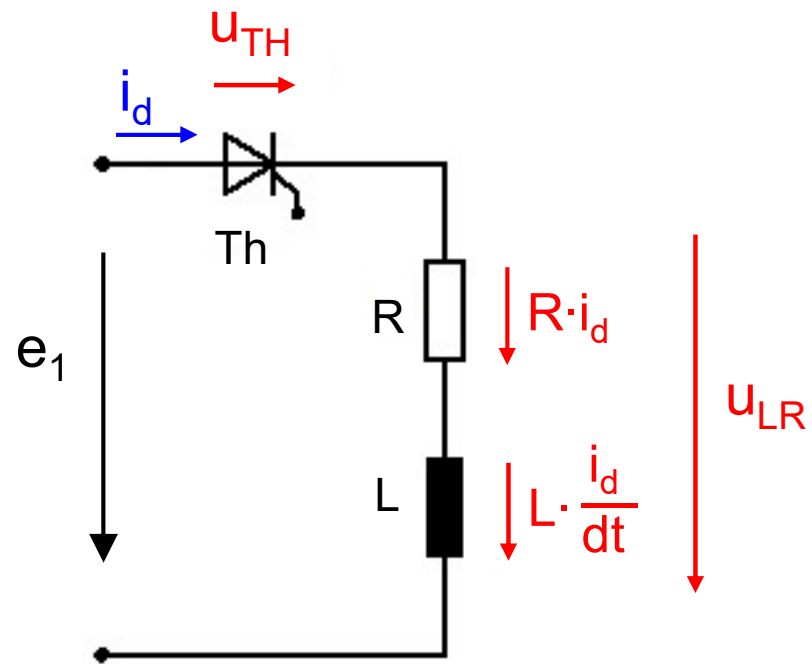
# M1C mit induktiver Last

Stromverläufe für verschiedene Zündwinkel

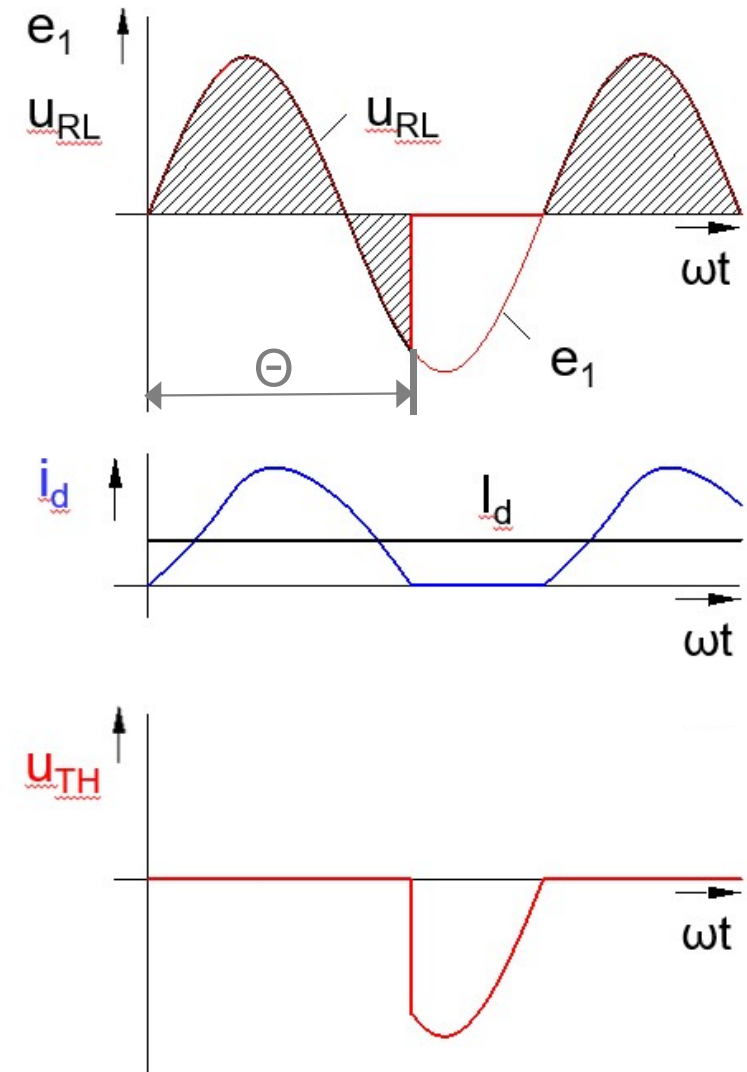




# M1C – Schaltung mit ohmsch-induktiver Last

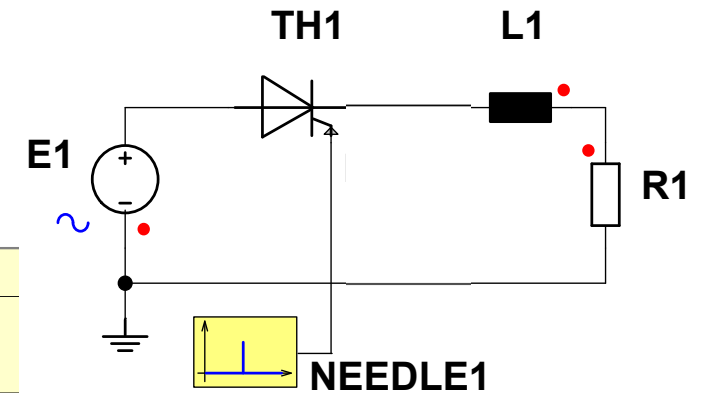
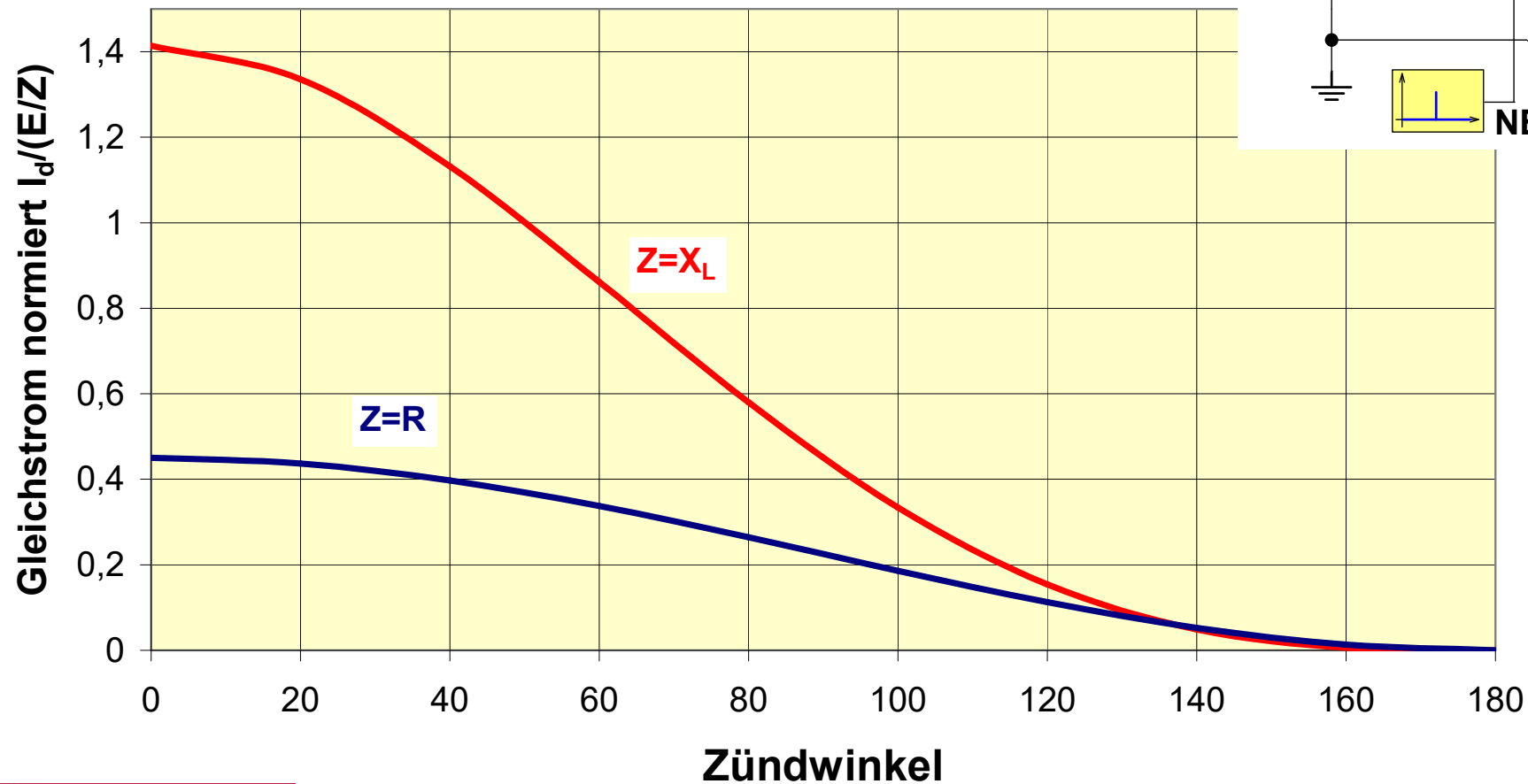


$\alpha = 0$ :

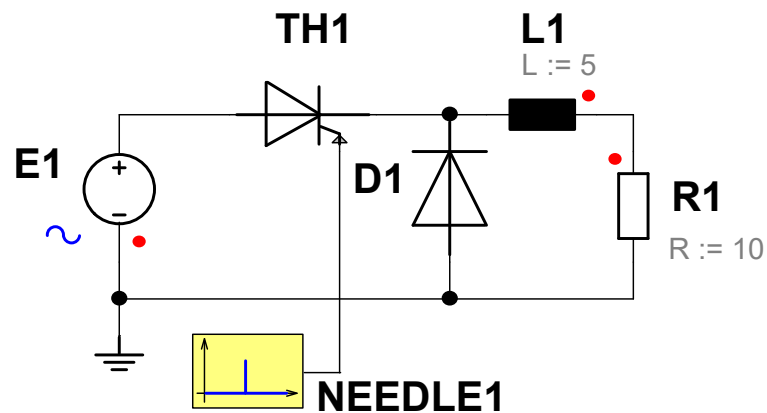


# M1C – Schaltung mit ohmsch-induktiver Last

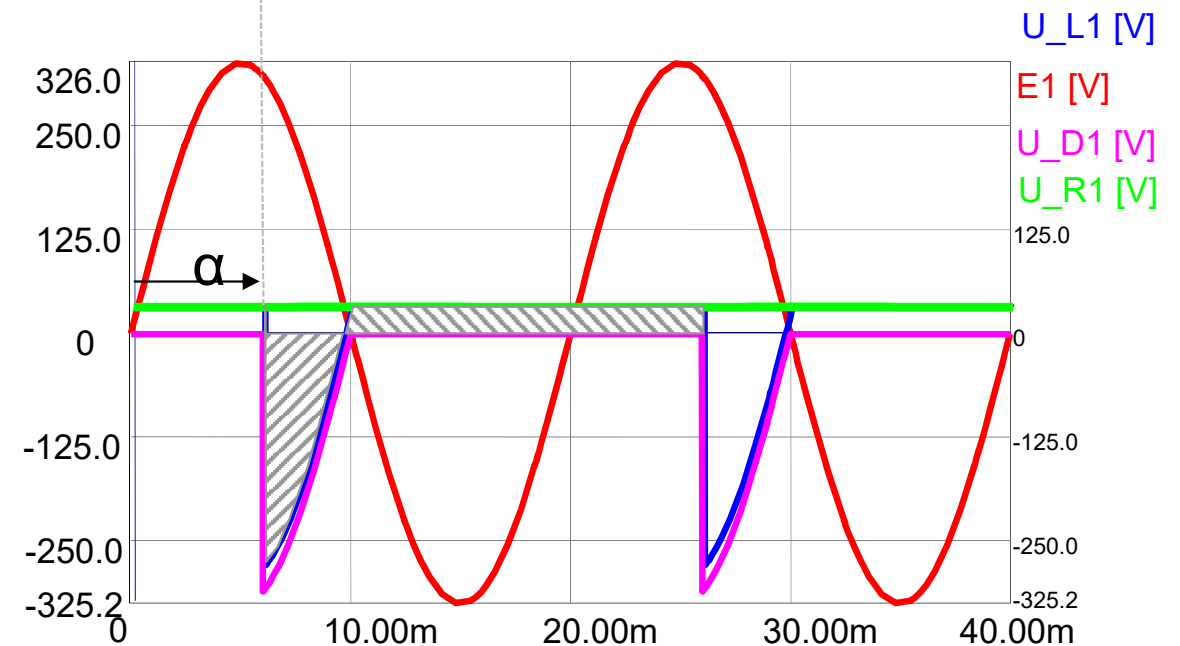
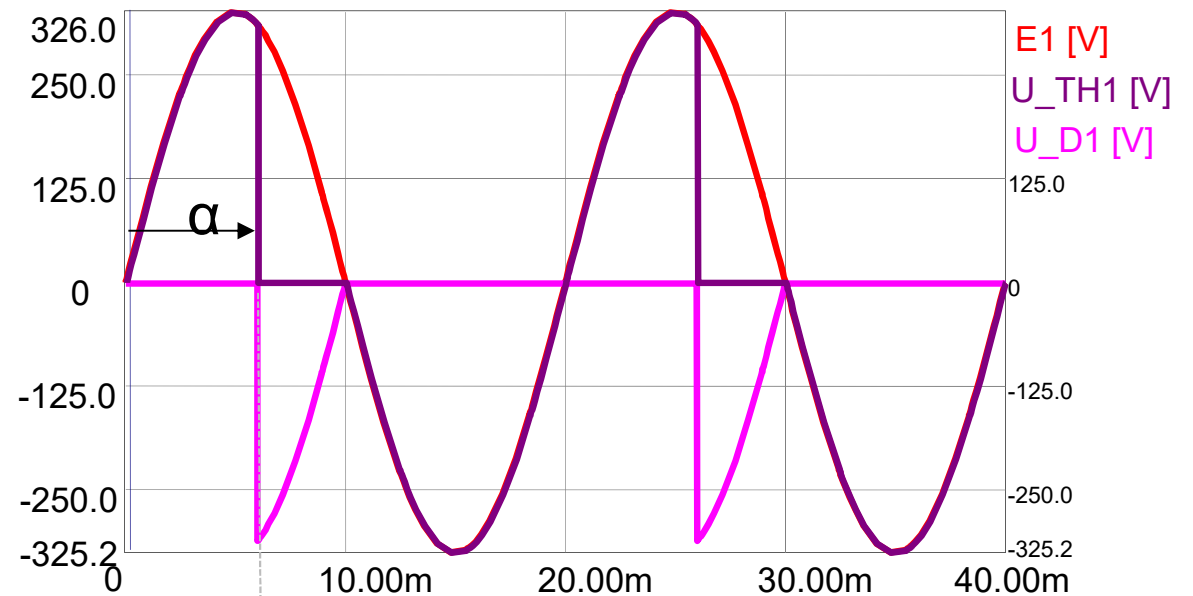
Gleichstromstellverhalten M1C



# M1C – Schaltung mit ohmsch-induktiver Last und Freilaufdiode



$$\begin{aligned}
 U_{di\alpha} &= \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} E_1 \sin(\omega t) d(\omega t) \\
 &= \frac{\sqrt{2} E_1}{2\pi} \cdot (-\cos(\omega t)) \Big|_{\alpha}^{\pi} \\
 &= \frac{\sqrt{2} E_1}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)
 \end{aligned}$$

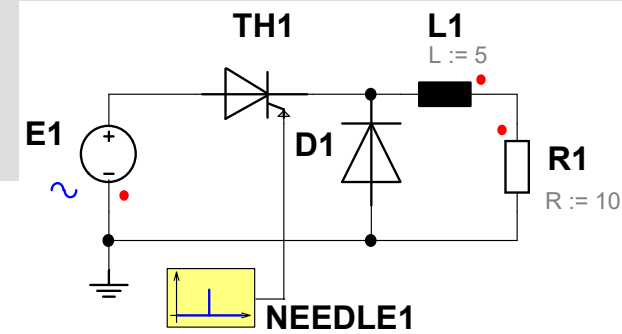
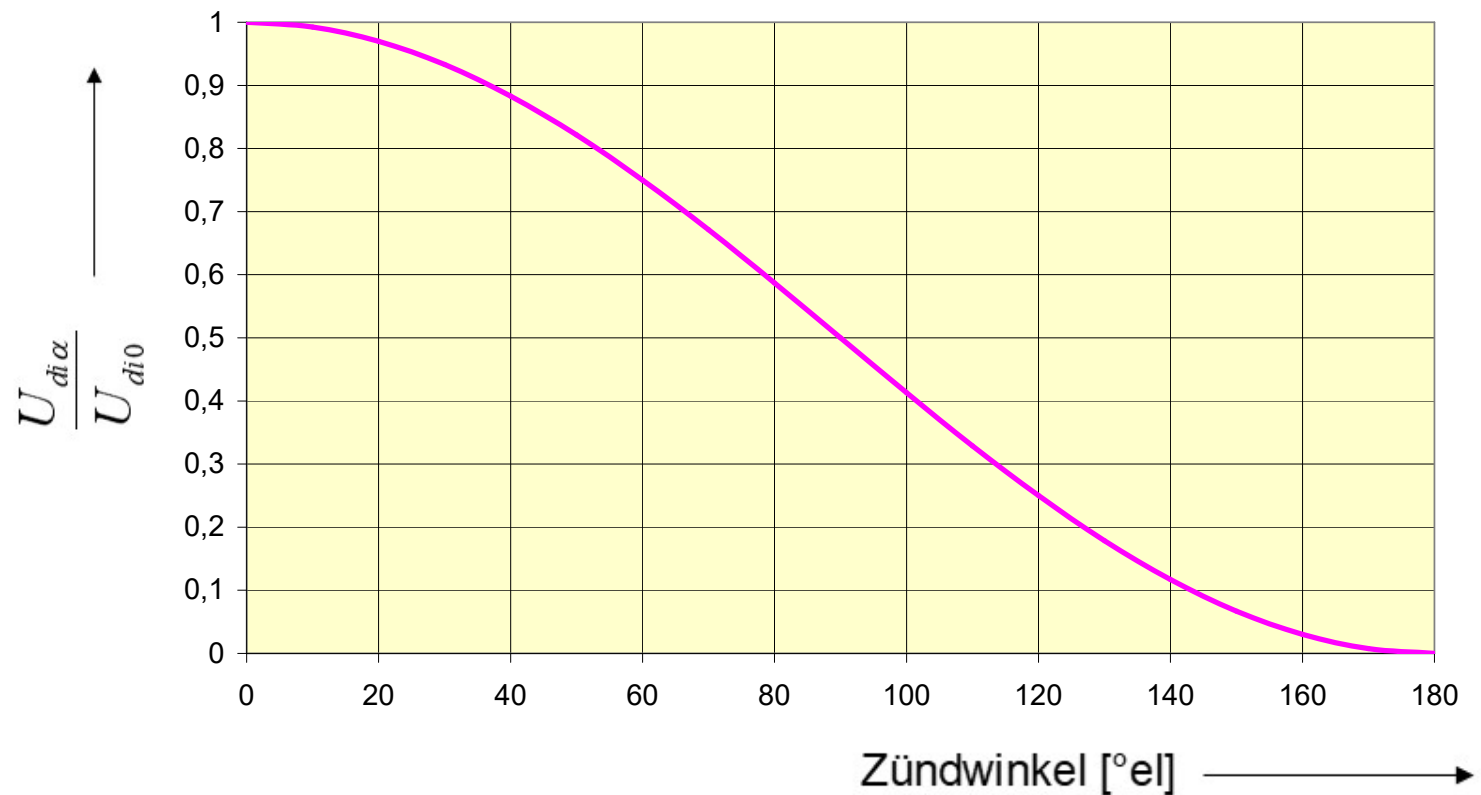


# M1C – Schaltung mit ohmsch-induktiver Last und Freilaufdiode

$$U_{di\alpha} = \frac{\sqrt{2}E_1}{2\pi} \cdot (1 + \cos\alpha)$$

$$\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} = \frac{1 + \cos\alpha}{2}$$

➔ normierte Steuerkennlinie für Gleichrichter mit Freilauf:

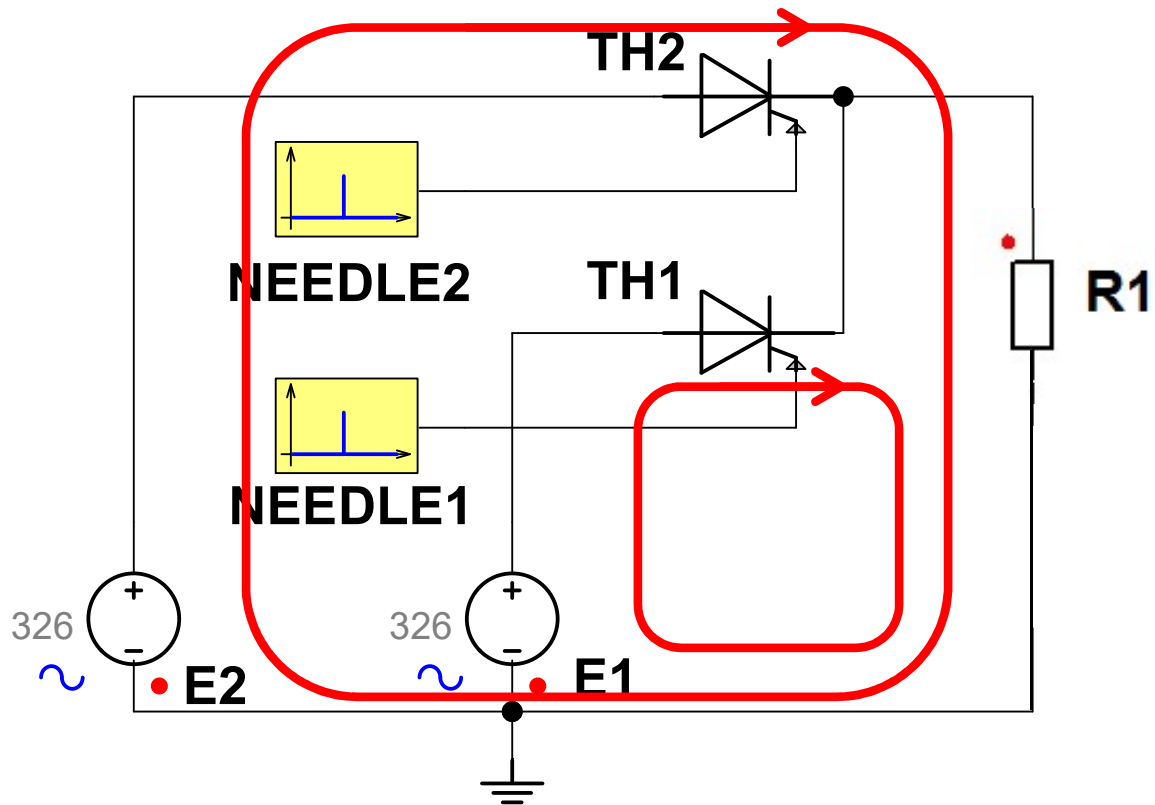


# M1C – Schaltung: Zusammenfassung

Aufbau und Funktionsweise (Spannungsverläufe) für

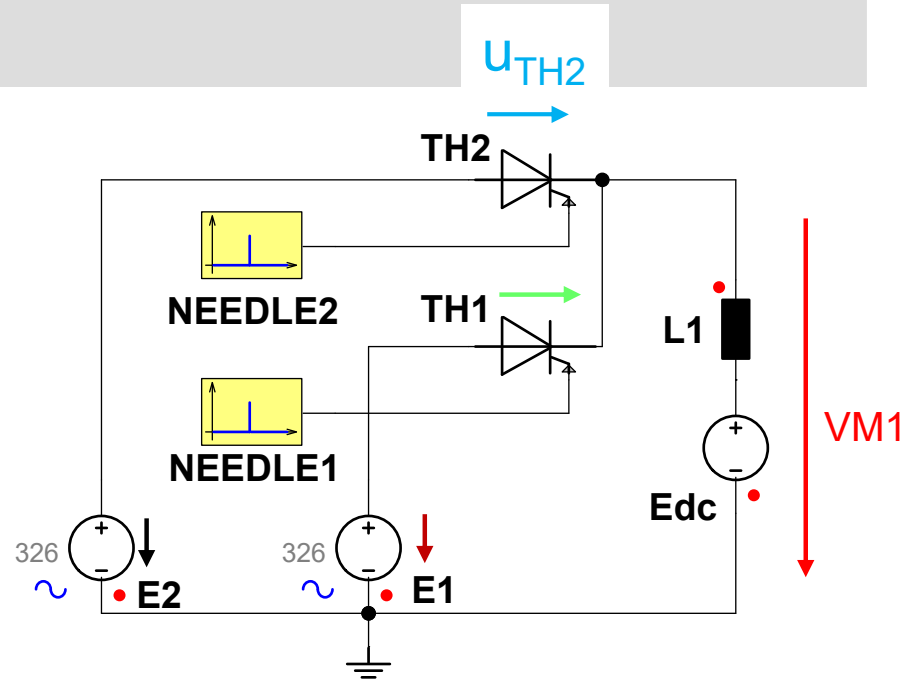
- ohmsche Last
- induktive Last
- ohmsch-induktive Last
- ohmsch-induktive Last mit Freilaufdiode

# M2C – Schaltung mit ohmscher Last



- gesteuerte 2-Puls-Mittelpunktschaltung

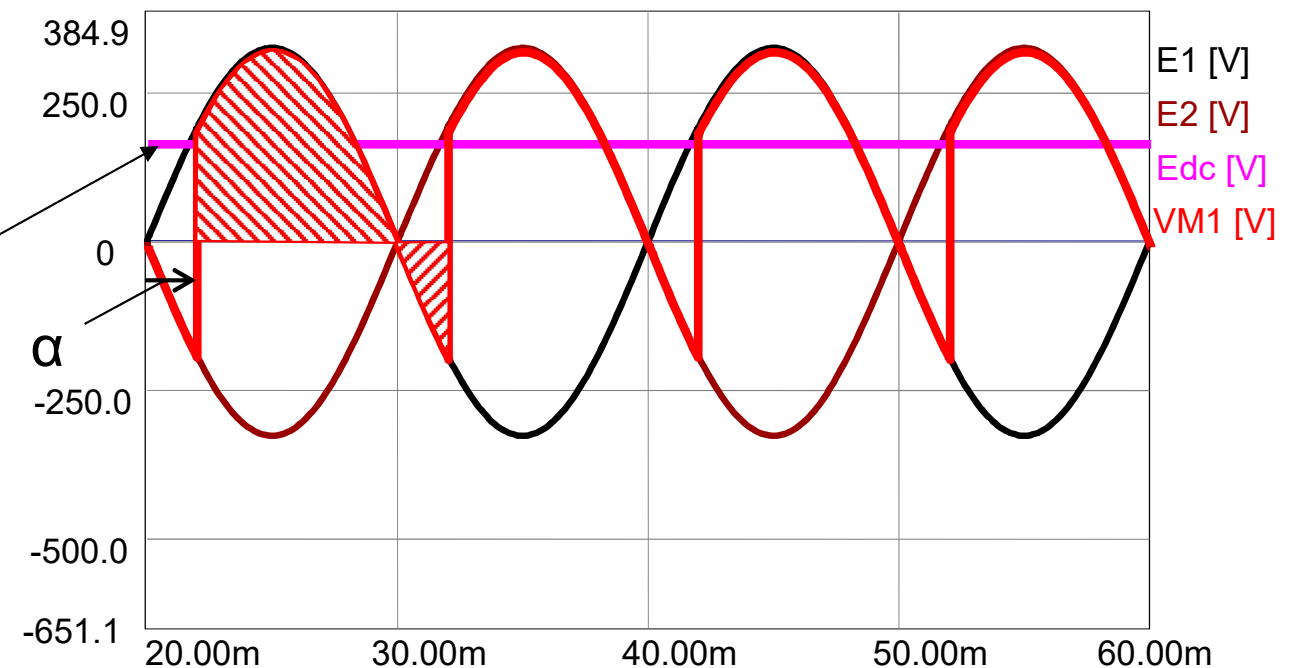
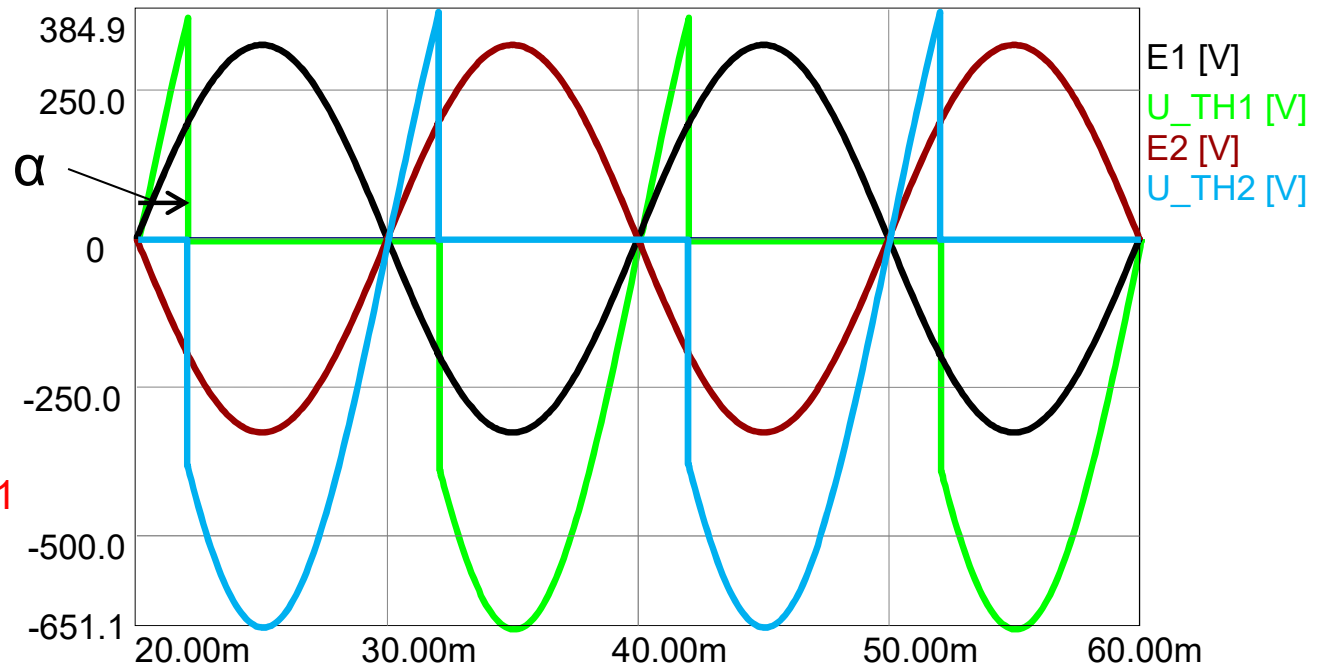
# M2C – Schaltung



Zündwinkel  $\alpha < 90^\circ$  el

→ Ausgangsspannung  $U_{dia} > 0$

→ Gleichrichterbetrieb





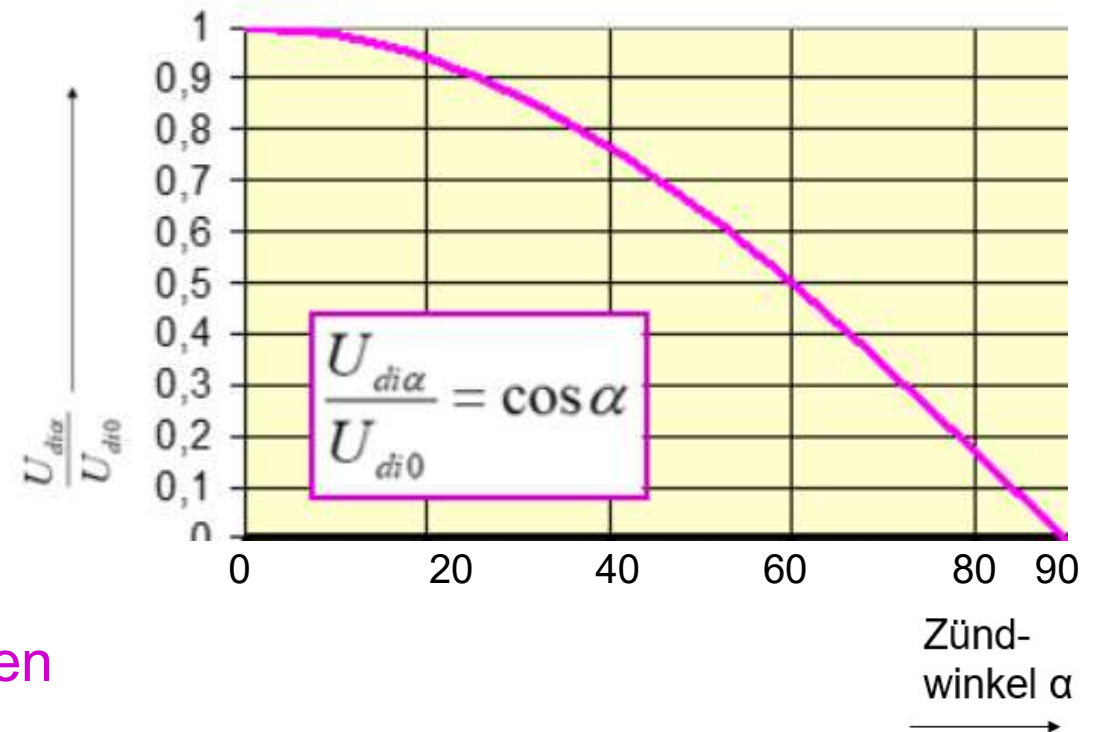
# M2C - Schaltung

$$U_{di\alpha} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} \sqrt{2}E \sin(\omega t) d(\omega t)$$

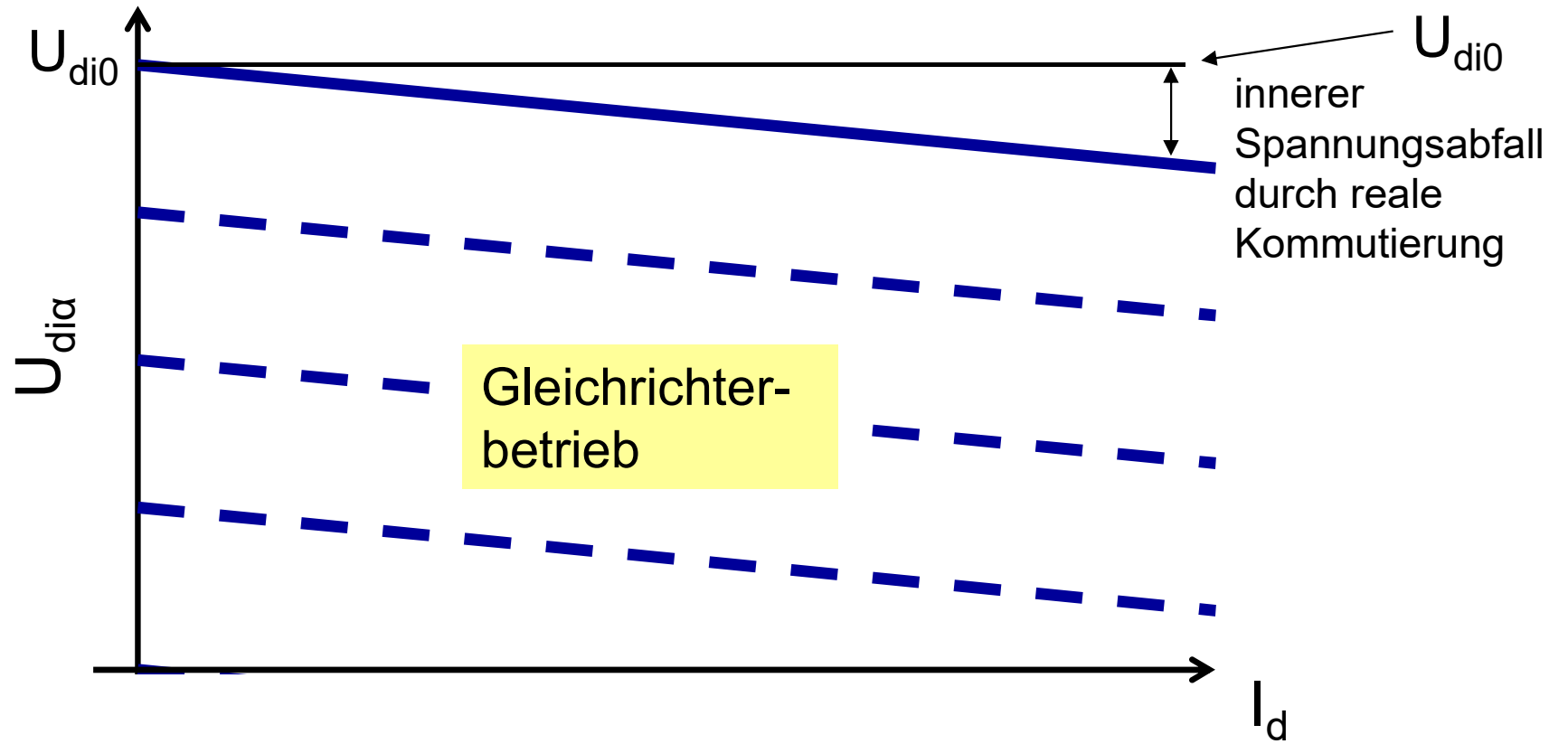
$$U_{di\alpha} = \frac{\sqrt{2}E}{\pi} \left( -\cos(\omega t) \right) \Big|_{\alpha}^{\alpha+\pi}$$

$$U_{di\alpha} = \frac{\sqrt{2}E}{\pi} \cdot 2 \cos \alpha$$

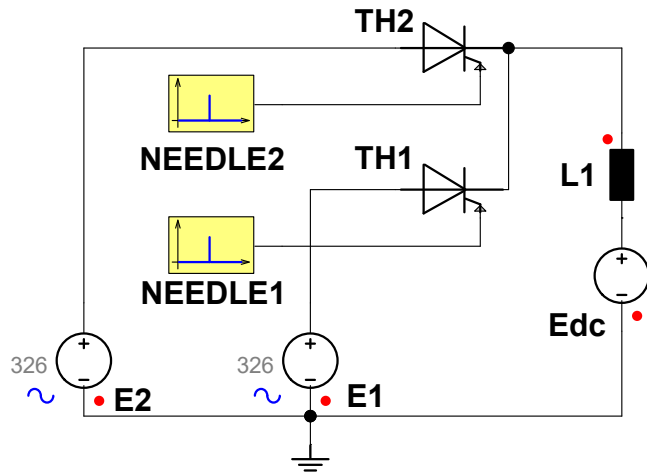
$$\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} = \cos \alpha$$



→ für alle vollgesteuerten Schaltungen

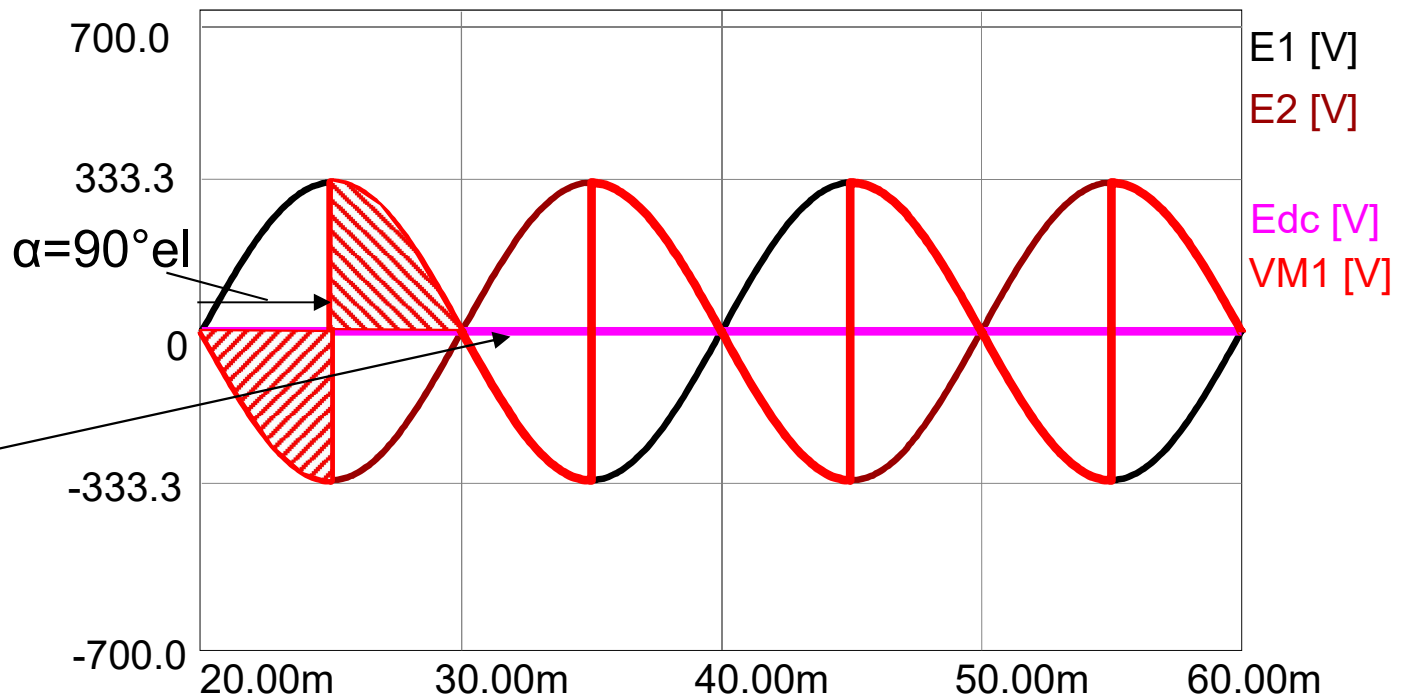
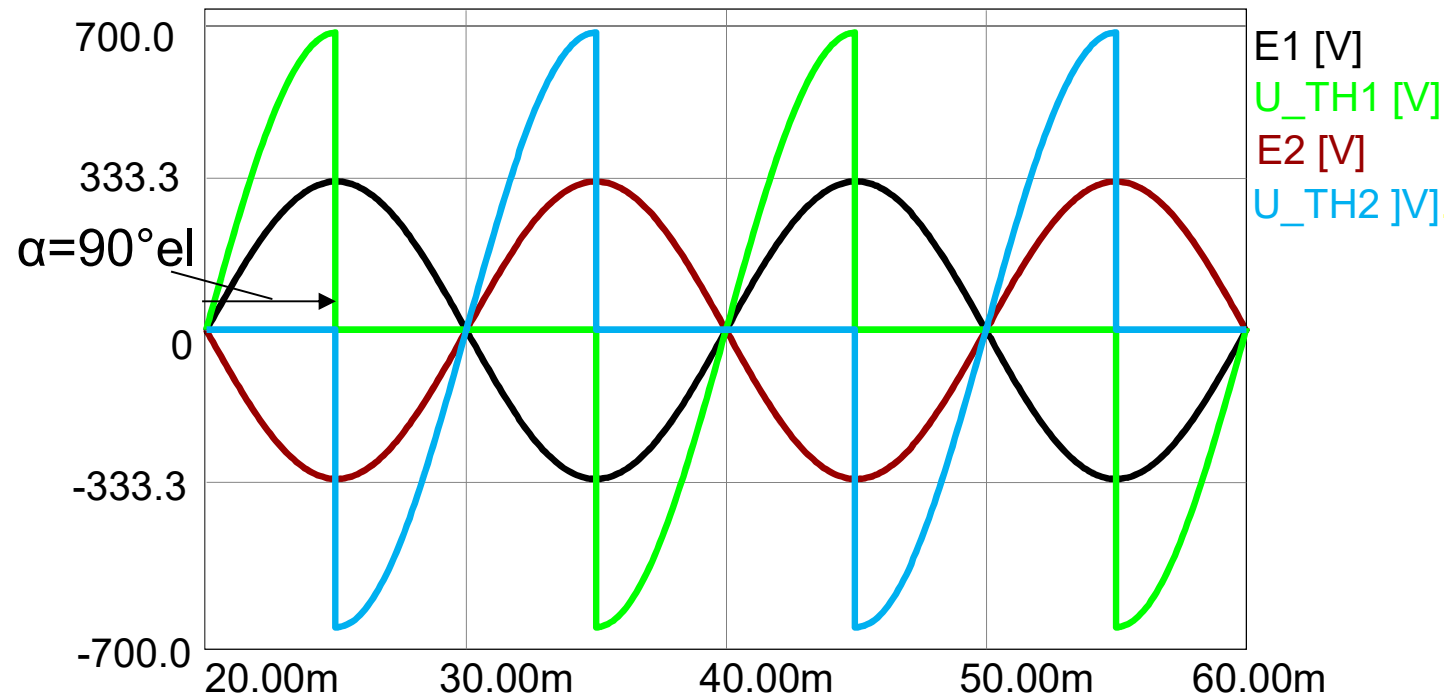


# M2C – Schaltung mit induktiver Last

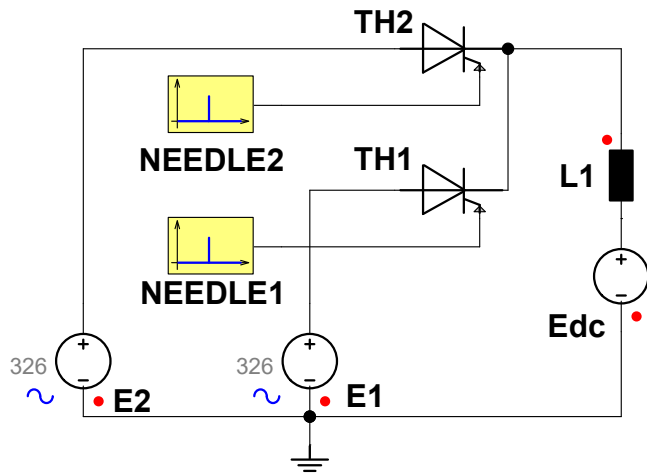


Zündwinkel  $\alpha = 90^\circ \text{el}$

$$\cos 90^\circ = 0 \rightarrow U_{di90^\circ} = 0$$

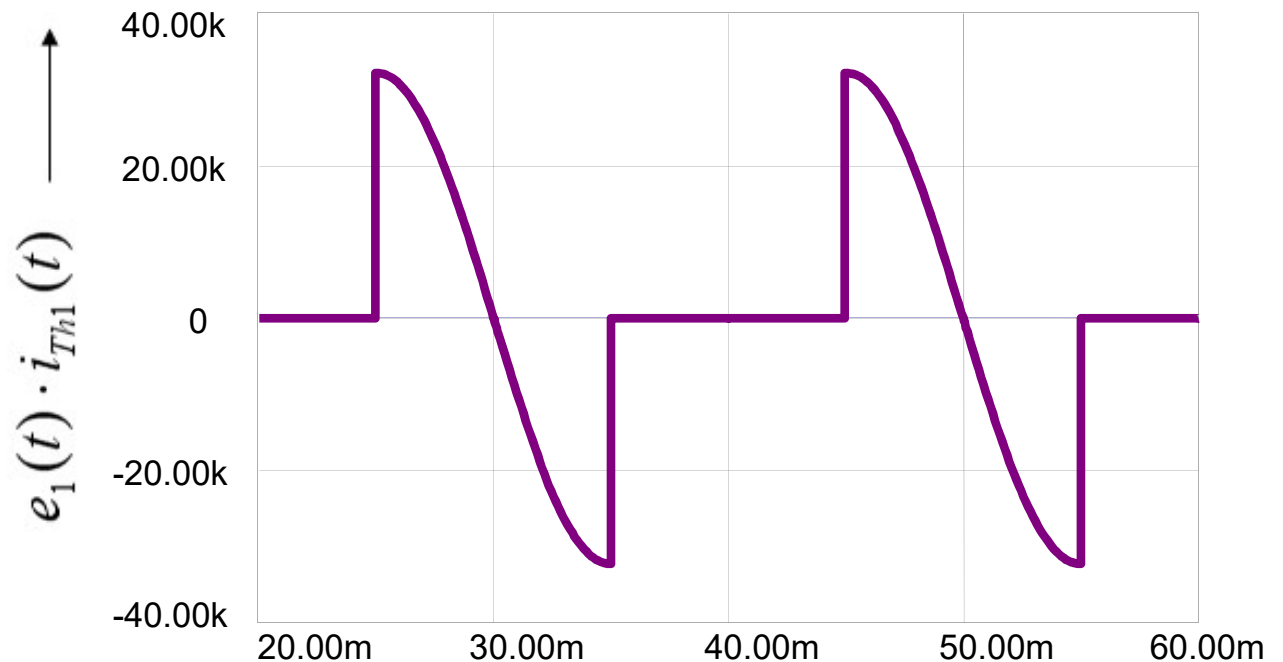
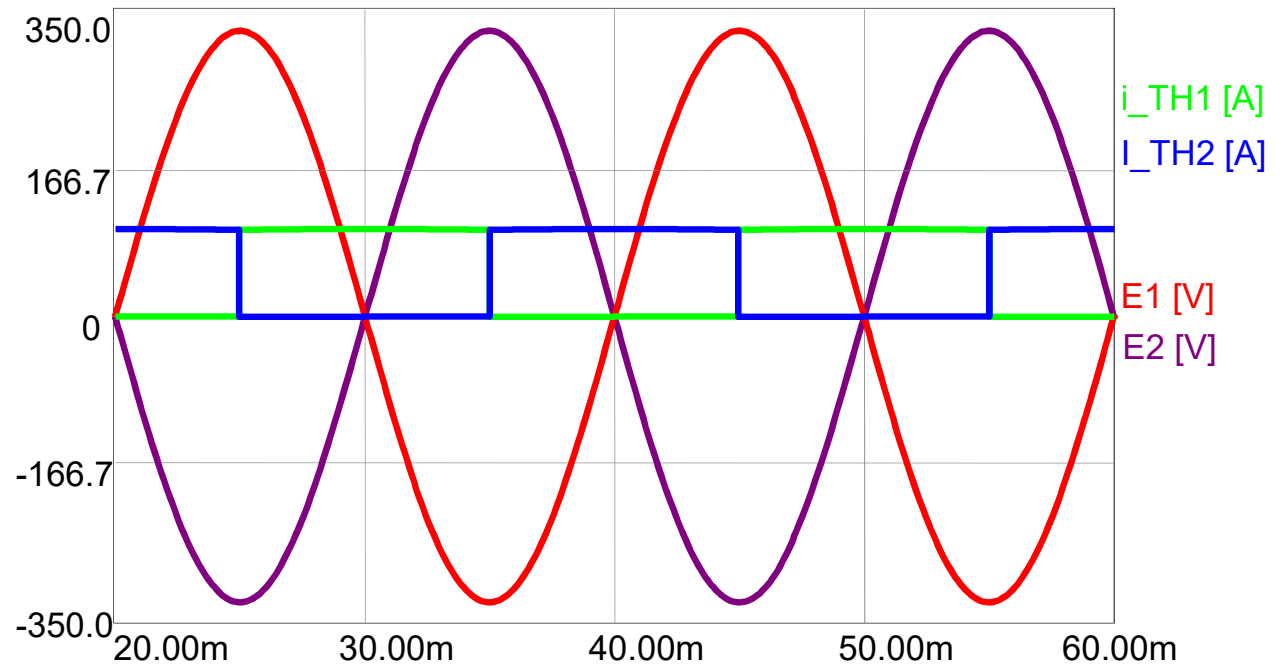


# M2C – Schaltung mit induktiver Last

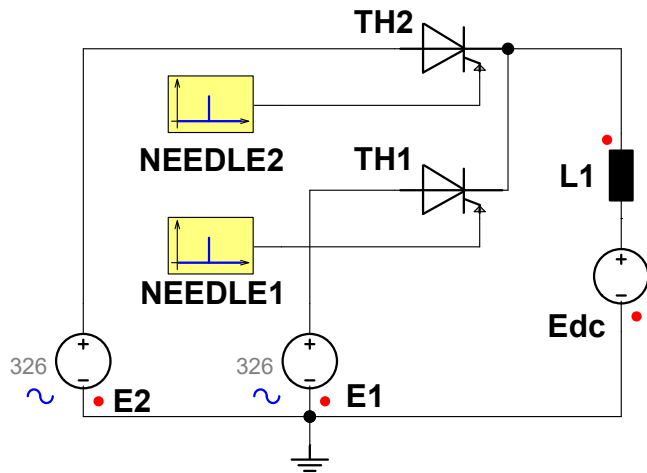


$$\alpha = 90^\circ$$

→ reine Blindleistung!



# M2C – Schaltung mit induktiver Last

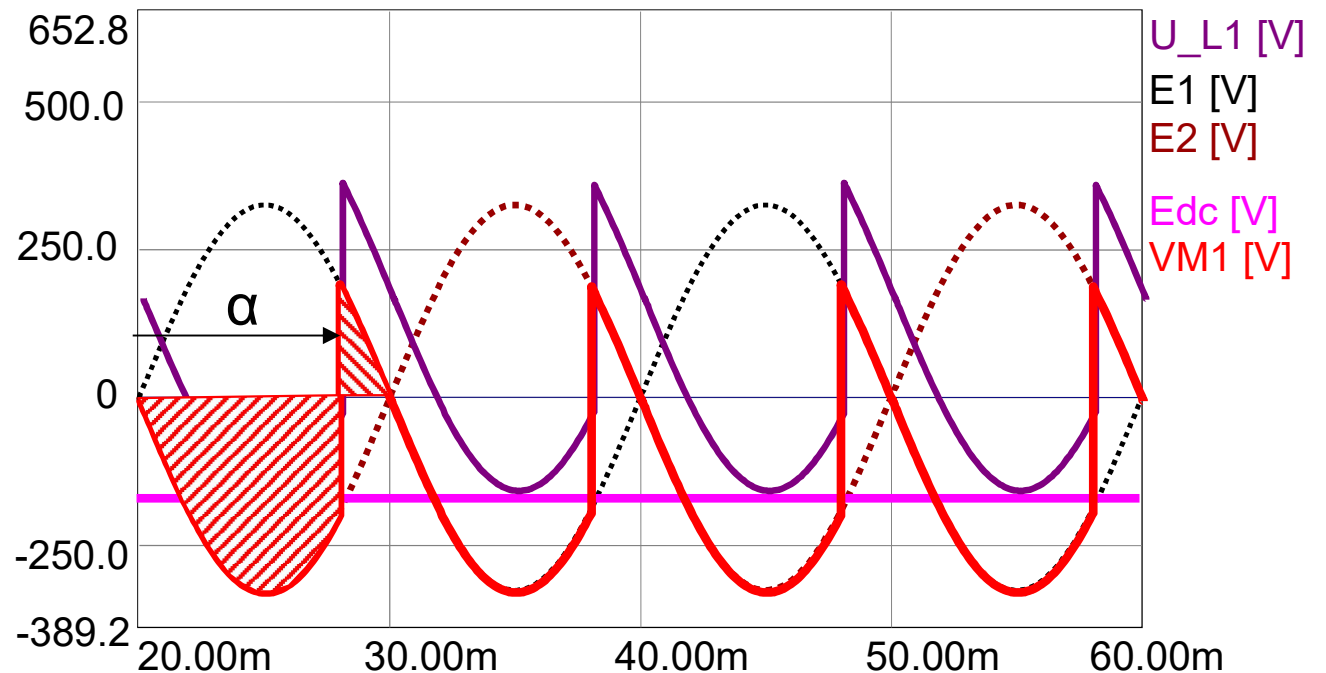
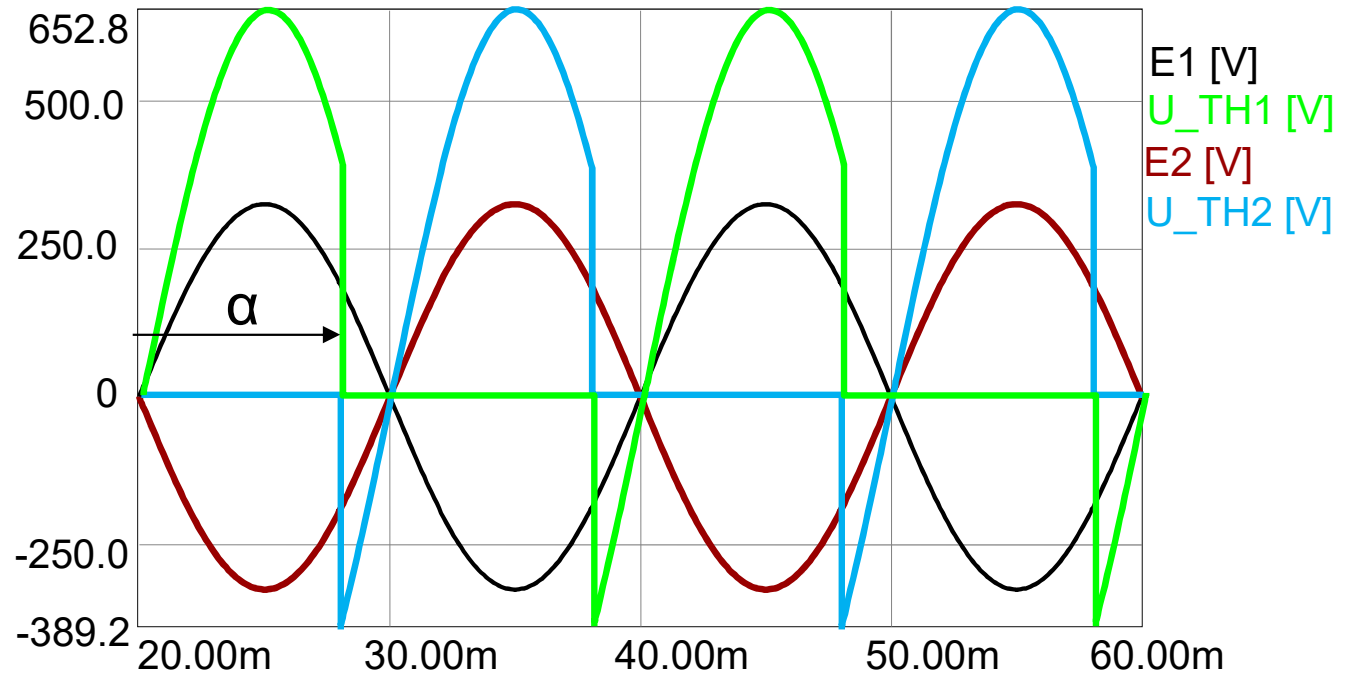


Zündwinkel  $> 90^\circ$  el

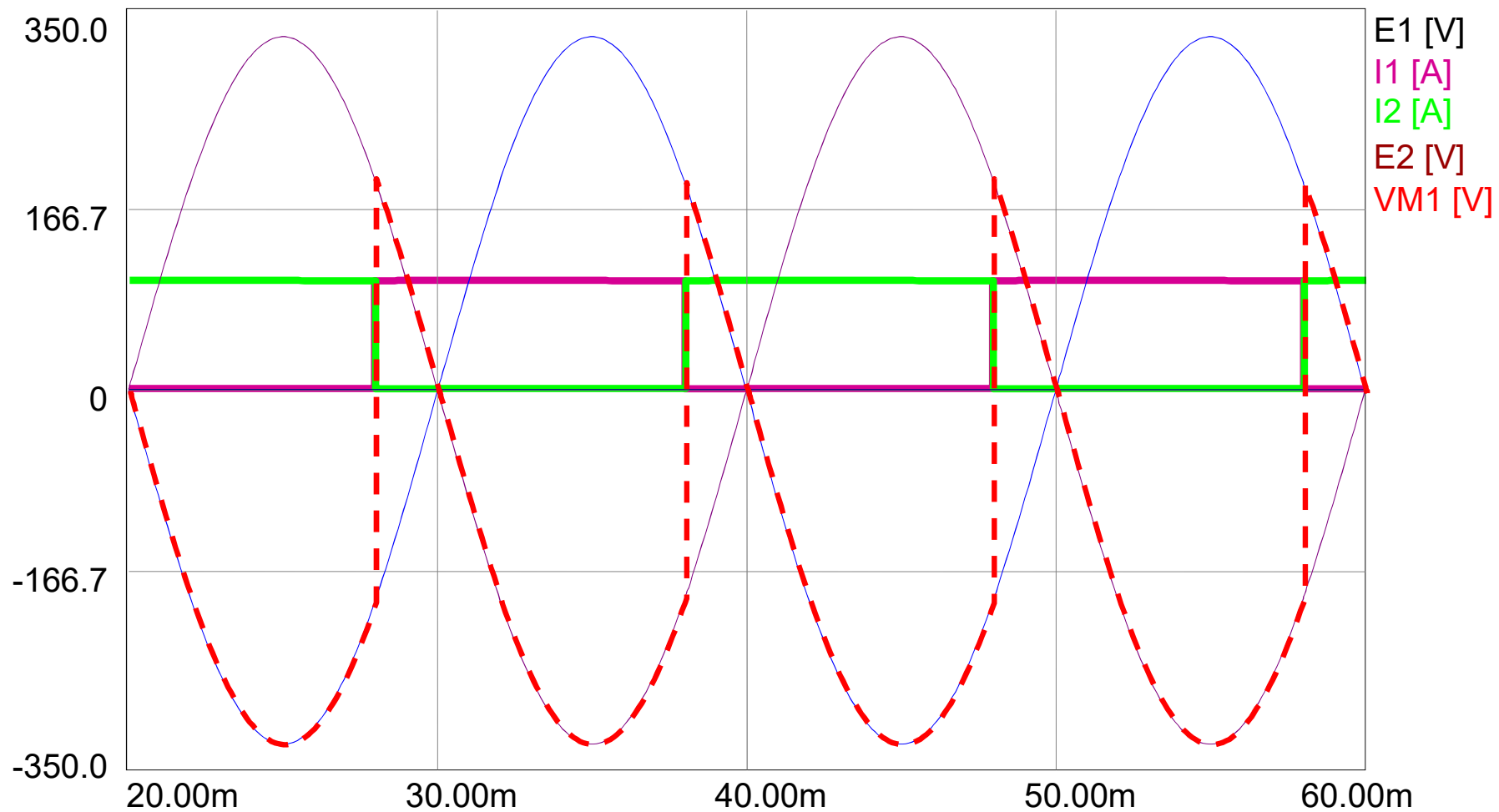
➔ Ausgangsspannung  $< 0$  !

➔ Wechselrichterbetrieb

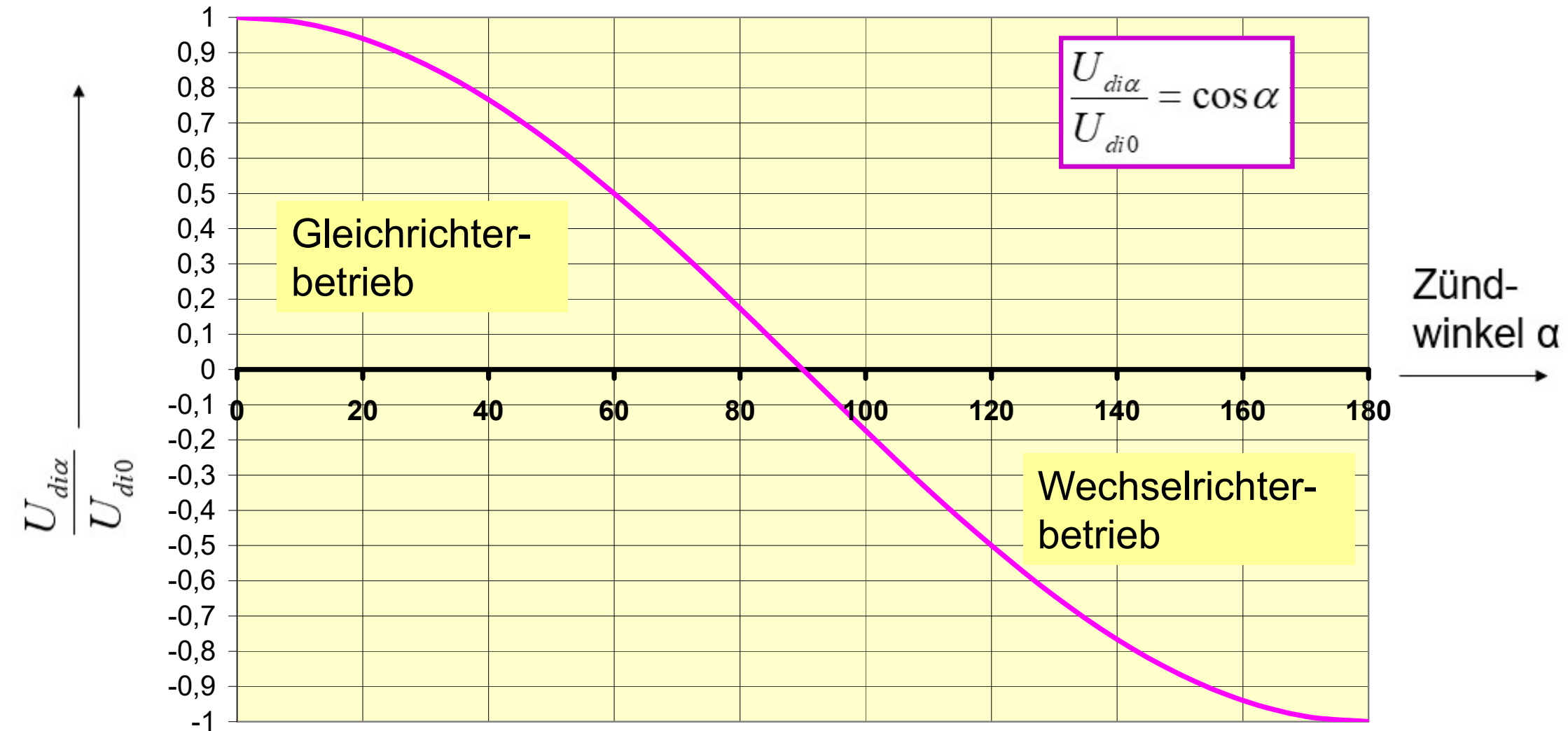
➔ Netzeinspeisung !



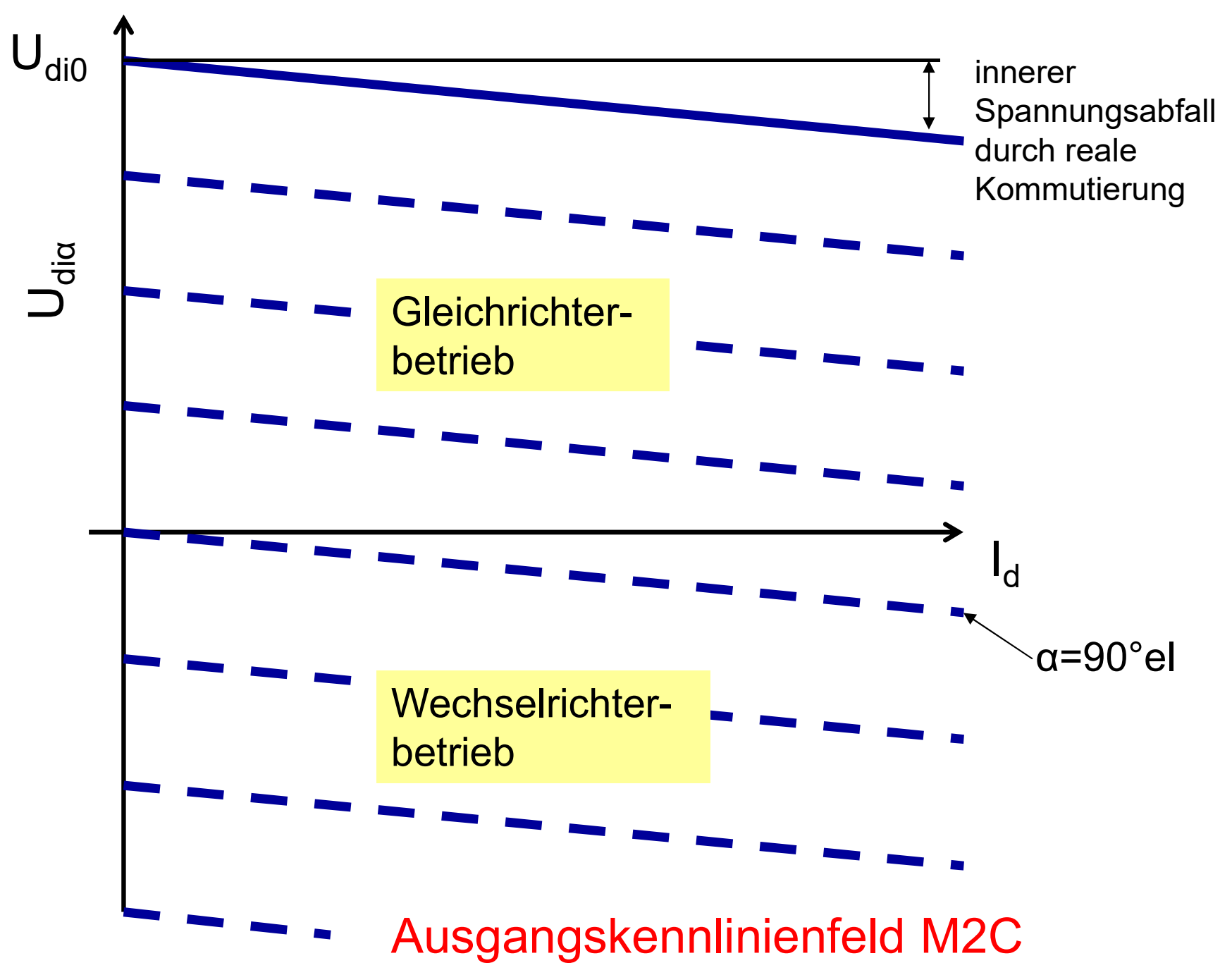
## Ströme bei $\alpha > 90^\circ$



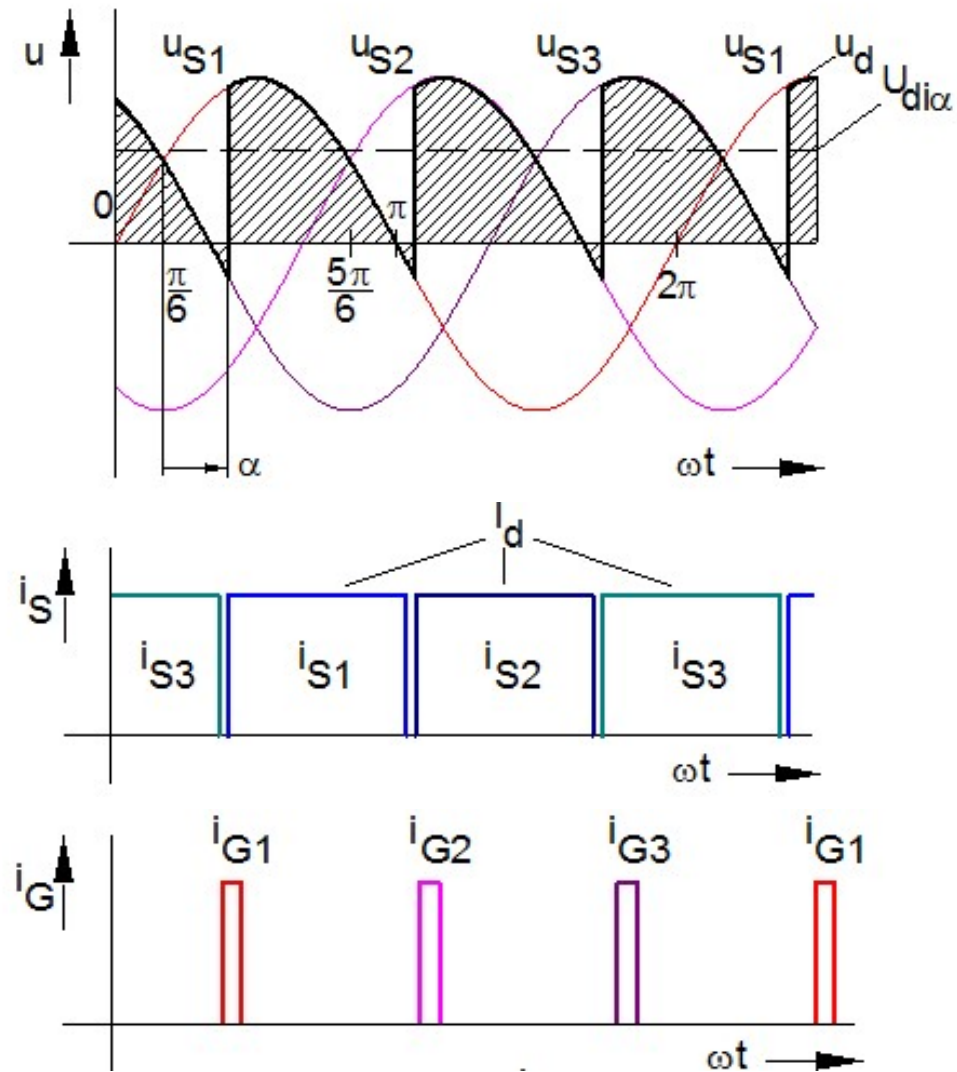
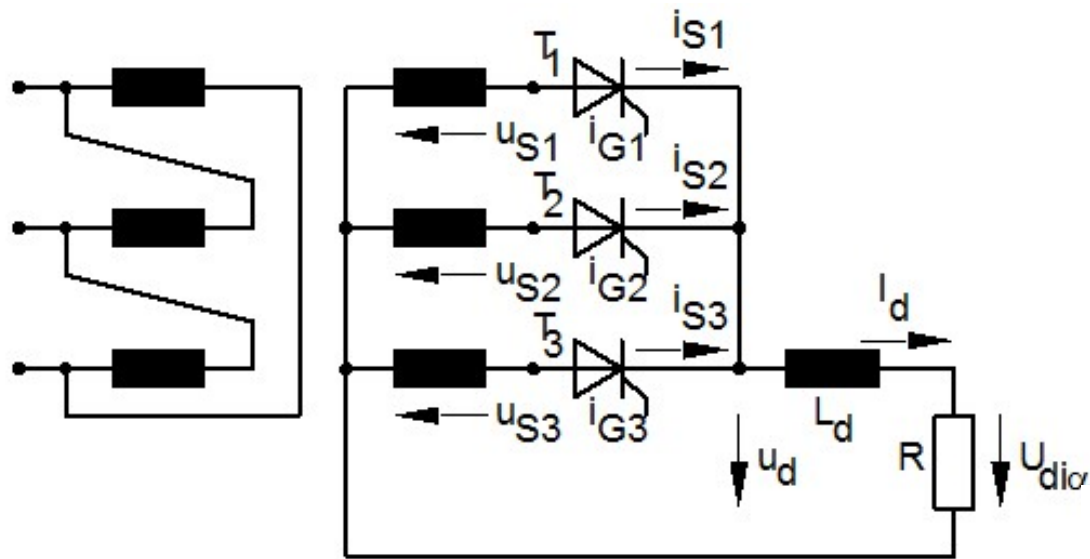
# Steuerkennlinie M2C mit $L \rightarrow \infty$ und Gegenspannungslast







# M3C – Schaltung mit ohmsch-induktiver Last



# M3C – Schaltung mit ohmsch-induktiver Last

Mittelwerte für

## (a) Vollauststeuerung, d.h. $\alpha = 0$ :

- *Mittelwert der Gleichspannung*
- *Mittelwert des Gleichstromes*

## (b) Teillauststeuerung, d.h. $\alpha > 0$ :

- *Mittelwert der Gleichspannung*
- *Mittelwert des Gleichstromes*

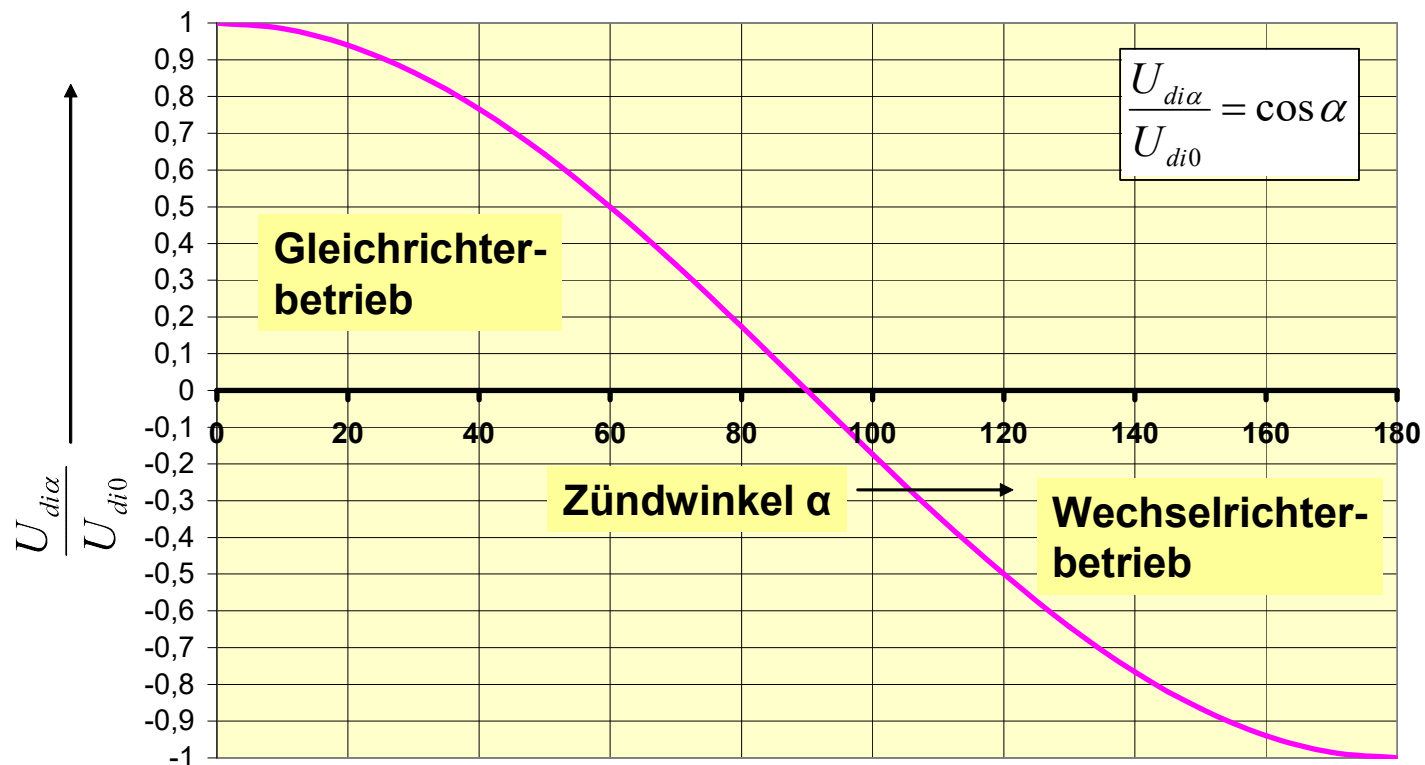
# M3C – Schaltung mit ohmsch-induktiver Last

Steuerkennlinie:

$$\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} = \cos \alpha$$

Ideelle Leerlaufspannung M3  
(E ist die nichtverkettete Spannung)

$$\frac{U_{di0}}{E} = \frac{p\sqrt{2}}{\pi} \sin \frac{\pi}{p}$$



# Was haben wir heute gemacht ?

- **Gesteuerte Gleichrichter**
  - M1C, M2C und M3C

# Was kommt in der nächsten Vorlesung?

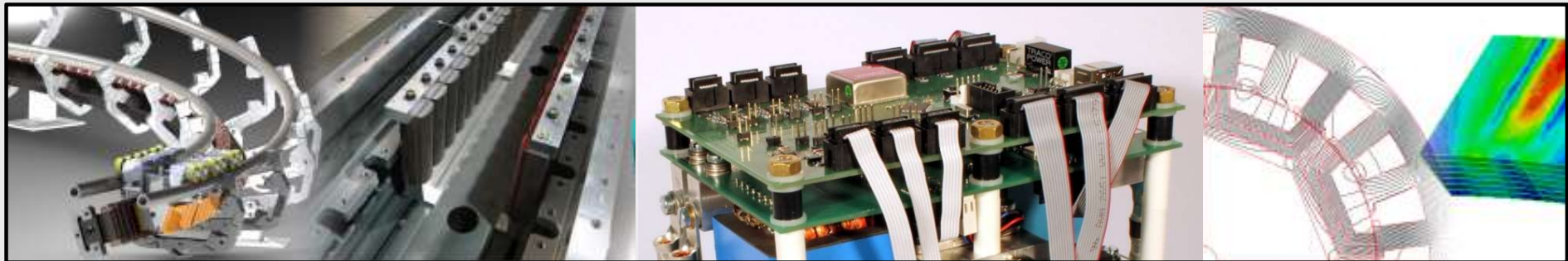
- **Gleichstromsteller**
  - Tiefsetzsteller
  - Hochsetzsteller



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](mailto:r.mallwitz@tu-braunschweig.de)

T.: + 49 (0)531 3913901

M.Sc. Cengiz Uzlu

M: [c.uzlu@tu-braunschweig.de](mailto:c.uzlu@tu-braunschweig.de)

T.: + 49 (0)531 3913917

M.Sc. Robert Rohn

M: [r.rohn@tu-braunschweig.de](mailto:r.rohn@tu-braunschweig.de)

T.: + 49 (0)531 3918165

[www.imab.de](http://www.imab.de)