



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)

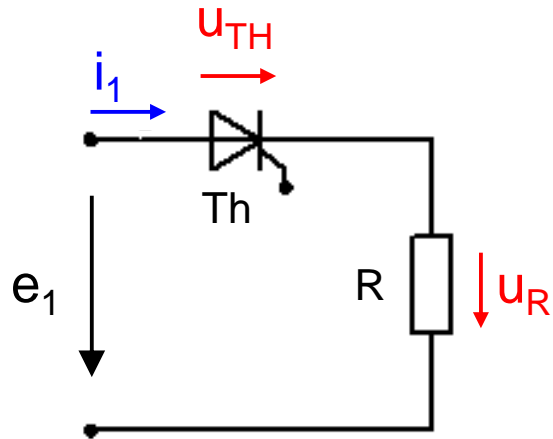
Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz

Institut für Elektrischen Maschinen, Antriebe und Bahnen - IMAB

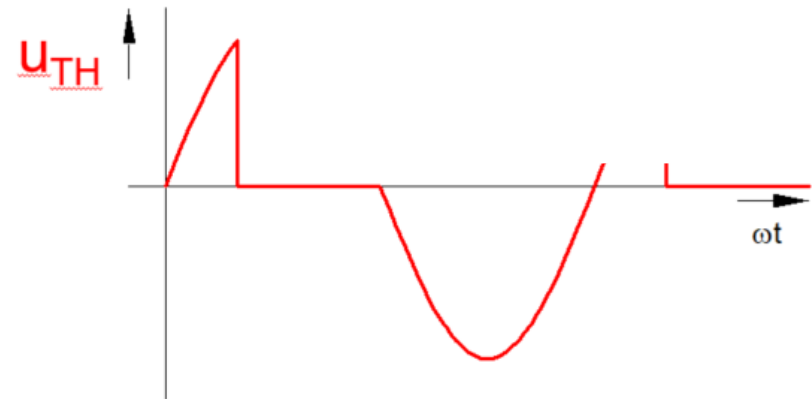
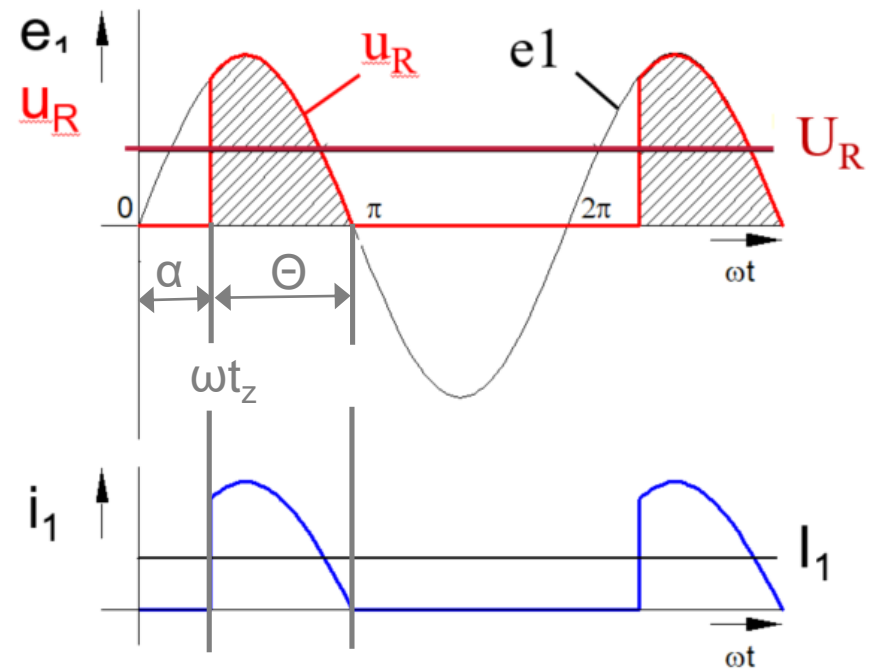
# Was machen wir heute ?

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:

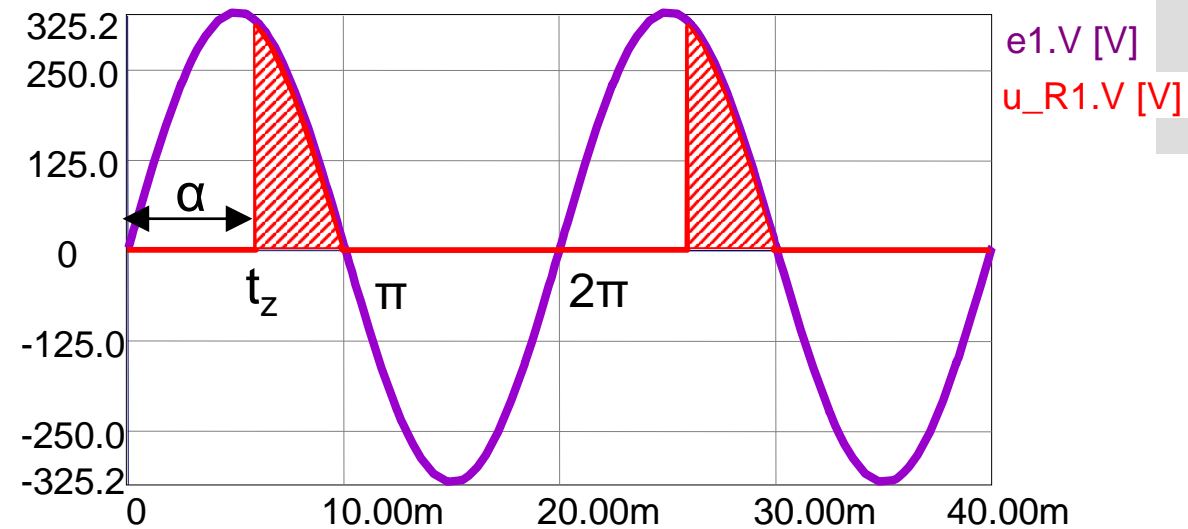
$$\bar{I}_d = \frac{\bar{U}_d}{R_1}$$

- Wirkleistung:

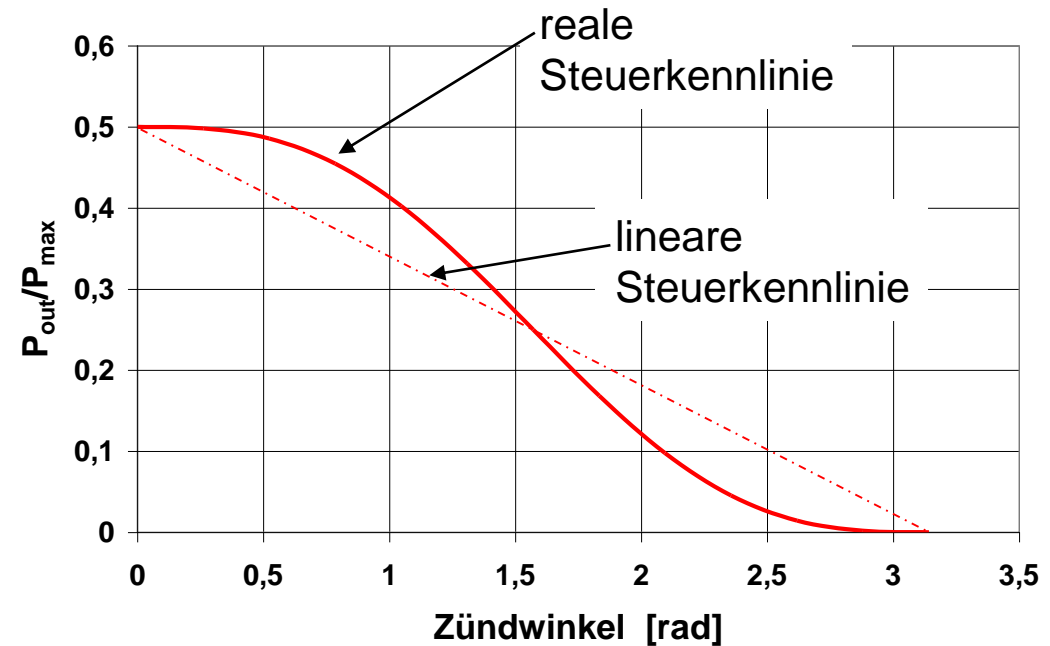
$$P = \frac{E^2}{\pi \cdot R_1} \left( \frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right)$$

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

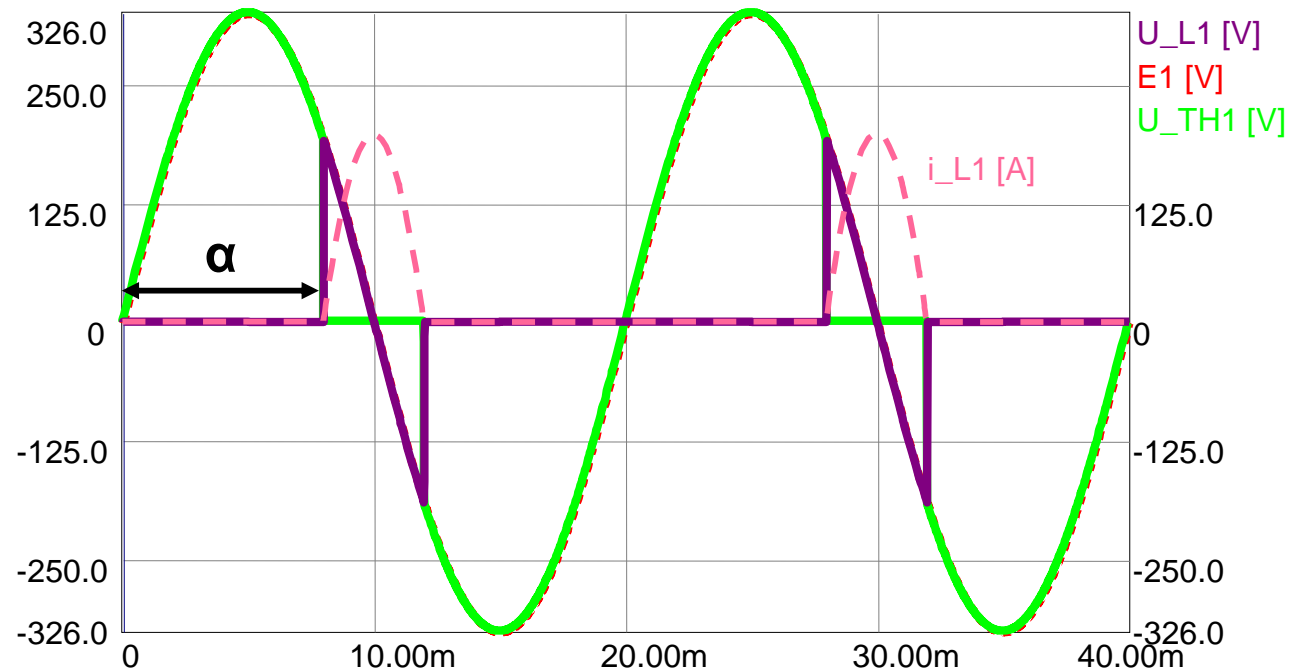
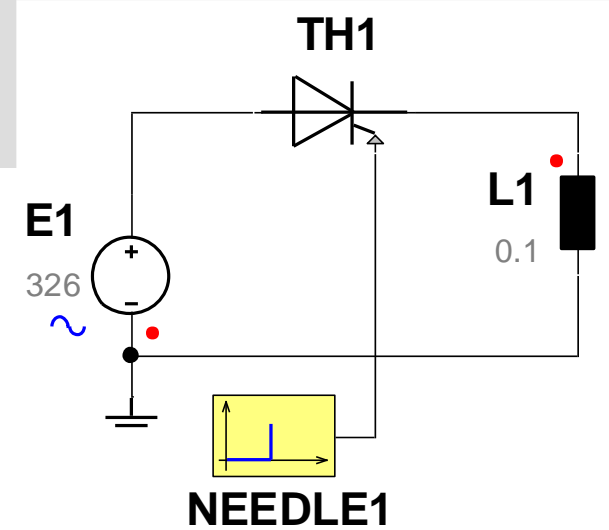
# M1C – Schaltung mit ohmscher Last



$$\frac{P}{P_{\max}} = \frac{P}{\frac{E^2}{R1}} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right)$$



# 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:**

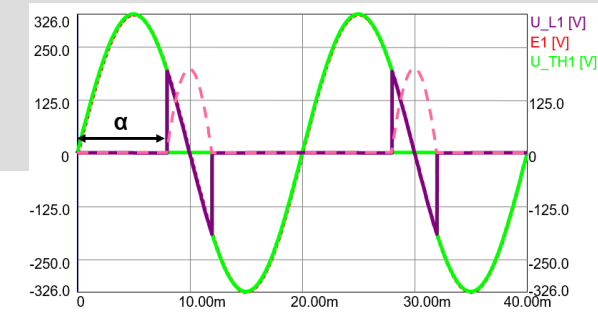
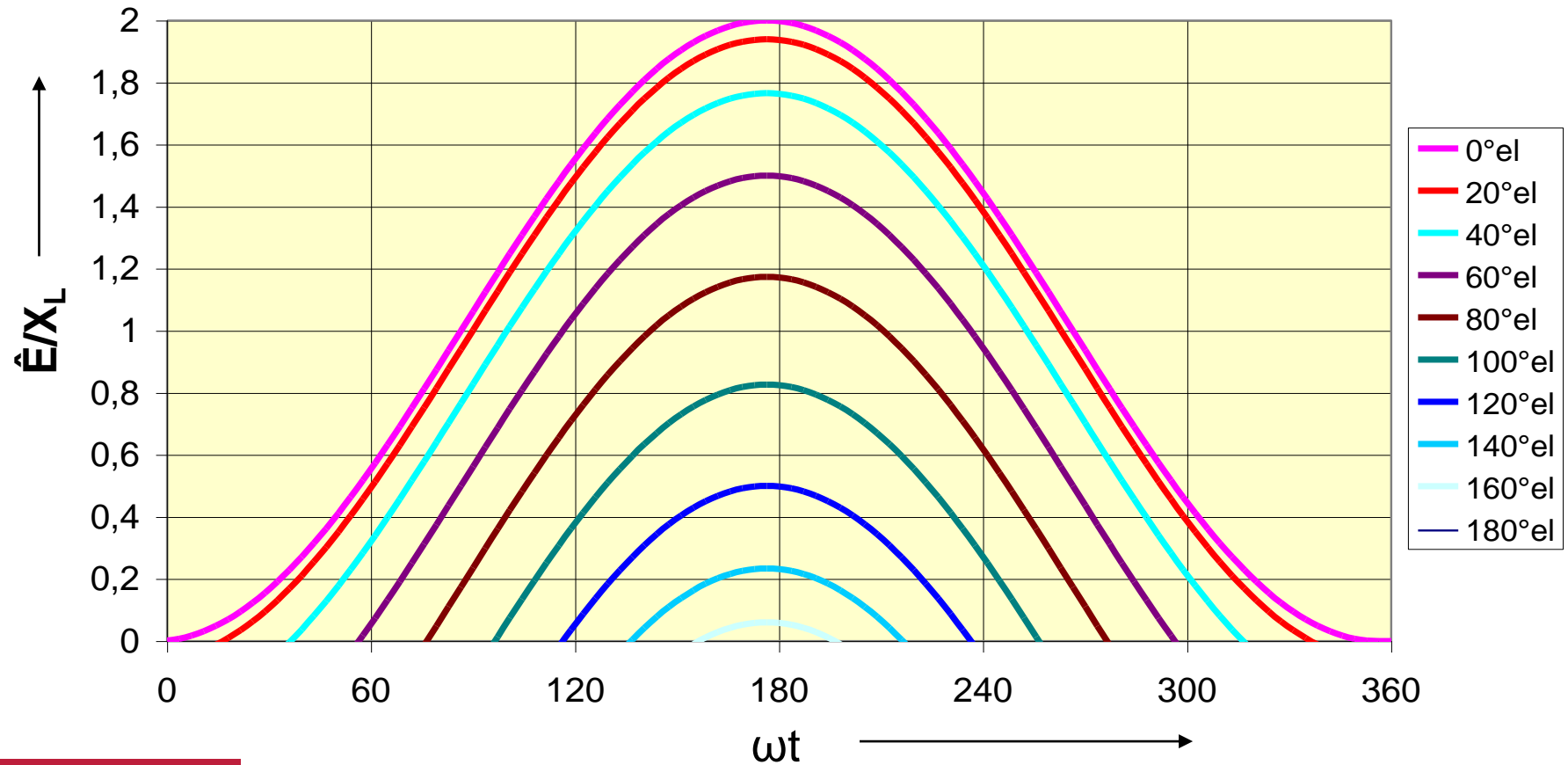
$$I_{d\_L} = \frac{\sqrt{2}E_1}{\omega L1} \cdot \frac{1}{2\pi} ((2\pi - 2\alpha) \cdot \cos(\alpha) - \sin(2\pi - \alpha) + \sin(\alpha))$$

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

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

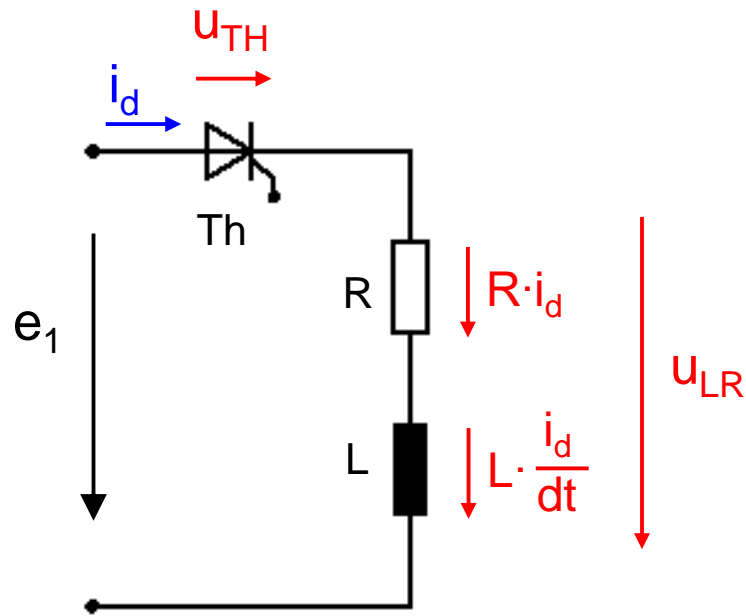
# M1C mit induktiver Last

Stromverläufe für verschiedene Zündwinkel

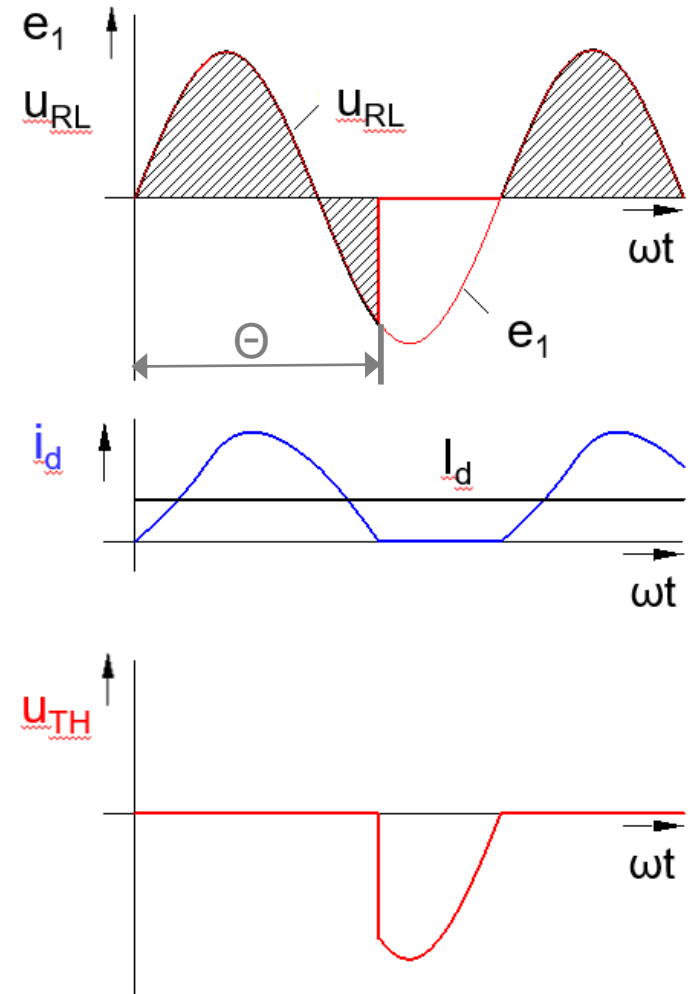




# M1C – Schaltung mit ohmsch-induktiver Last

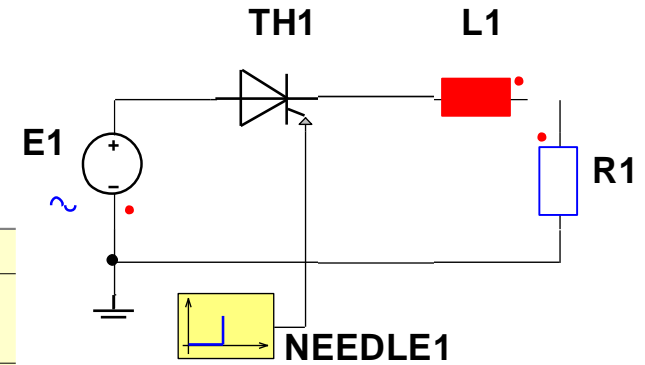
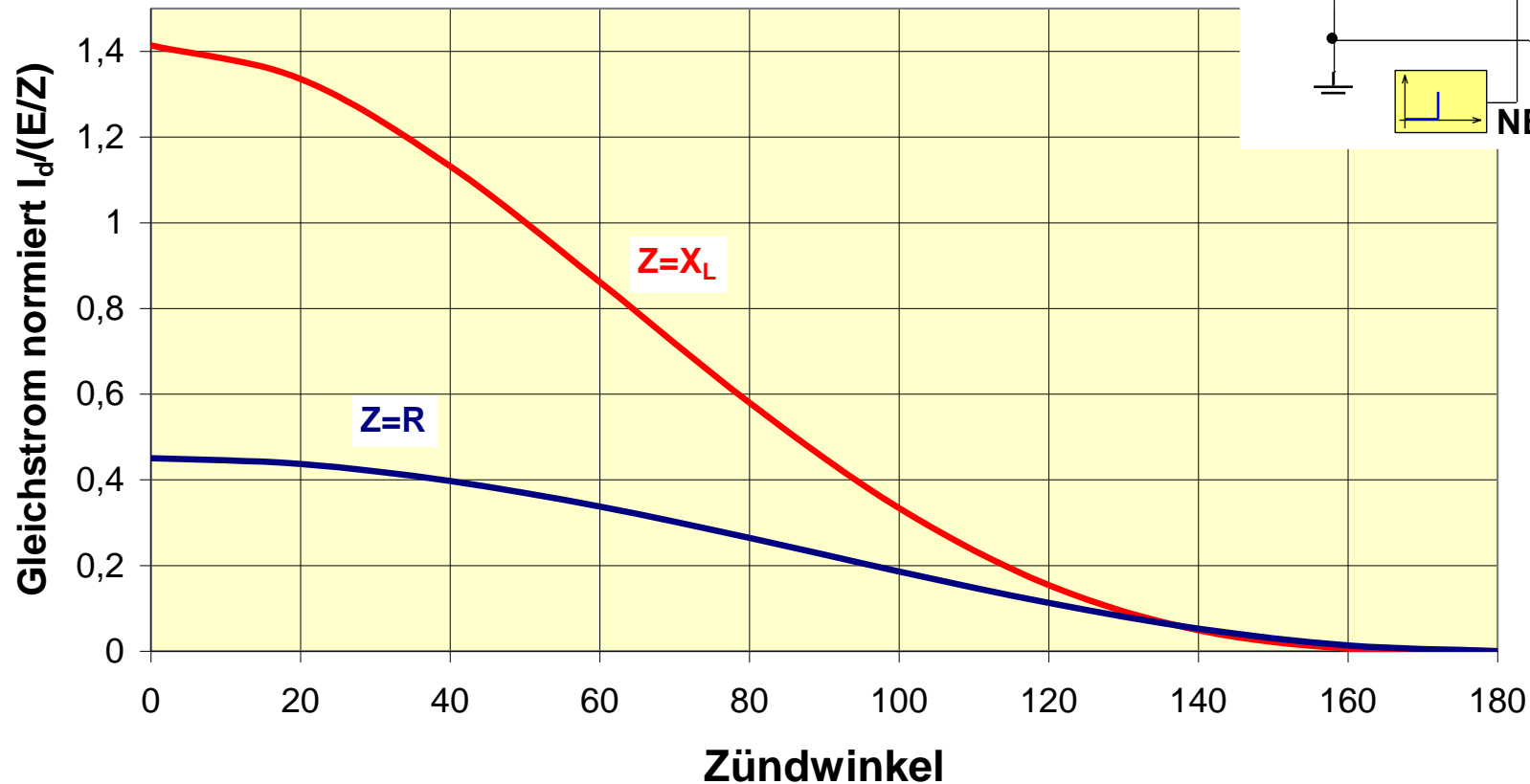


$\alpha = 0$ :

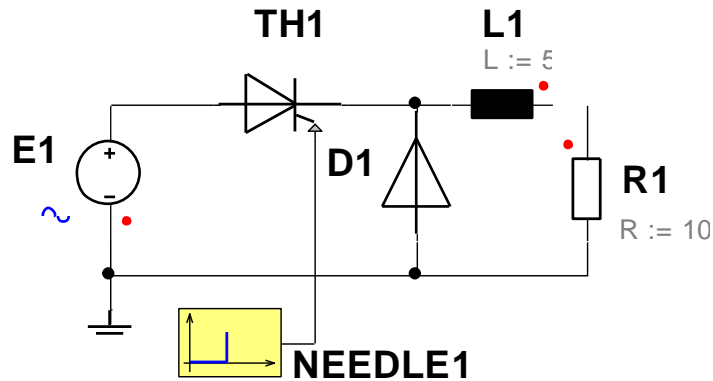


# M1C – Schaltung mit ohmsch-induktiver Last

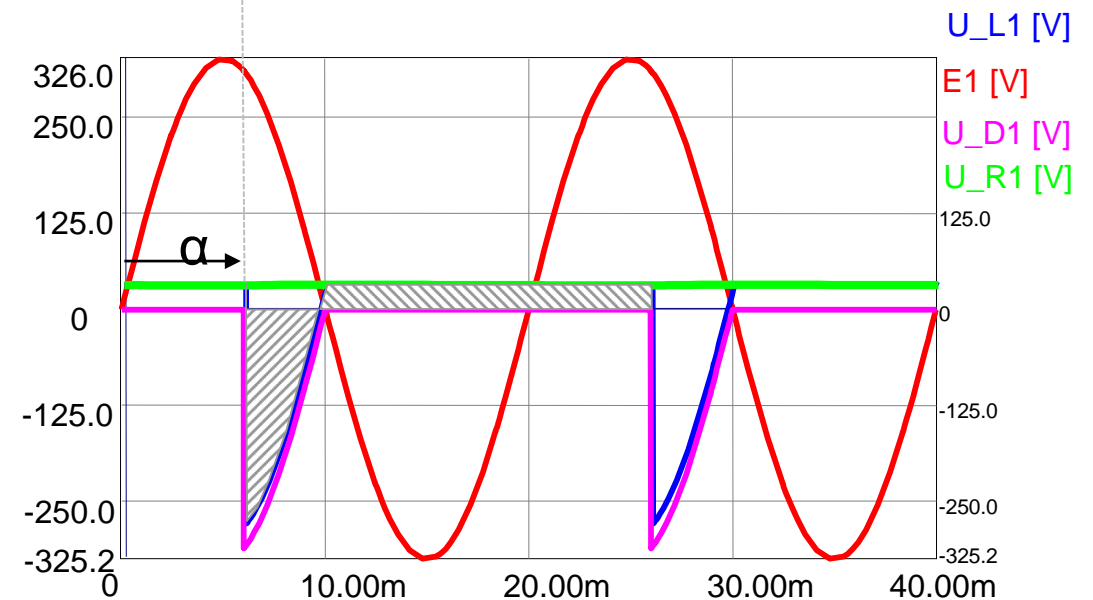
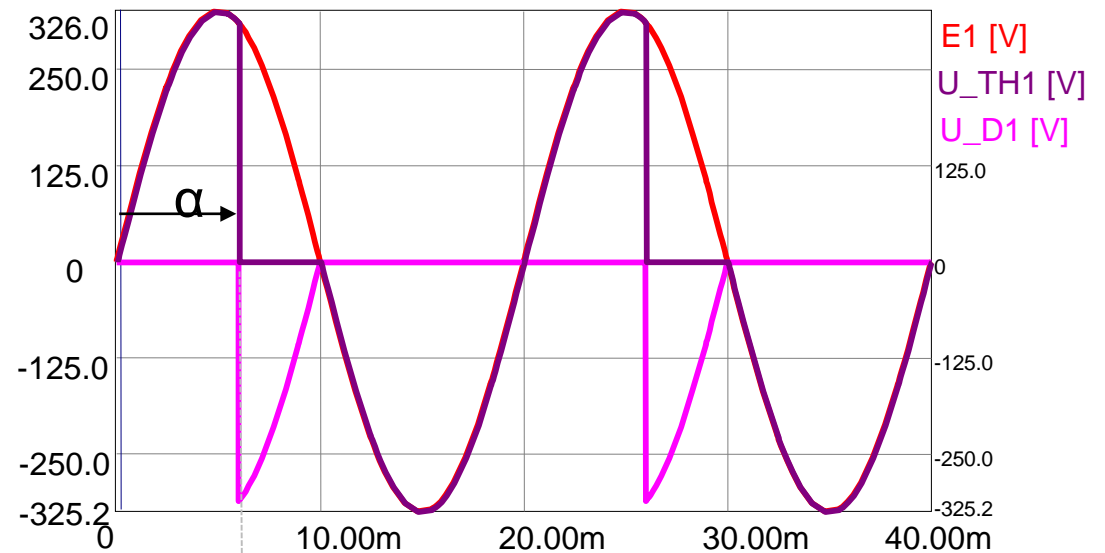
## Gleichstromstellverhalten M1C



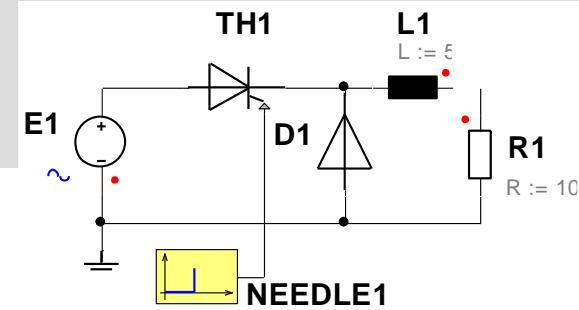
# M1C – Schaltung mit ohmsch-induktiver Last und Freilaufdiode



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



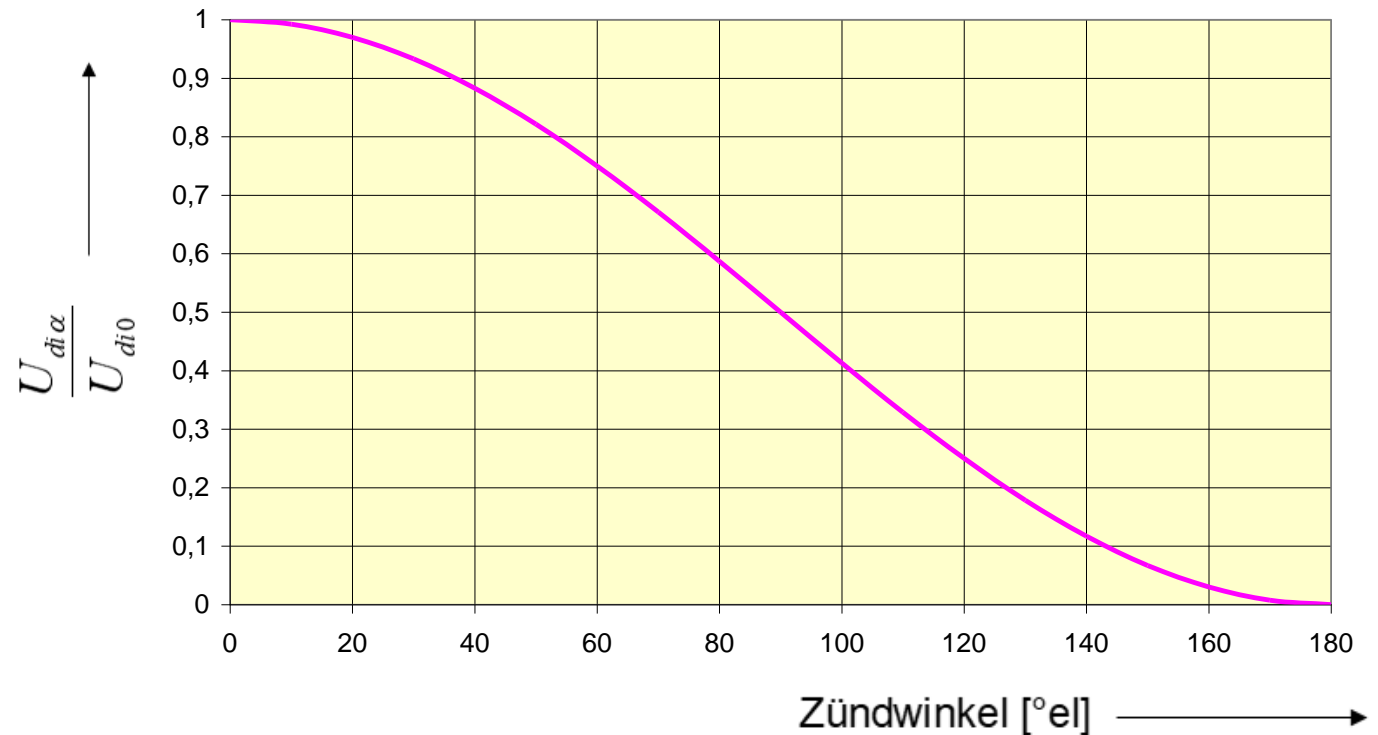
# M1C – Schaltung mit ohmsch-induktiver Last und Freilaufdiode



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

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

➔ normierte Steuerkennlinie für Gleichrichter mit Freilauf:

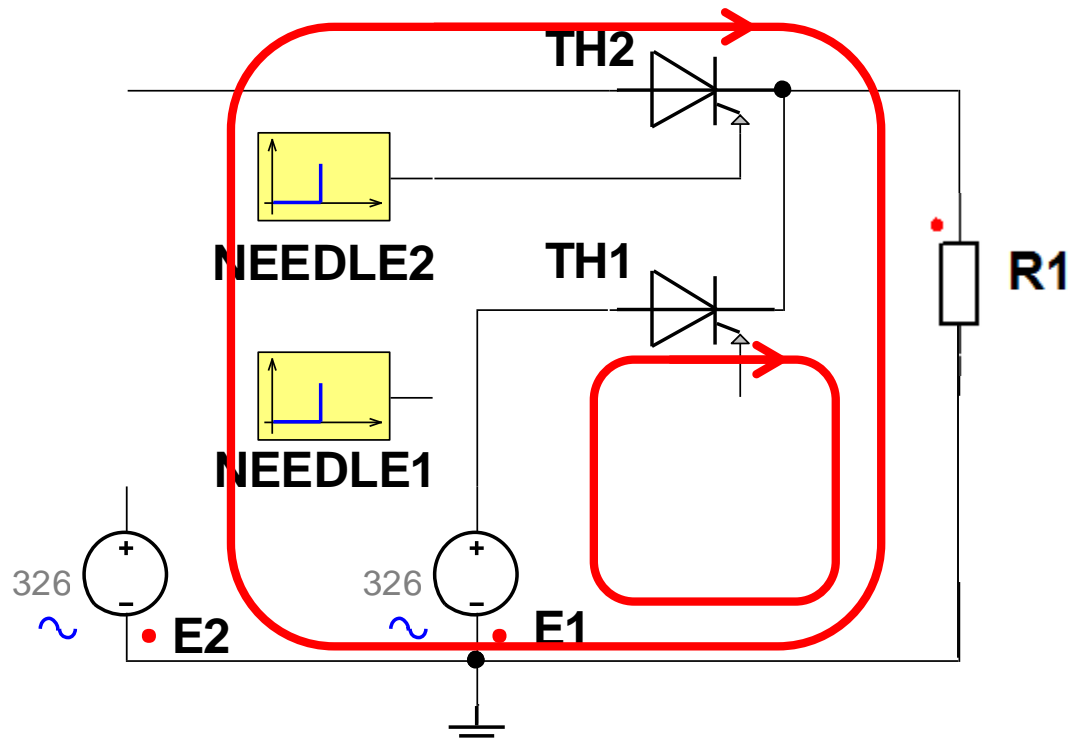


# M1C – Schaltung: Zusammenfassung

Aufbau und Funktionsweise (Spannungsverläufe) für

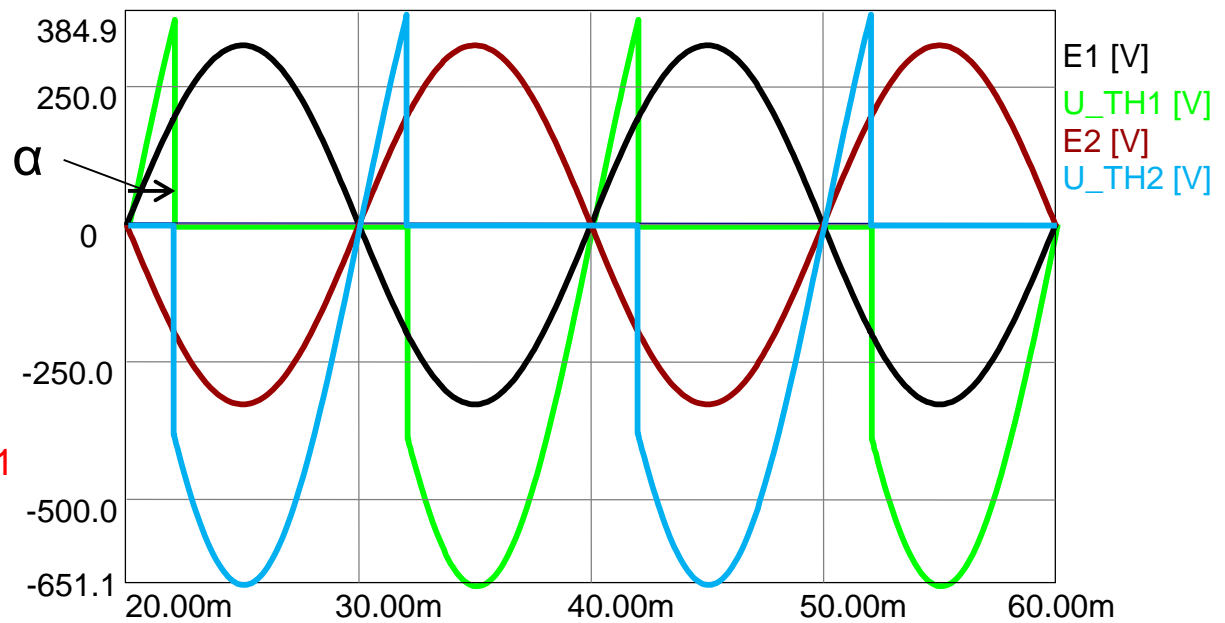
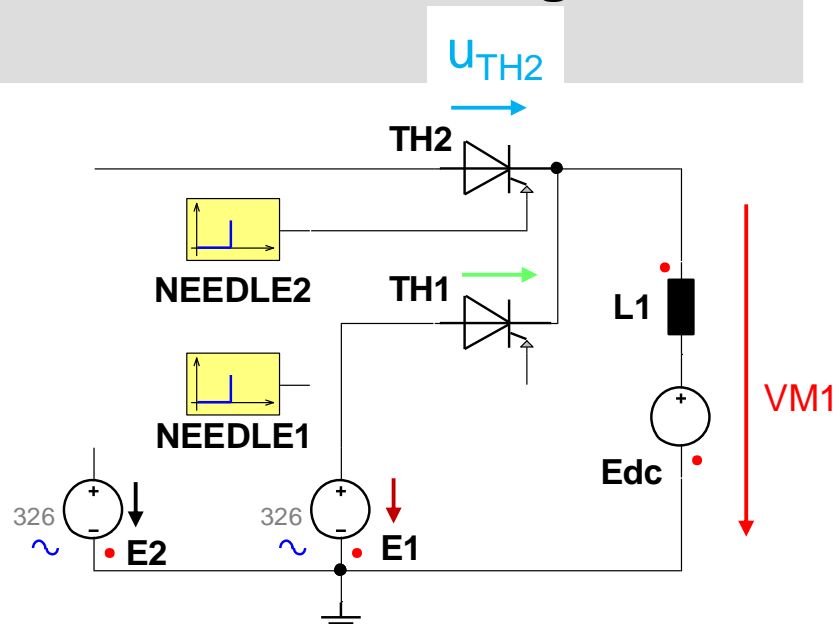
- ohmsche Last
- induktive Last
- ohmsch-induktive Last
- ohmsch-induktive Last mit Freilaufdiode

## M2C – Schaltung mit ohmscher Last



- gesteuerte 2-Puls-Mittelpunktschaltung

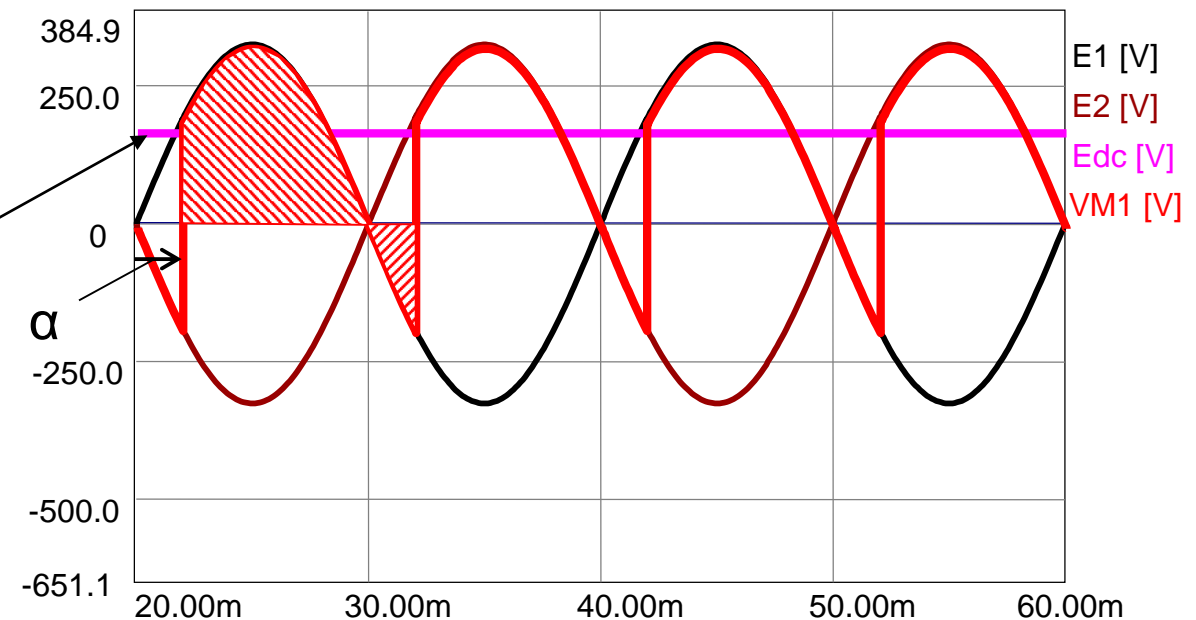
# M2C – Schaltung



Zündwinkel  $\alpha < 90^\circ$  el

→ Ausgangsspannung  $U_{dia} > 0$

→ Gleichrichterbetrieb



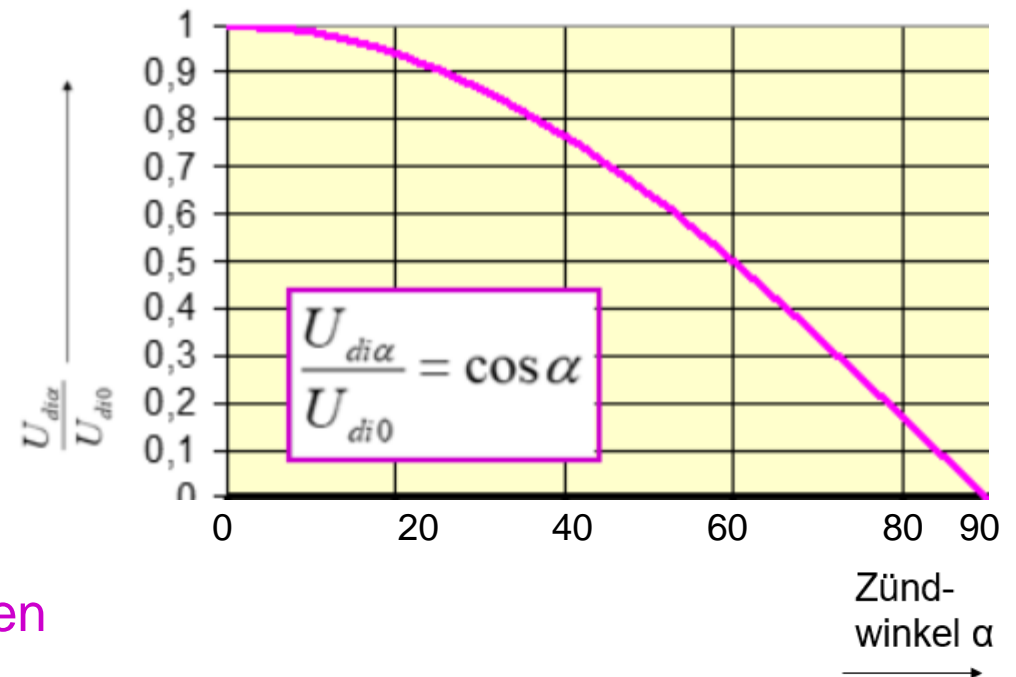
# M2C - Schaltung

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

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

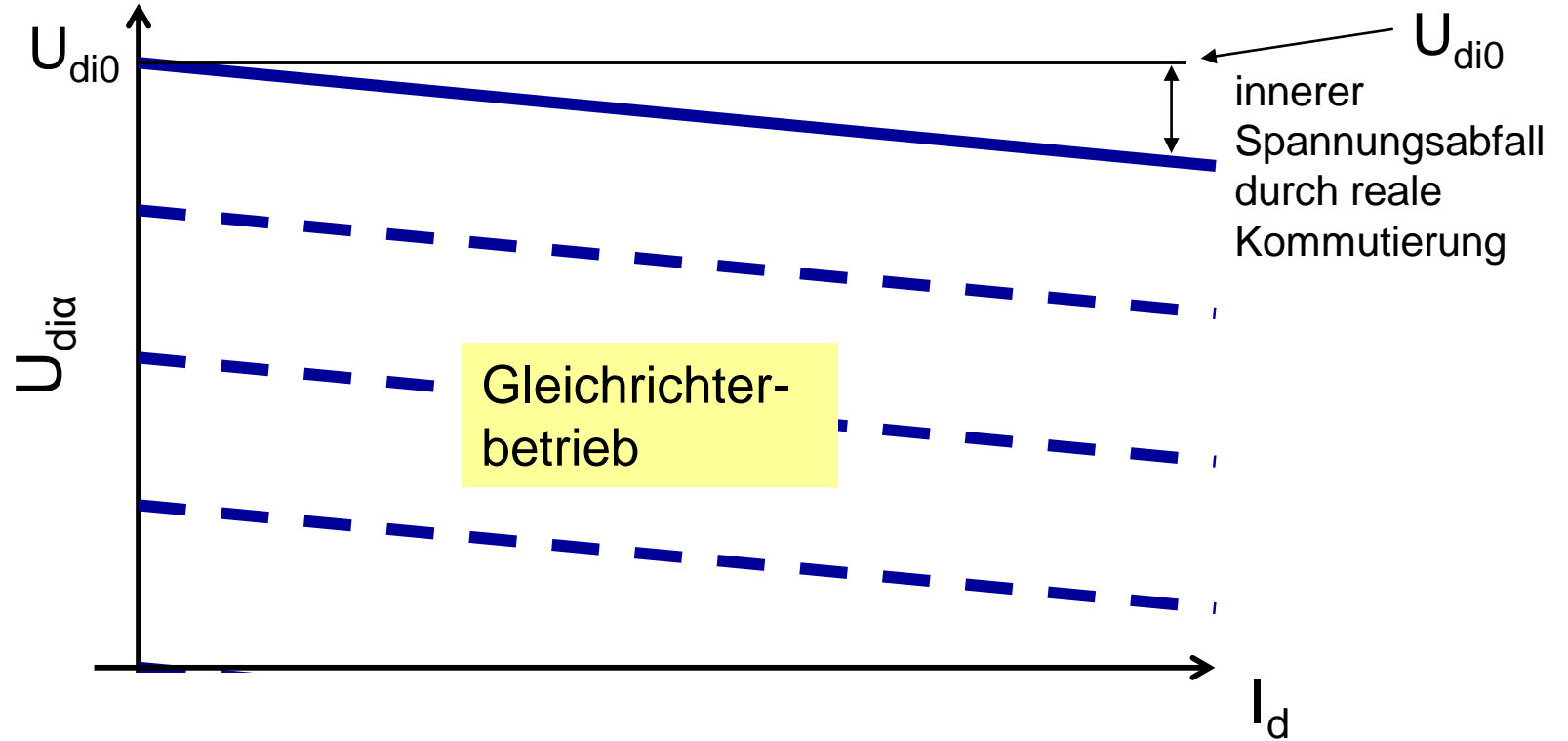
$$U_{di\alpha} = \frac{\sqrt{2}E}{\pi} \cdot 2 \cos \alpha$$

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

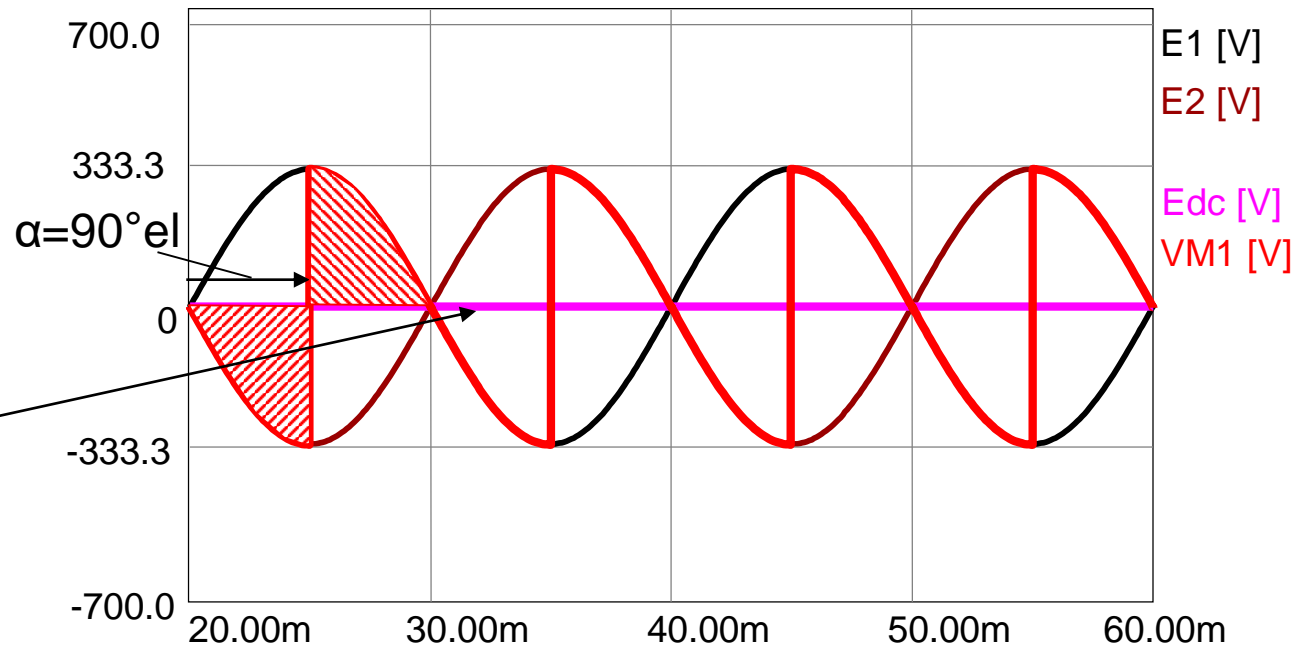
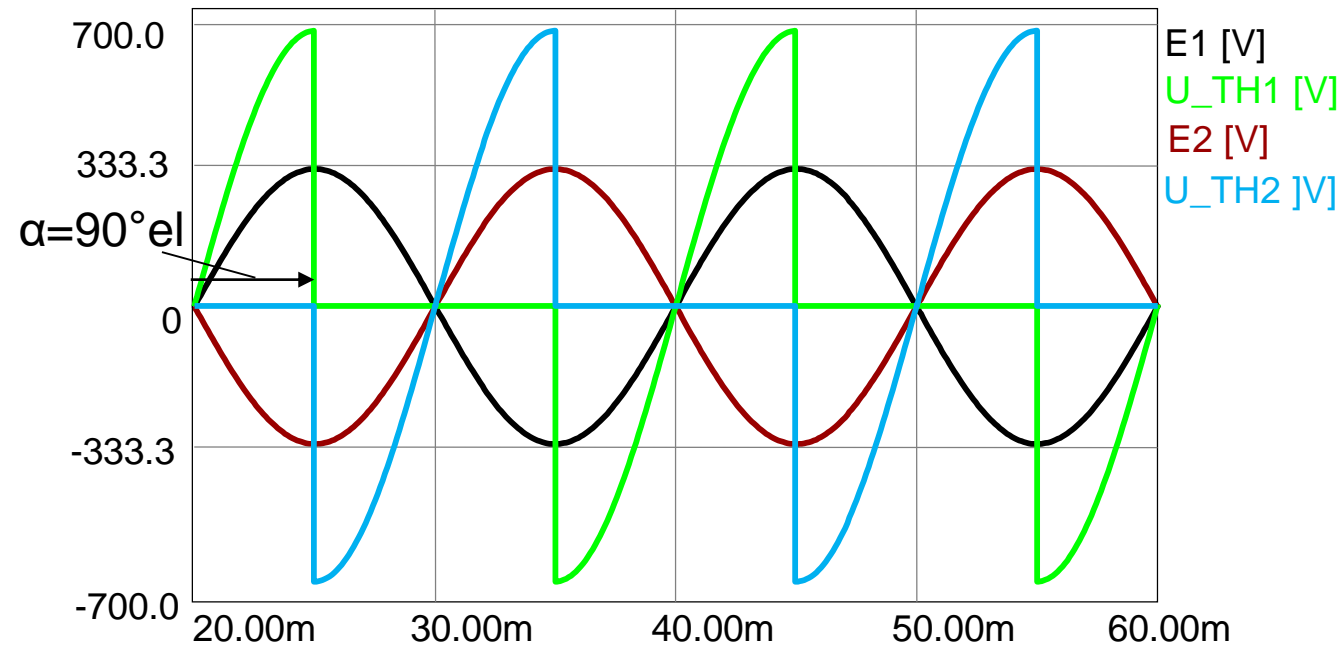
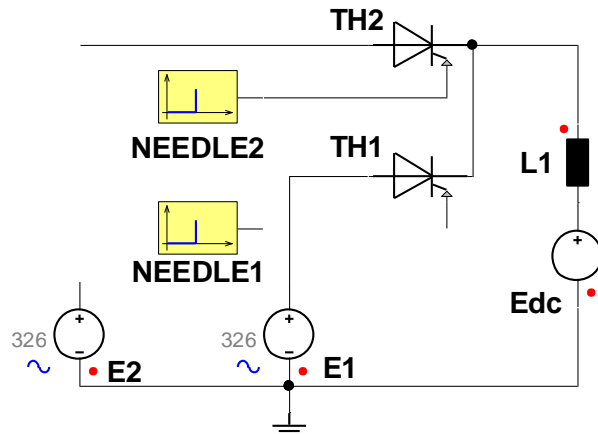


→ für alle vollgesteuerten Schaltungen





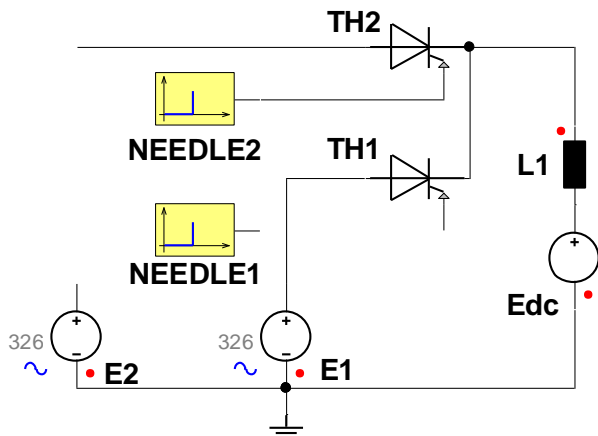
# M2C – Schaltung mit induktiver Last



Zündwinkel  $\alpha = 90^\circ$

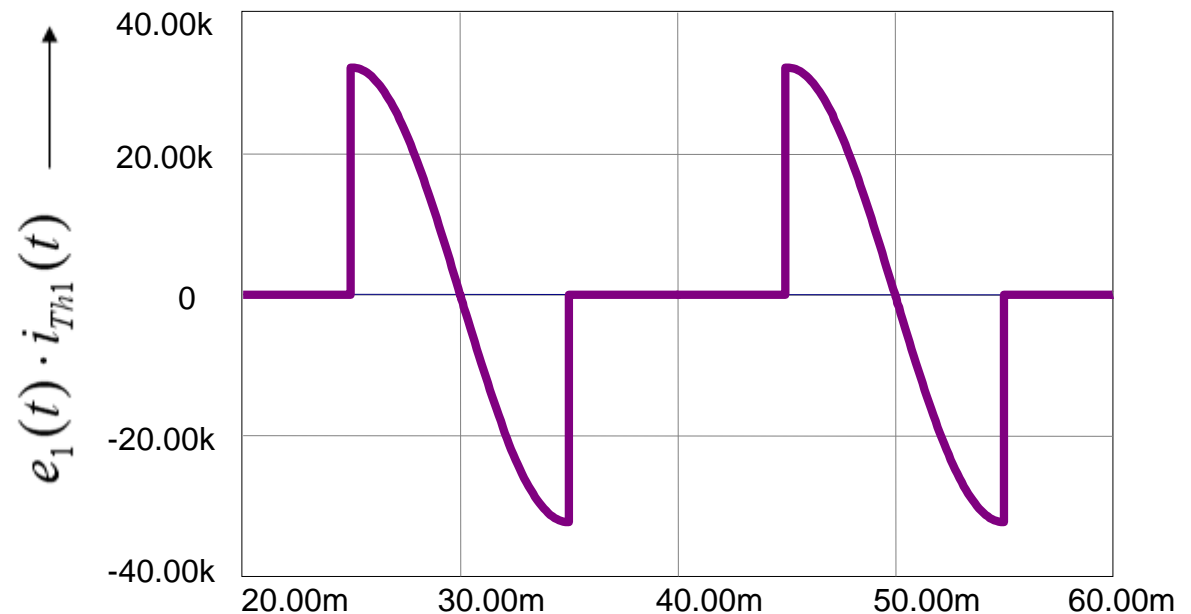
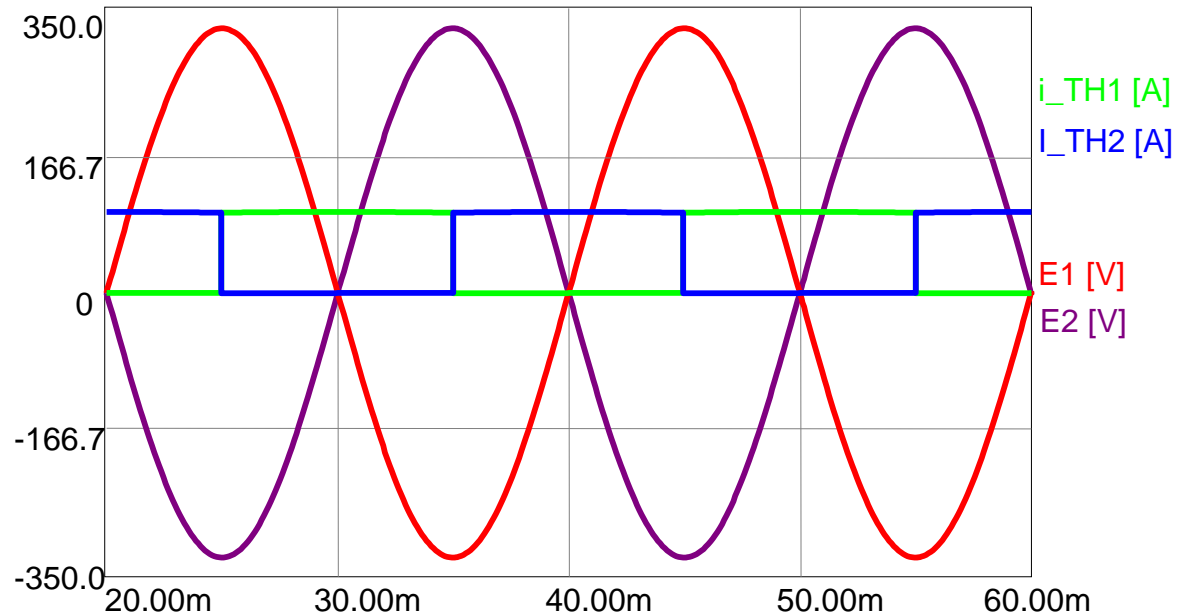
$$\cos 90^\circ = 0 \rightarrow U_{di90^\circ} = 0$$

# M2C – Schaltung mit induktiver Last

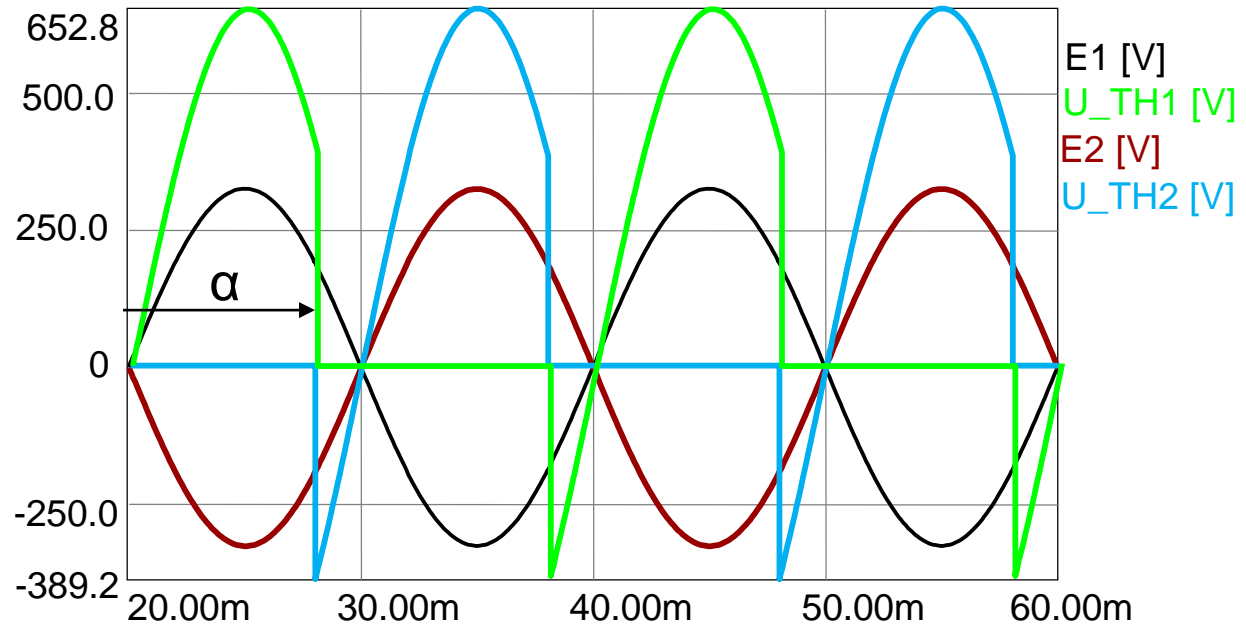
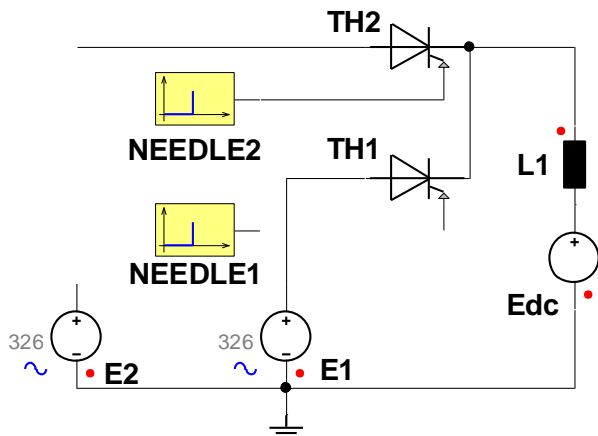


$\alpha=90^\circ$ el

➔ reine Blindleistung!



# M2C – Schaltung mit induktiver Last

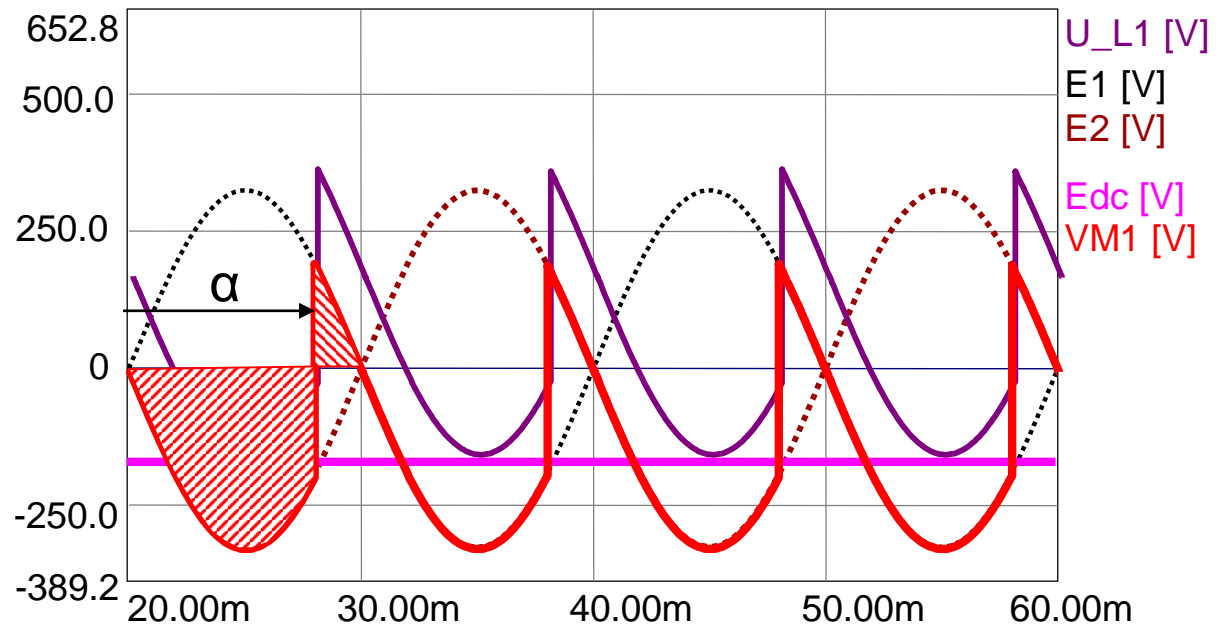


Zündwinkel  $> 90^\circ$ el

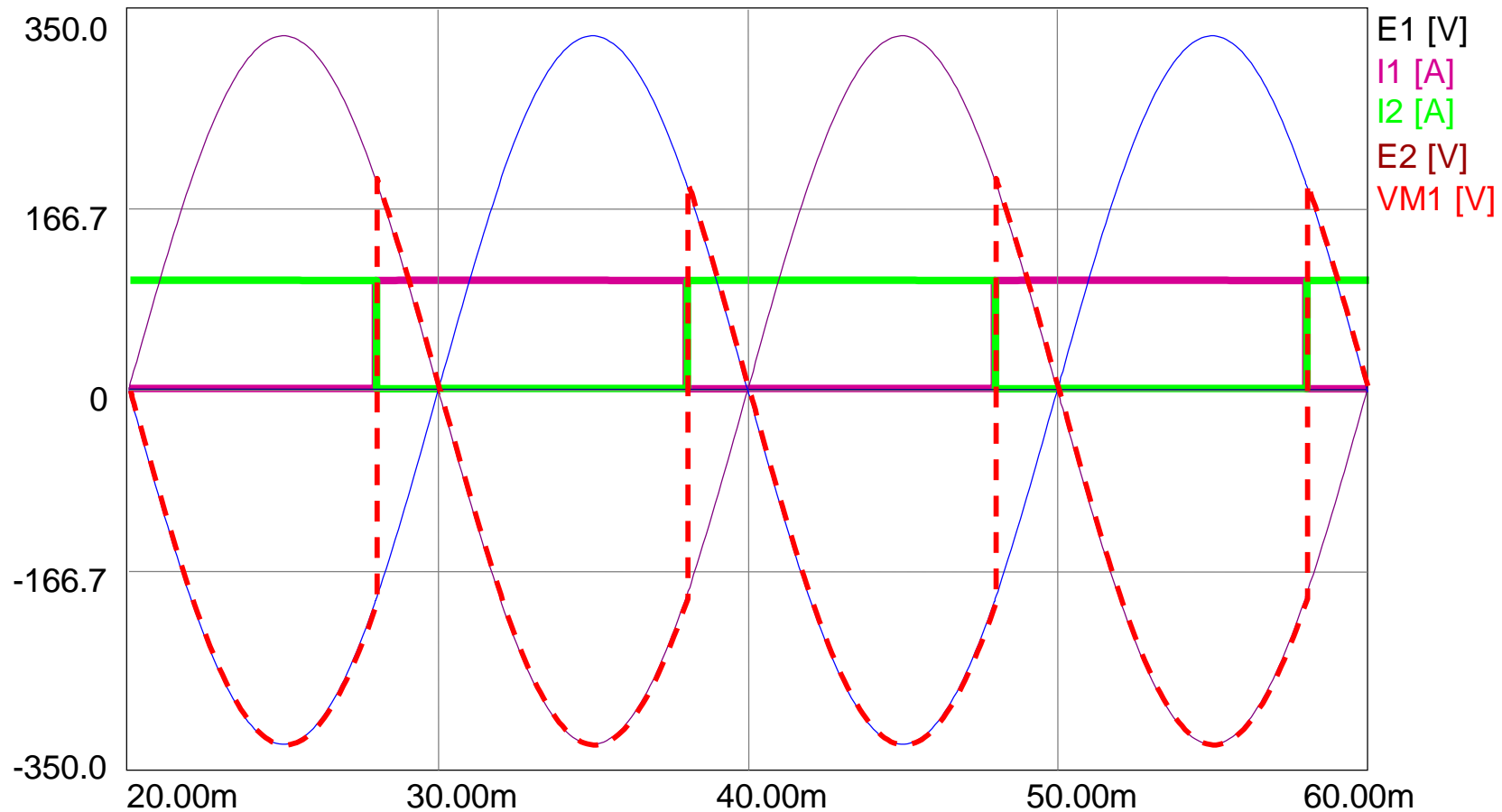
→ Ausgangsspannung  $< 0$  !

→ Wechselrichterbetrieb

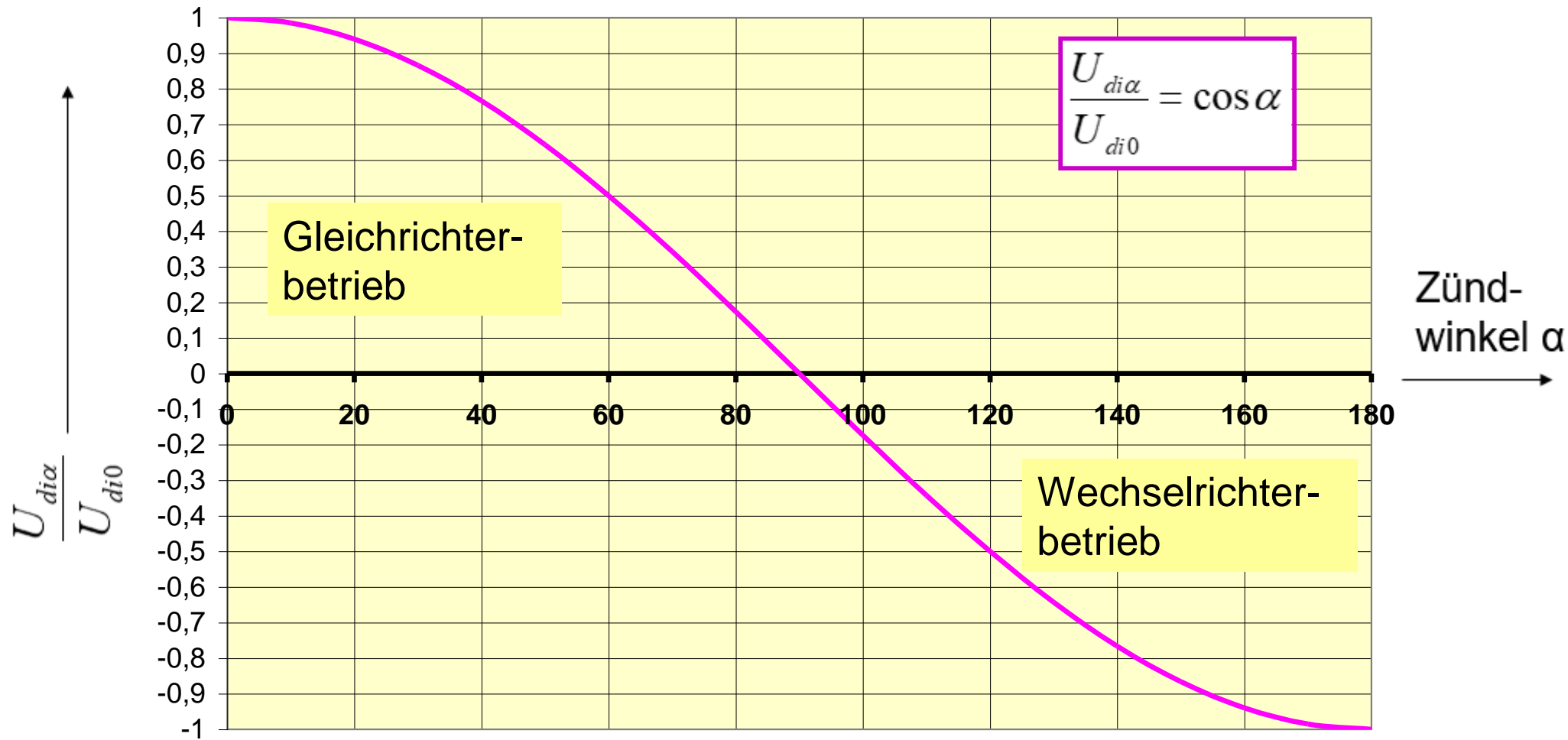
→ Netzeinspeisung !

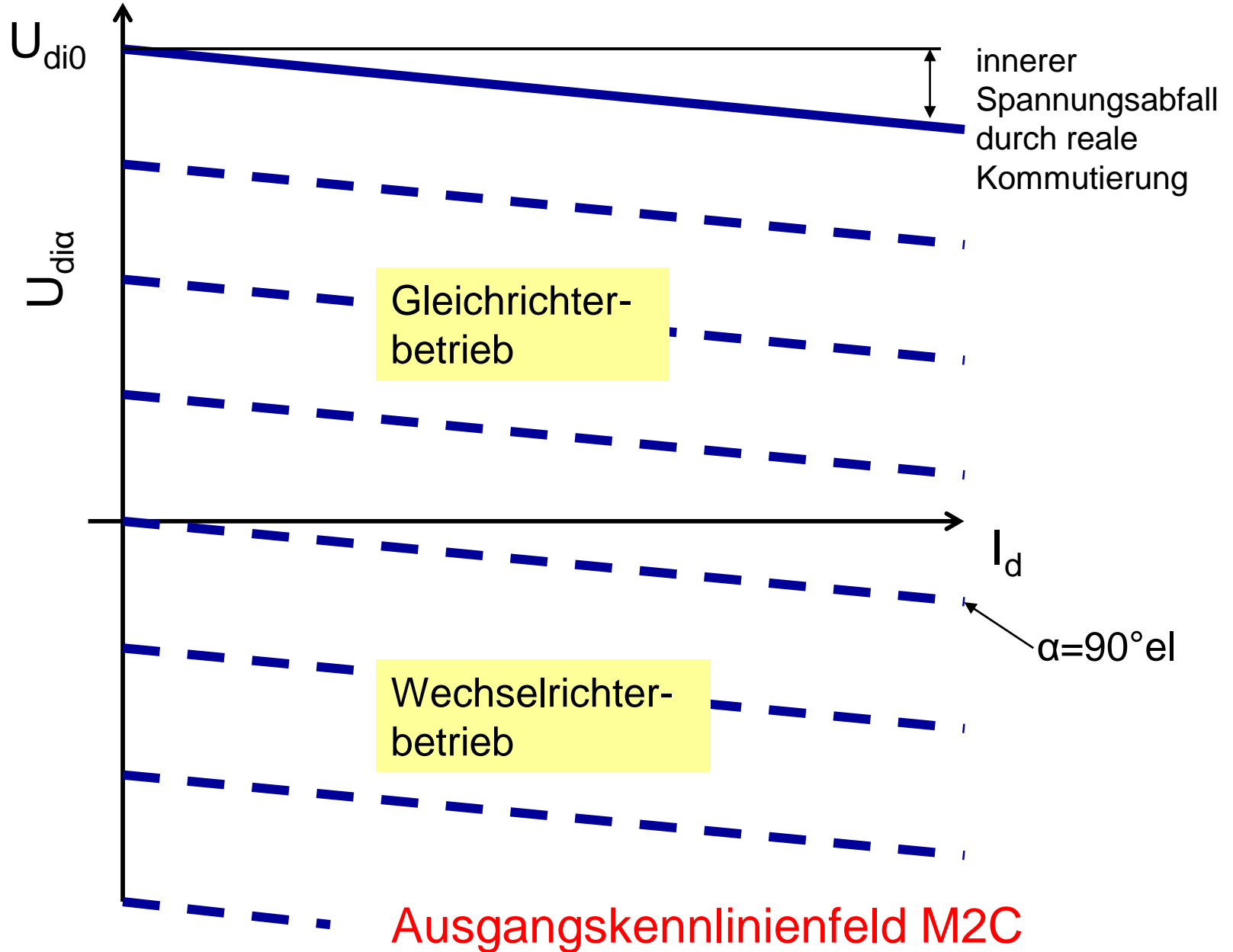


## Ströme bei $\alpha > 90^\circ$

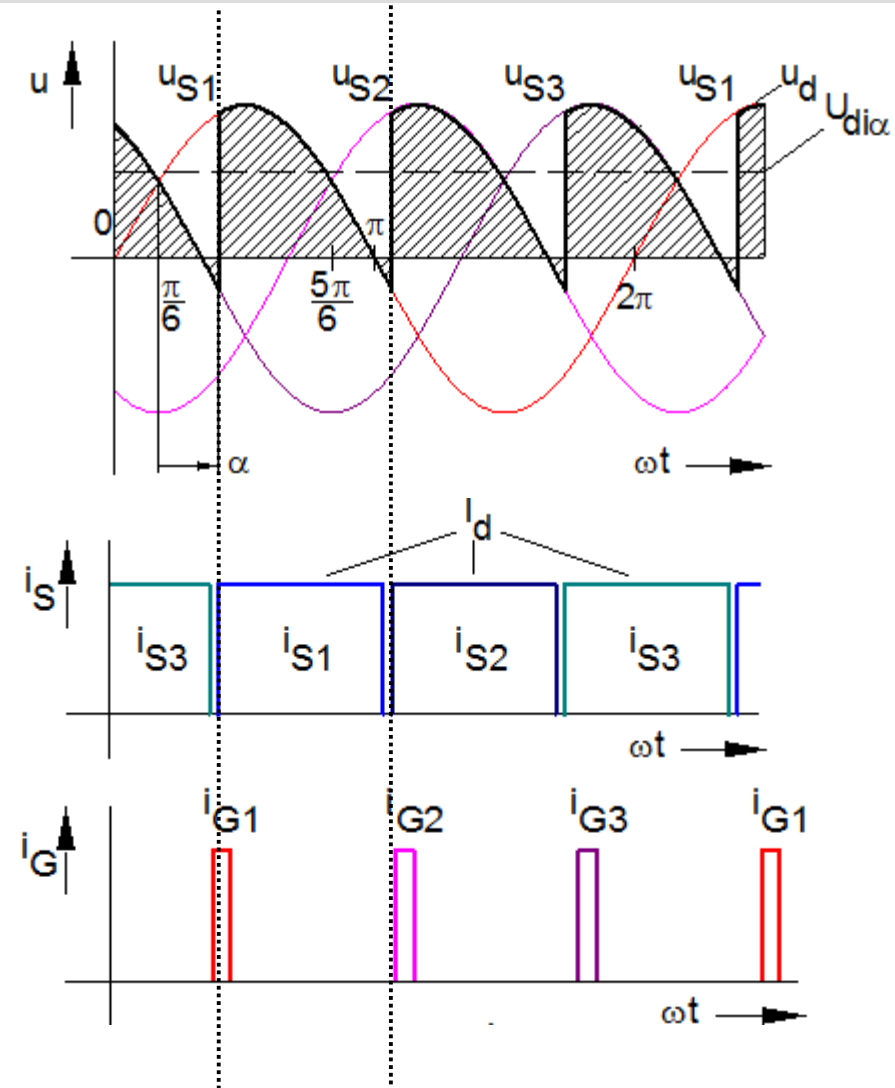
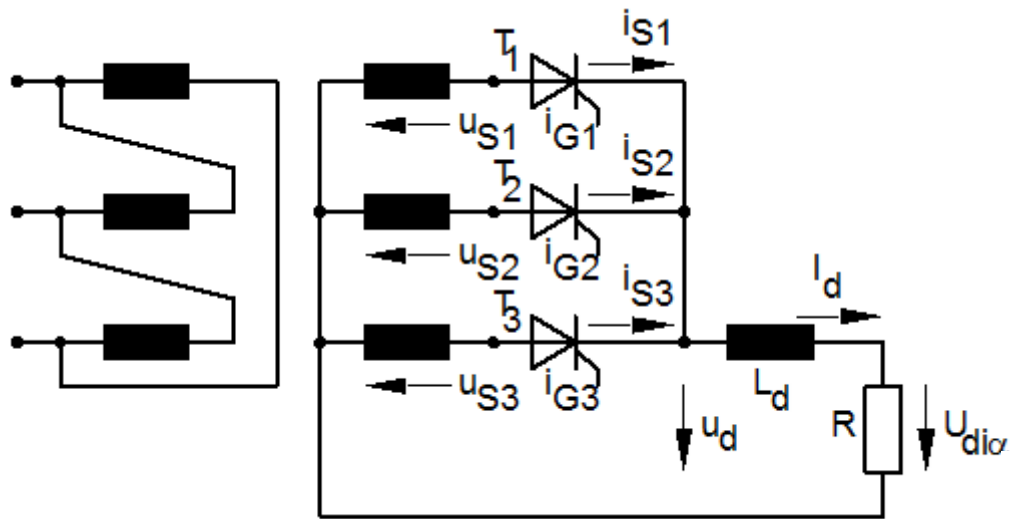


# Steuerkennlinie M2C mit $L \rightarrow \infty$ und Gegenspannungslast





# M3C – Schaltung mit ohmsch-induktiver Last





# M3C – Schaltung mit ohmsch-induktiver Last

Mittelwerte für

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

- Mittelwert der Gleichspannung  $U_{di(\alpha=0)} = \frac{3}{2\pi} \sqrt{3} \cdot \hat{e} = 1,17 \cdot E$
- Mittelwert des Gleichstromes  $I_d = \frac{U_{di(\alpha=0)}}{R}$

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

- Mittelwert der Gleichspannung  $U_{di(\alpha>0)} = \frac{3}{2\pi} \sqrt{3} \cdot \hat{e} \cdot \cos \alpha = 1,17 \cdot E \cdot \cos \alpha$
- Mittelwert des Gleichstromes  $I_d = \frac{U_{di(\alpha>0)}}{R}$

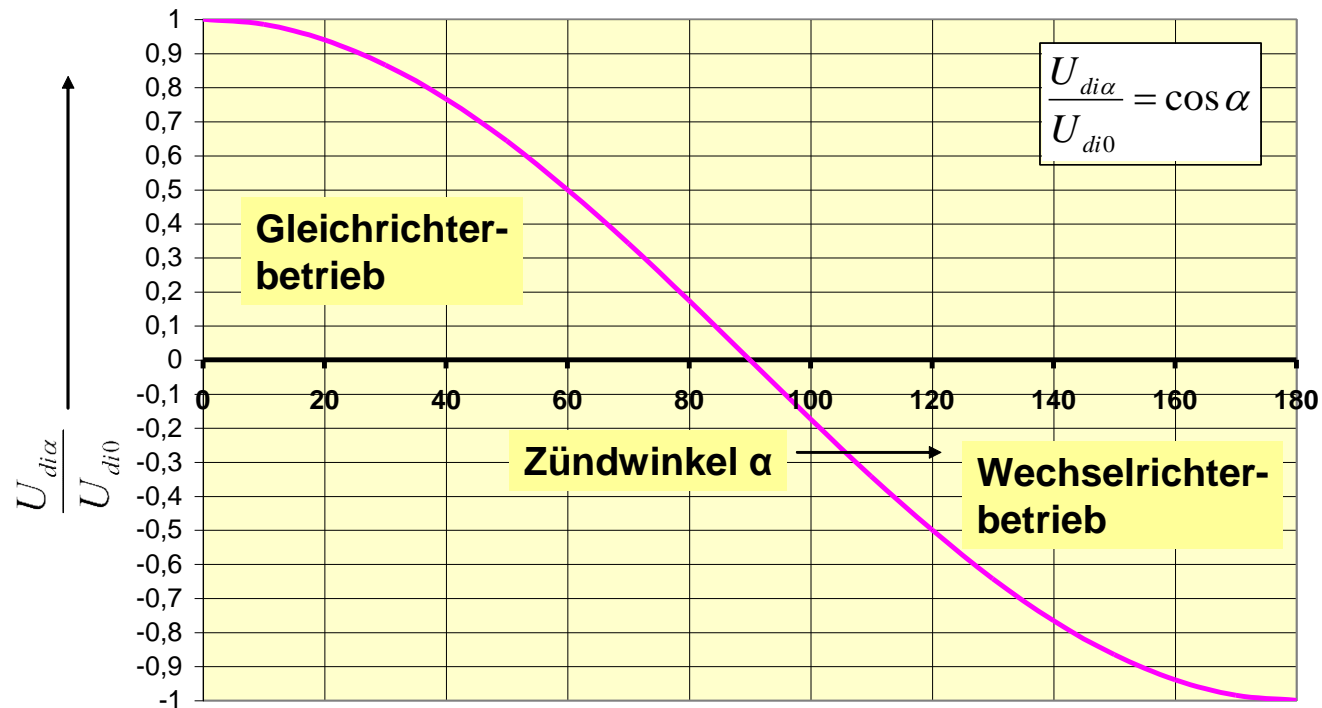
# M3C – Schaltung mit ohmsch-induktiver Last

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?

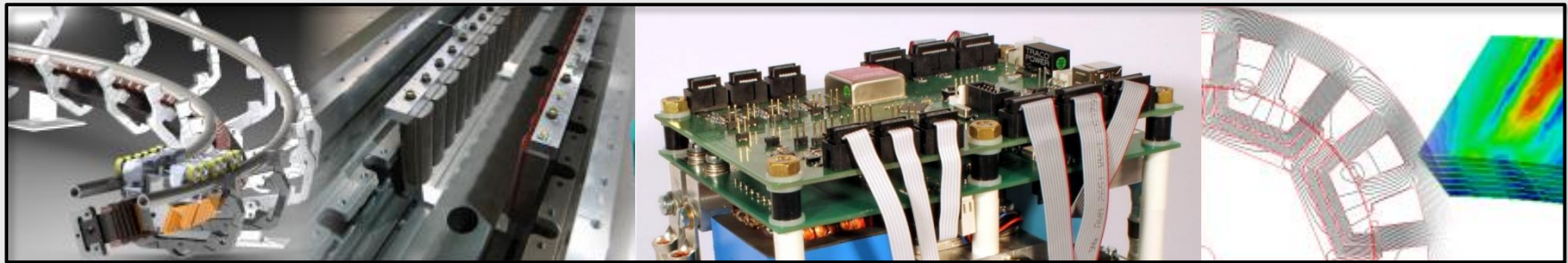
- **Gleichstromsteller**
  - Tiefsetzsteller
  - Hochsetzsteller



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. Robert Keilmann

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

T.: + 49 (0)531 3917910

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



NIEDERSÄCHSISCHES  
FORSCHUNGSZENTRUM  
FAHRZEUGTECHNIK