



Technische
Universität
Braunschweig

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



Grundlagen der Energietechnik

Teil 3: Grundlagen der Leistungselektronik

Vorlesung (1)

Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz

Institut für Elektrischen Maschinen, Antriebe und Bahnen - IMAB

Was machen wir heute ?

- Einführung in die Lehrveranstaltung GENT-Teil 3 / Leistungselektronik
- Start mit den Inhalten der Vorlesung

Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB)

Professoren und Mitarbeiter:

- Prof. Dr.-Ing. Markus Henke (Elektrische Antriebe)
- **Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz (Leistungselektronik)**
- Oberingenieur Dr.-Ing. Günter Tareilus
- 18 wissenschaftliche Mitarbeiter
- 7 Mitarbeiter in Werkstatt und Verwaltung



Räumlichkeiten:

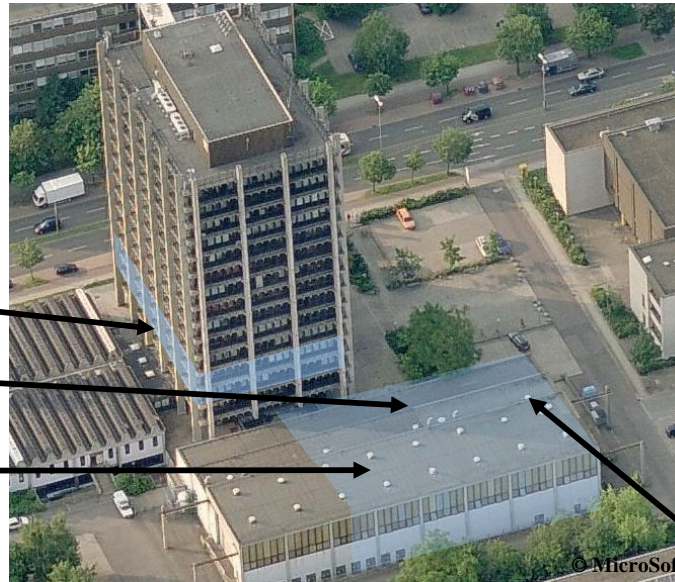
- Hans-Sommer-Str. 66
Braunschweig

Büros

Leistungselektronik-

Labore

Maschinenhalle



NFF NIEDERSÄCHSISCHES
FORSCHUNGSZENTRUM
FAHRZEUGTECHNIK



- Hermann-Blenk-Str. 42
Braunschweig

Werkstatt

www.imab.de

IMAB - Lehrveranstaltungen an der TU Braunschweig

Leistungselektronik

Bachelor	Elektr. Energietechnik (Maschinenbau)	SS
	Grundlagen der el. Energietechnik	SS
	Grundsaltungen der LE	WS
Master	Leistungselektronische Systeme	WS
	Angewandte Leistungselektronik	SS

Praktikum Leistungselektronik
WS

**Praktikum Antriebssysteme für
Elektrofahrzeuge**
SS

Praktikum Elektrische Maschinen
WS

Elektrische Antriebe

Bachelor	Grundlagen der el. Energietechnik	SS
	Energietechnik für Umweltingenieure	WS
	Elektrische Antriebe	WS
Master	Drehstromantriebe und deren Simulation	SS
	Entwurf elektrischer Maschinen	WS

Fahrzeugantriebe

Master	Antriebssysteme für den spurgebundenen Verkehr (Vorlesung „Elektrische Antriebe f. d. s. Verkehr“)	SS
	Elektrische Antriebe für Straßenfahrzeuge	WS

Beispiel für Leistungselektronik: Energieversorgung Laptop



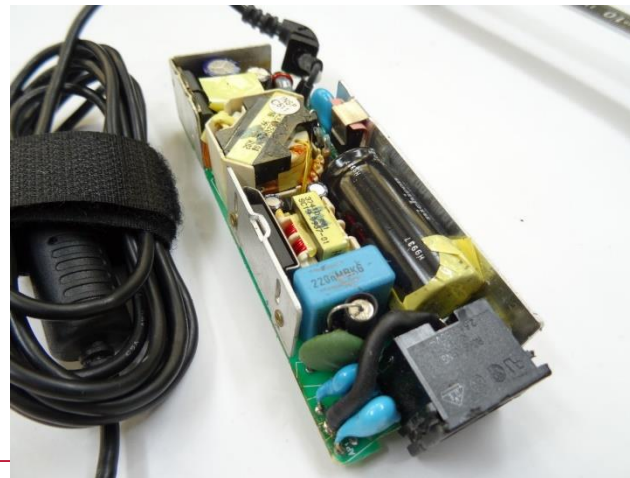
Akku
(20V DC)



Adapter
(Wandler)



Netz
(230V AC)



Leistungselektronik



CNC Bohr- und Fräsmaschine (Antrieb)



Photovoltaik-Anlage (Wechselrichter) [Quelle: SMA]



Bahn (Traktion, Boardversorgung)
[Quelle: wikipedia]



IT (Stromversorgung)



Förderband (Antrieb)



Energieversorgung (HGÜ für Anbindung Offshore-Windparks)
[Quelle: TenneT]



Elektrofahrzeug (Traktion, Batterieladung) [Quelle: VW]



Kernspintomograph (Stromversorgung) [Quelle: Siemens]

► Anpassung elektrischer Energie an die jeweilige Applikation

► Sehr verschiedene Anwendungsgebiete

IMAB – Themen und Ausstattung



(1) Leistungselektronik für Schwerpunkt-Applikationen

- Regenerative Energiesysteme einschließlich Speichieranbindung in Netzen
- Antriebe und Hilfsstromversorgungen für Elektrofahrzeuge und Industrieantriebe
- Mobile Energieversorgungssysteme, z.B. Batterieadegeräte in Elektrofahrzeugen

(2) Dimensionierung, Aufbau und Inbetriebnahme leistungselektronischer Wandler

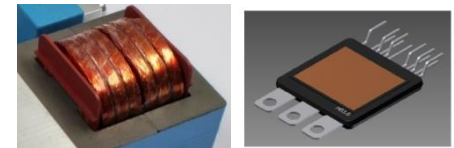
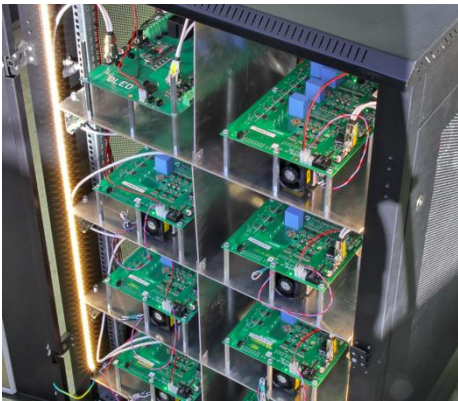
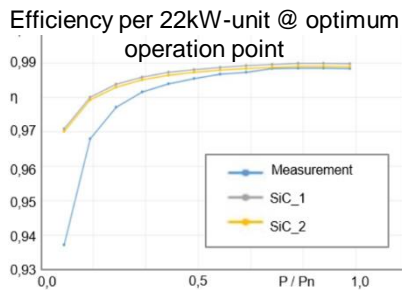
- a) Theoretische Bewertung von Schaltungskonzepten
- b) Experimentelle Bewertung und Optimierung
- c) Halbleiter auf Basis von Si, SiC, GaN

(3) Prüfstände für Vermessung von

- a) Leistungs-Halbleitern
- b) magnetischen Komponenten

(4) Mehr als 660 m² LE-Laborfläche

- für Aufbau und Betrieb von *elektrischen Maschinen und Leistungselektronik*



Die AG Leistungselektronik am IMAB ist umfangreich ausgestattet:



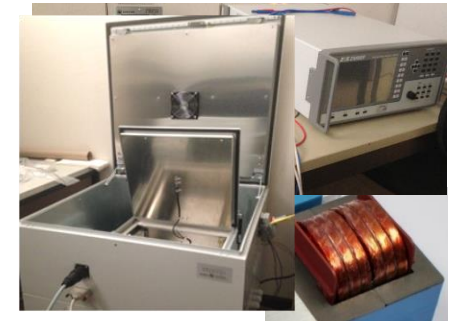
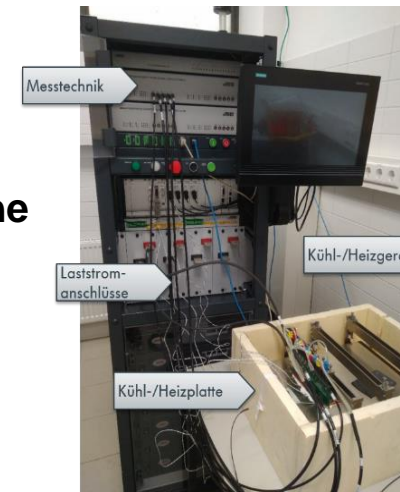
Ein Leistungselektronik-Labor



Ein E-Maschinen-Labor

Mehr als **660 m² Laborfläche** beherbergen

- Equipment für Aufbau, Betrieb, Test, Optimierung von
 - **leistungselektronischen Wandlern (bis 500 kW)**
 - elektrischen Maschinen (bis 300 kW)
- sowie **Prüfstände für die elektrische und thermische Charakterisierung leistungselektronischer Bauelemente** wie
 - Leistungs-Halbleiter-Schalter,
 - HF-Transformatoren, Induktivitäten, Kondensatoren.



Kalorimeter



Wechselstromteststand

Grundlagen der Energietechnik – Teil 3: Leistungselektronik

Informationen zum weiteren Ablauf der Lehrveranstaltung:

Dozenten:

- **Vorlesung:** Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz
- **Übung:** M.Sc. Robert Keilmann

Leistungsnachweis:

- Schriftliche Klausur (1/3 leistungselektronische Themen
mit Aufgaben ähnlich den Übungsaufgaben und Kurzfragen)

Material zur Vorlesung wird vor der Veranstaltung wird über StudIP zur Verfügung gestellt.

- **Hochschulinterne Dokumente, die nicht zur Weitergabe an Nichtteilnehmern der Vorlesung vorgesehen sind**

Empfohlene Bücher zur Vorlesung



Uwe Probst:
Leistungselektronik für Bachelors.
Hanser Verlag.
29,90 €



Joachim Specovius:
Grundkurs Leistungselektronik.
Springer Verlag.
34,99 €



Manfred Michel:
Leistungselektronik.
Springer Verlag.
59,99 €

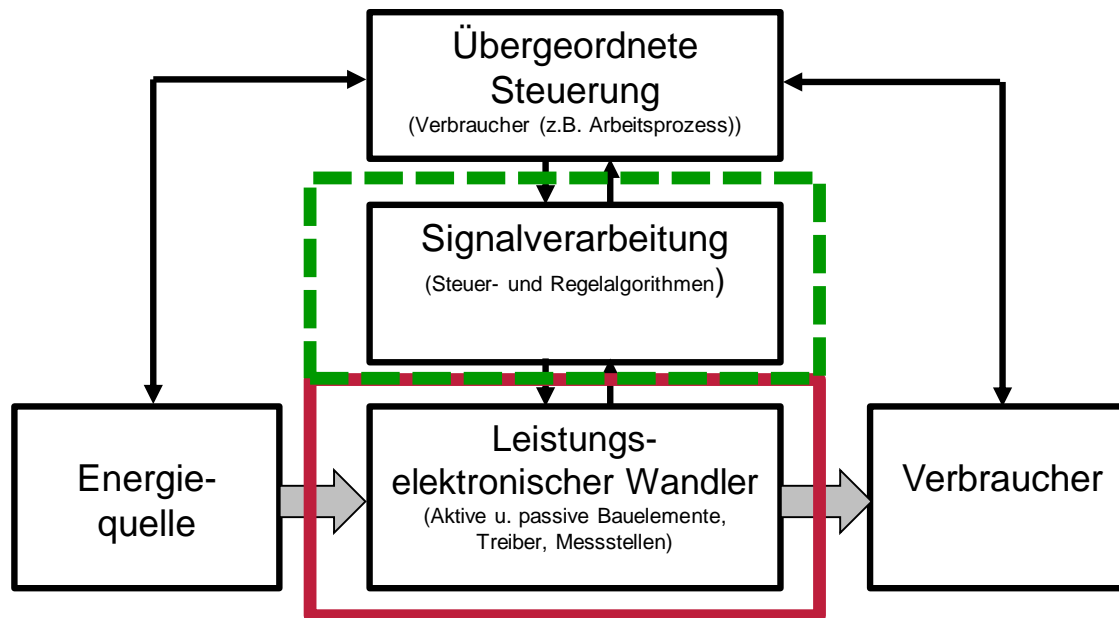
Inhalt der Lehrveranstaltung

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)

Was machen wir heute ?

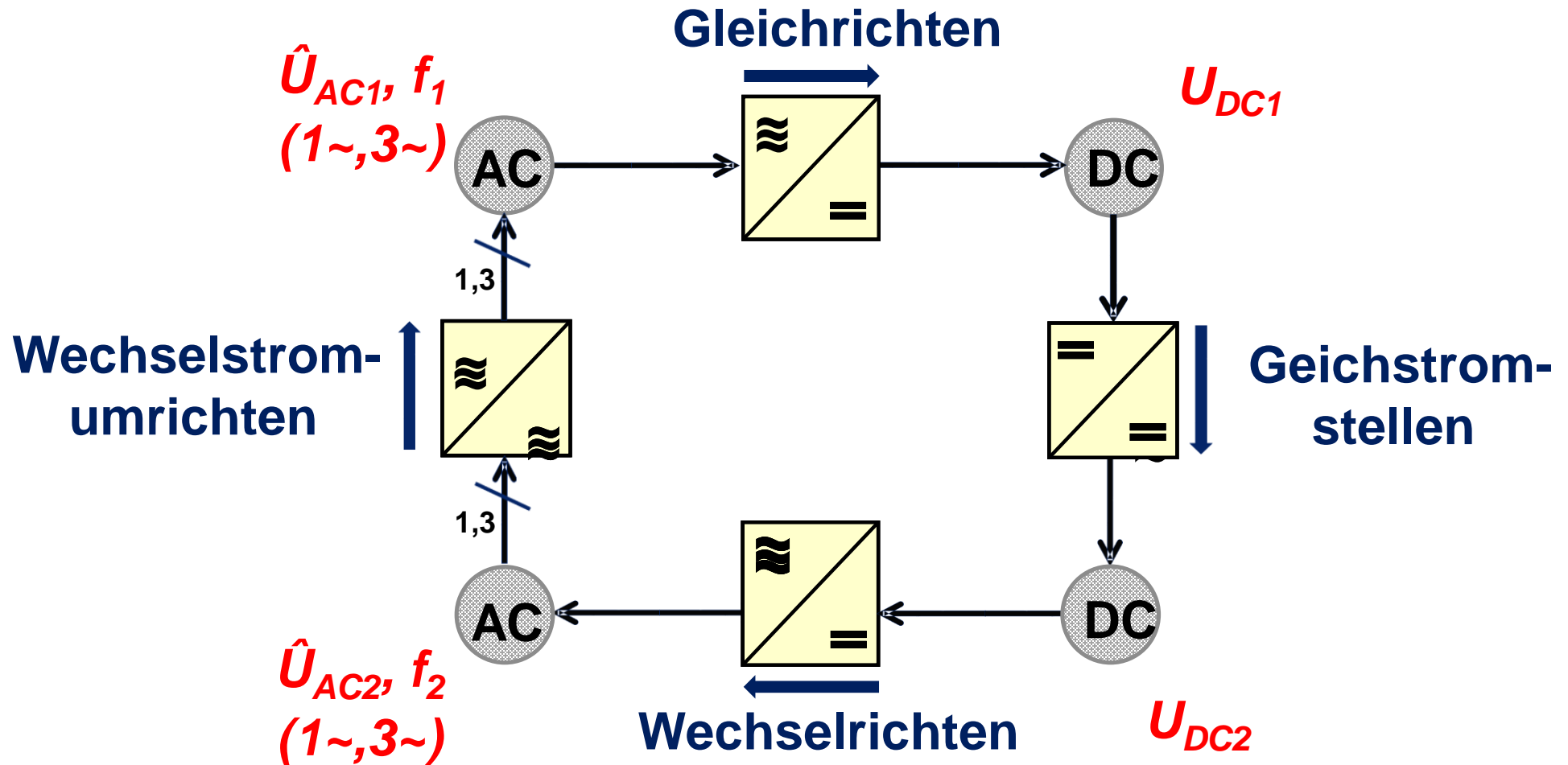
1. Einführung in die Leistungselektronik
 - 1.1. Aufgaben und Komponenten der Leistungselektronik
2. Leistungshalbleiter
 - 2.1. Bipolare Leistungshalbleiter: PN-Übergang, pn-Diode, Bipolartransistor, Thyristor, GTO
 - 2.2. Feldgesteuerte Leistungshalbleiter: MOSFET, IGBT
3. Netzgeführte Stromrichter (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)

Einführung: Aufgaben der Leistungselektronik und Applikationsbeispiele



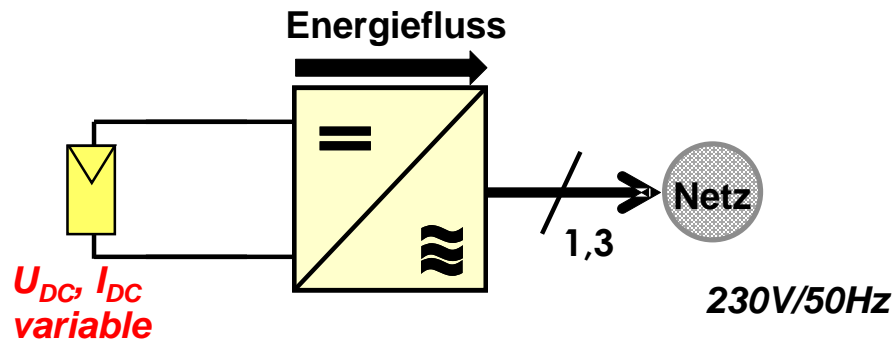
- **Leistungselektronik** wandelt die zur Verfügung stehende elektrische Energie für die Erfordernisse der jeweiligen Applikation um (**Energieumwandlung**).
Sie ist damit das **Bindeglied zwischen der Energiequelle und dem Energieverbraucher**.
Die Energieumwandlung erfolgt durch **Schaltbetrieb** und im Vergleich zur Analogtechnik verlustarm.
- **Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen** sind mit der Leistungselektronik eng verbunden und können zur Leistungselektronik gezählt werden.

Einführung: Aufgaben der Leistungselektronik und Applikationsbeispiele



Einführung: Aufgaben der Leistungselektronik und Applikationsbeispiele

Beispiel Photovoltaik (PV) – Wechselrichter



Anforderungen:

- Umwandlung DC_{variable} in AC_{Netz}
- MPP-Regelung des PV-Generators
- hoher Wirkungsgrad
- Sinusfilter (Einspeisung sinusförm. Stroms)
- $\cos\phi = 0,8 \dots 1$ (Blindleistungsaufnahme)
- EMI-Filter (DC- und AC-Seite)

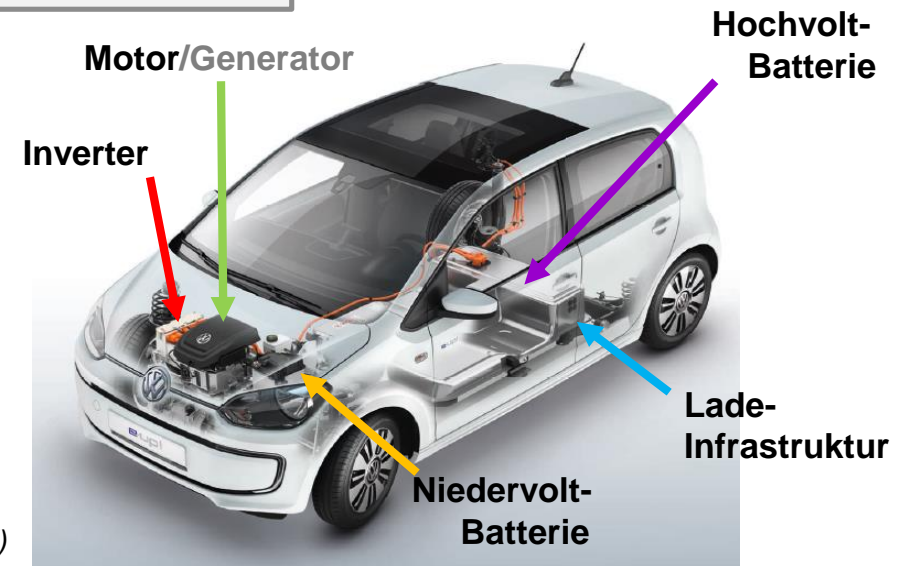
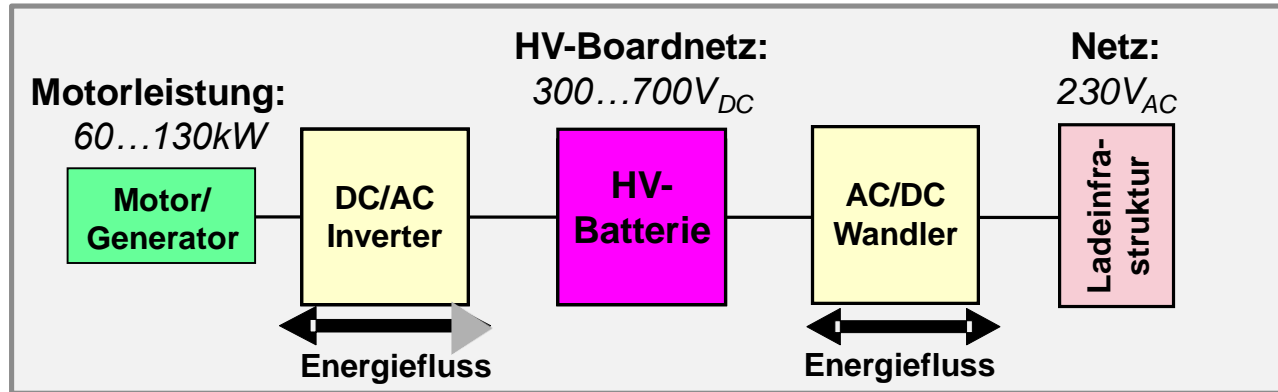


Wechselrichter in PV-Anlagen

[Quelle: SMA]

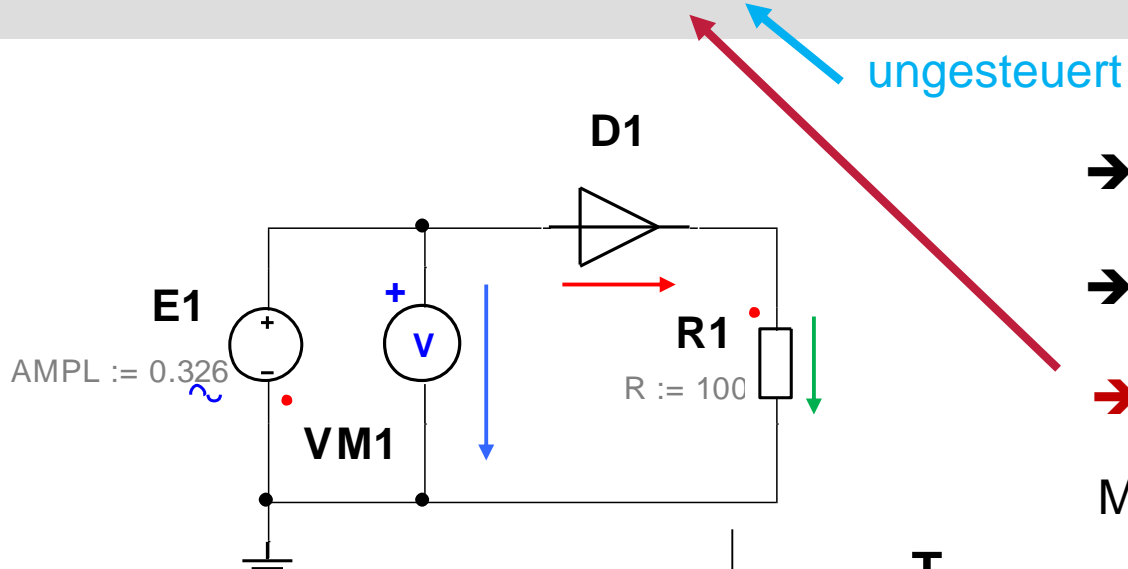
Einführung: Aufgaben der Leistungselektronik und Applikationsbeispiele

Beispiel: Elektrofahrzeug



Beispiel: e-Up! (Quelle: VW)

Gleichrichter: 1. M1U-Schaltung mit ohmscher Last

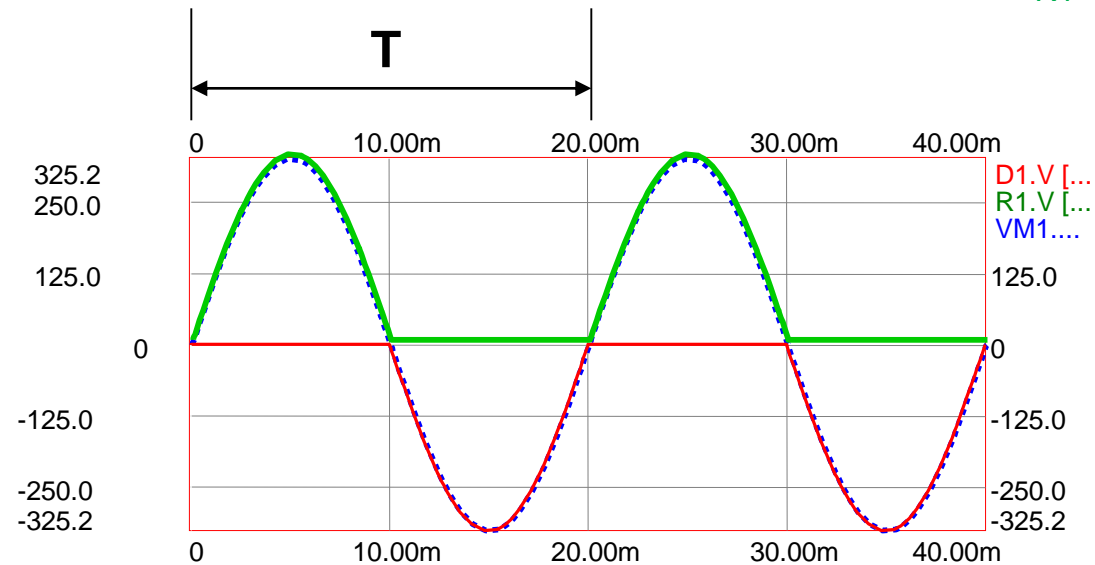


→ D1 leitend für $e_1(t) > 0$

→ wenn D1 leitend, dann ist $e_1(t) = u_{R1}(t)$

→ 1 Puls pro Periode

Maschensatz: $e_1(t) = u_{R1}(t) + u_{D1}(t)$



Kenngrößen der M1-Schaltung mit ohmscher Last:

- Mittlere Gleichspannung

$$U_{dav} = \frac{2\hat{e}_1}{\omega T} = \frac{\hat{e}_1}{\pi}$$

- Mittlerer Gleichstrom

$$I_{dav} = \frac{\hat{e}_1}{\pi R_1}$$

- Effektive Lastspannung

$$U_{drms} = \frac{\hat{e}_1}{2}$$

- Abgegebene Wirkleistung

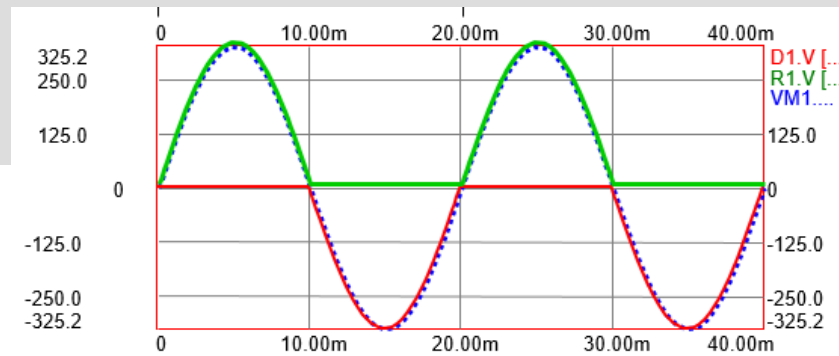
$$P_d = \frac{E1^2}{2 \cdot R1}$$

- Aufgenommene Scheinleistung

$$S = E1 \cdot I_{RMS} = \frac{E1^2}{\sqrt{2} \cdot R1}$$

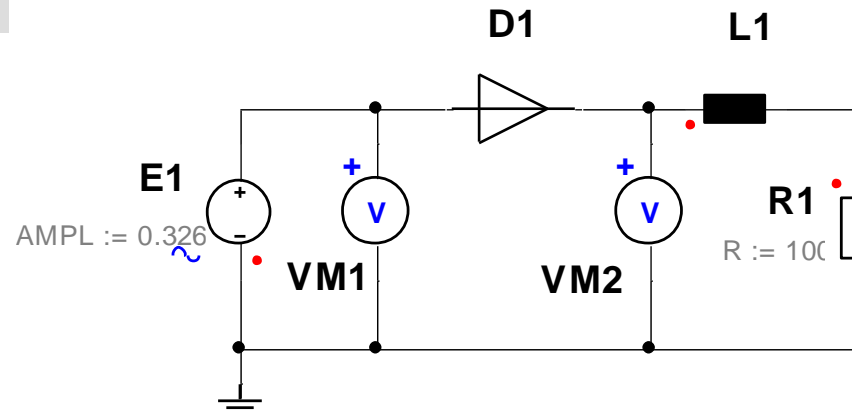
- Leistungsfaktor $\lambda = P/S$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}}$$



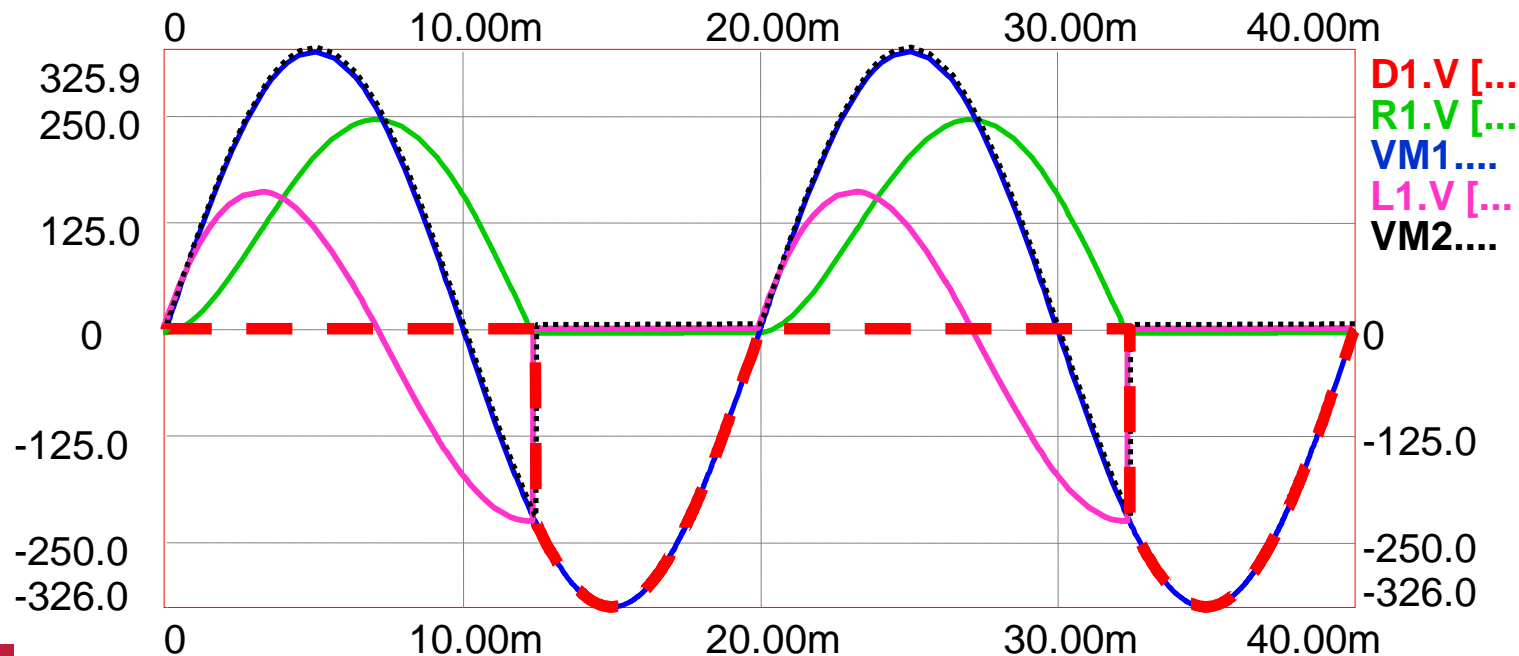
M1U-Schaltung mit ohmsch-induktiver Last

aufgenommene
Spannungs-Zeit-
Fläche =
abgegebener
Spannungs-Zeit-
Fläche!

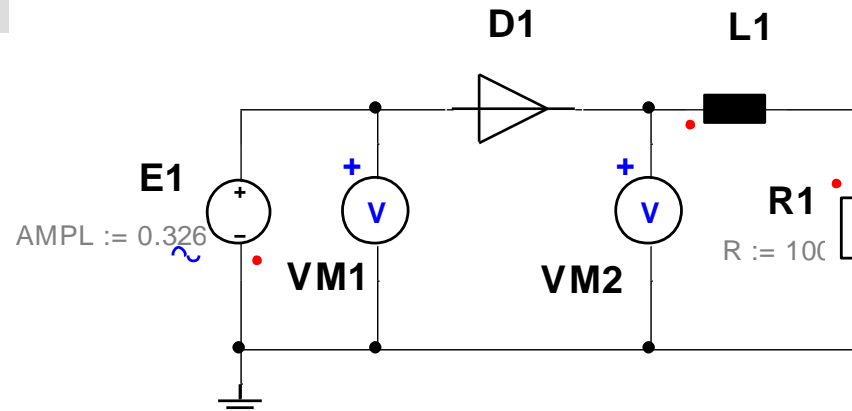


Beispiel:
 $L1=300\text{mH}$

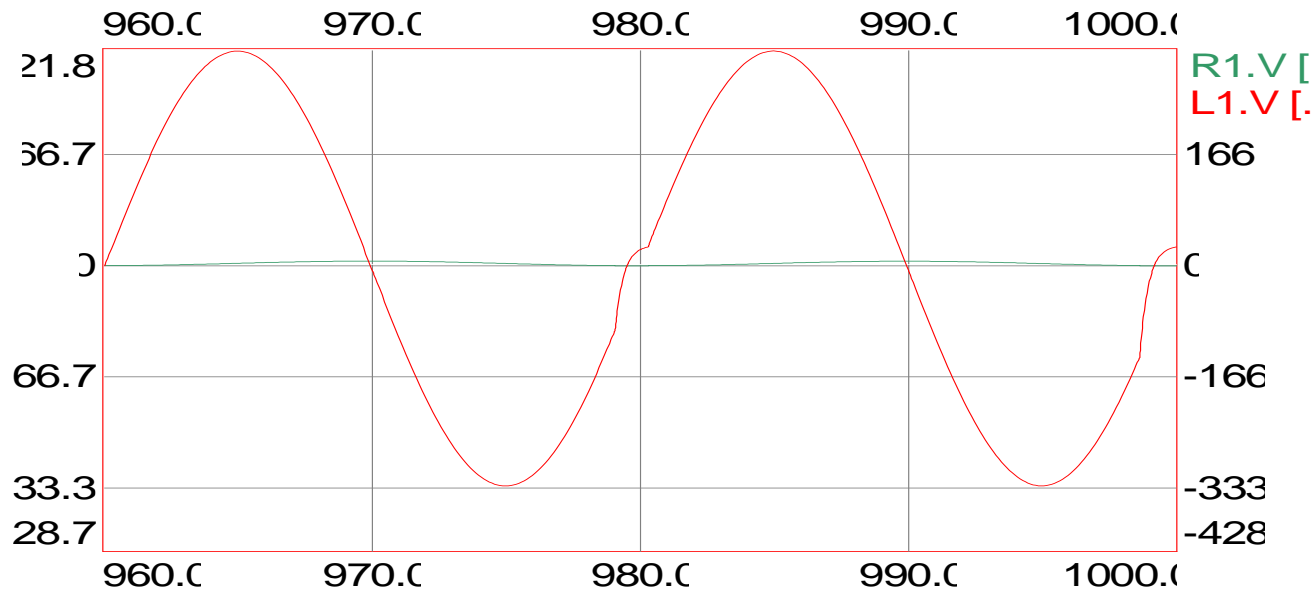
➤ Hier: kleiner
Induktivitätswert !



M1U-Schaltung mit ohmsch-induktiver Last



Beispiel:
L1=30H

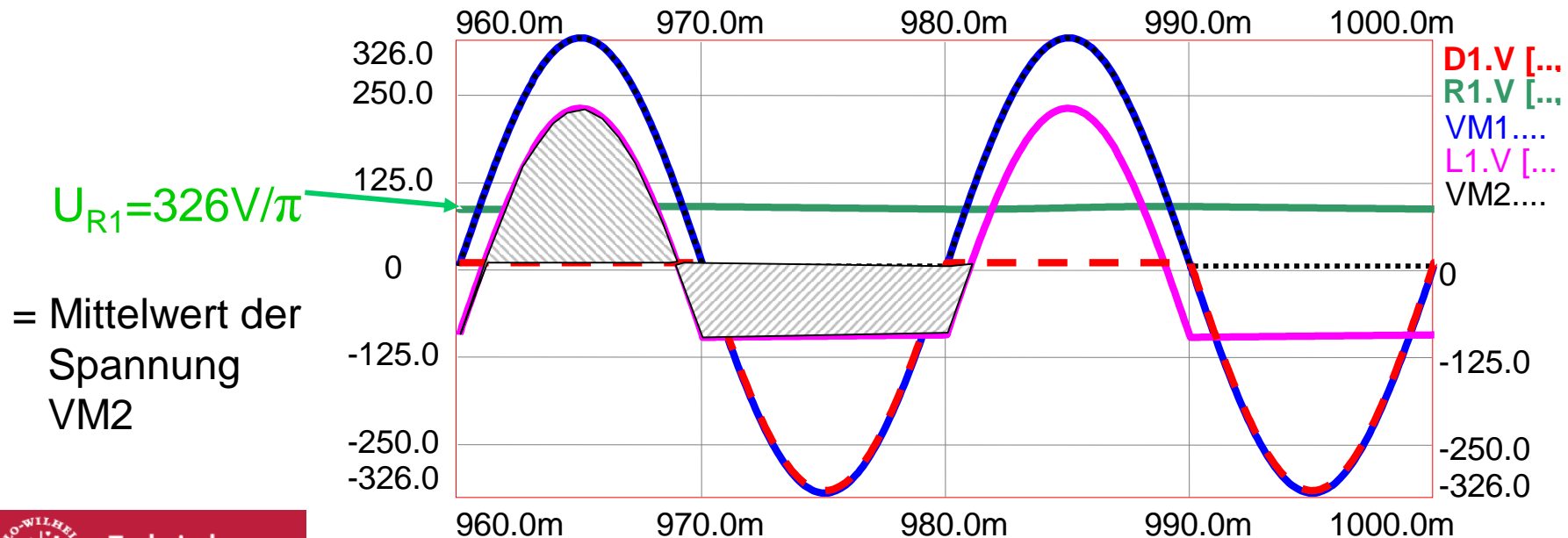
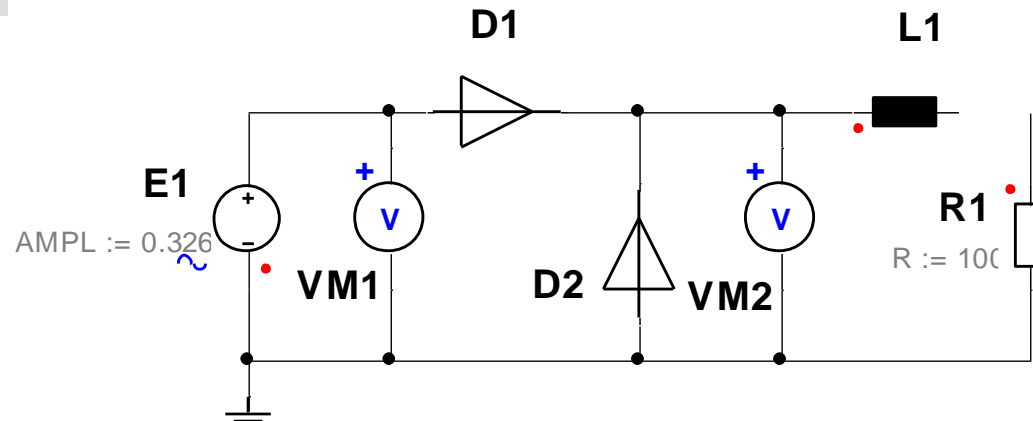


→ Leitdauer
wird bis an
T verlängert

→ Für $L \rightarrow \infty$
geht $I_d \rightarrow 0$

M1U-Schaltung mit ohmsch-induktiver Last + Freilauf

aufgenommene
Spannungs-Zeit-
Fläche =
abgegebener
Spannungs-Zeit-
Fläche!

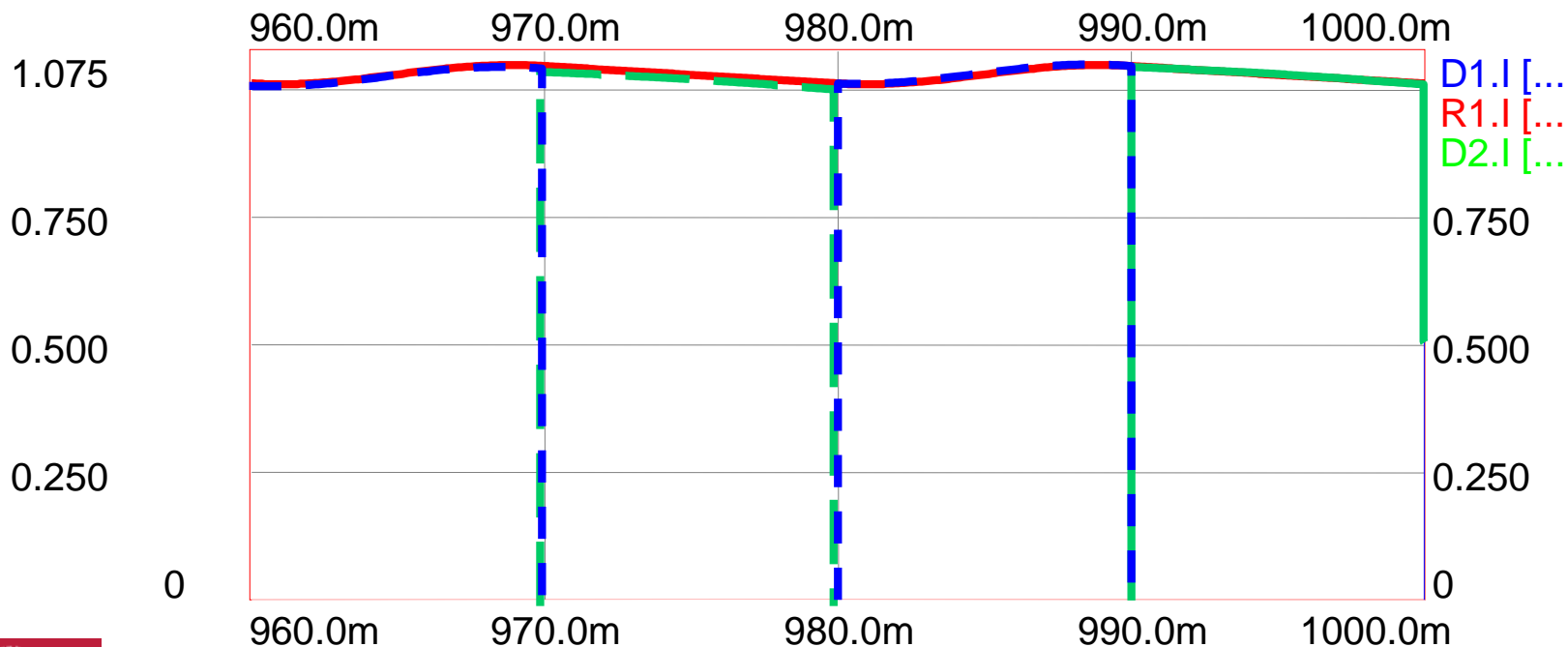


M1U-Schaltung mit ohmsch-induktiver Last + Freilauf

Bei einer hinreichend großen Drossel fließt glatter Gleichstrom der Größe

$$I_d = (1,41 \cdot E_1) / (\pi \cdot R_1)$$

Der Diodenstrom hat dann einen rechteckförmigen Verlauf!



Kenngrößen der M1-Schaltung mit ohmsch-induktiver Last + Freilauf

- Abgegebene Wirkleistung
(Gleichstromseite)

$$P_d = I_d \cdot U_d = \frac{U_d^2}{R1}$$

- Mittlere Gleichspannung

$$U_d = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E1$$

$$\Rightarrow P_d = \frac{U_d^2}{R1} = \frac{2E1^2}{\pi^2 R1}$$

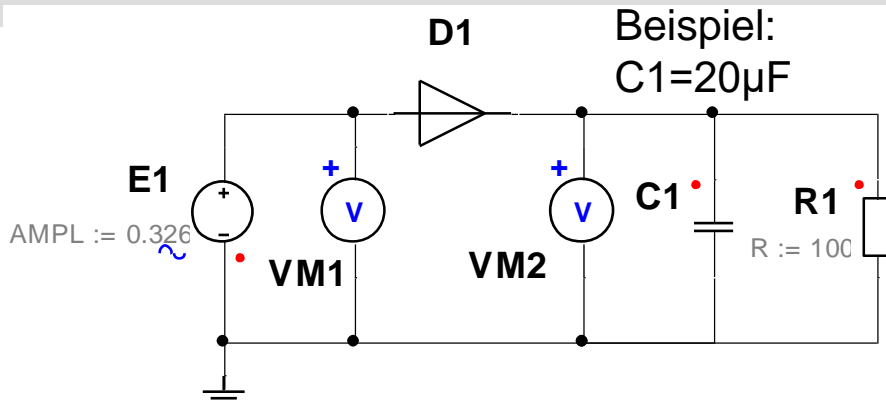
- Scheinleistung
(Wechselstromseite)

$$S = E1 \cdot I_{RMS} = \frac{E1^2}{\pi \cdot R1}$$

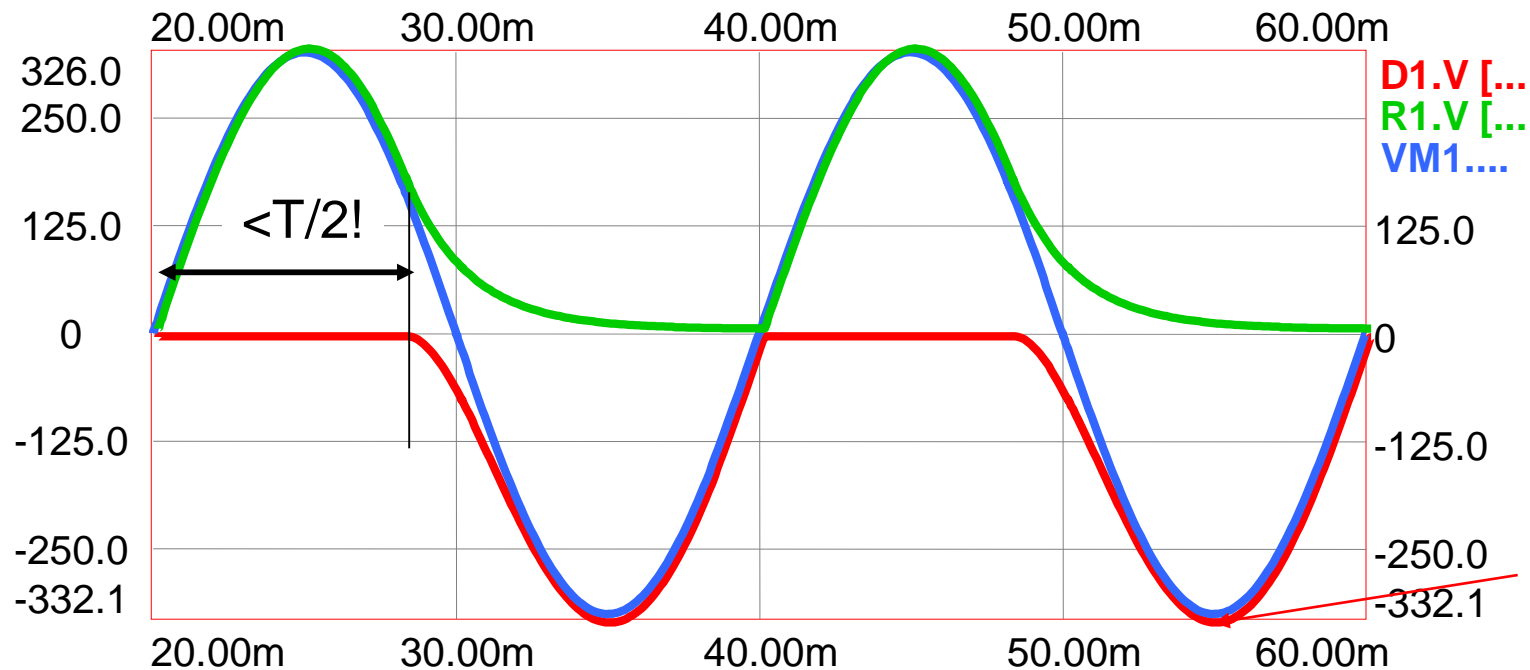
- Leistungsfaktor

$$\lambda = \frac{2}{\pi}$$

M1U-Schaltung mit ohmsch-kapazitiver Last



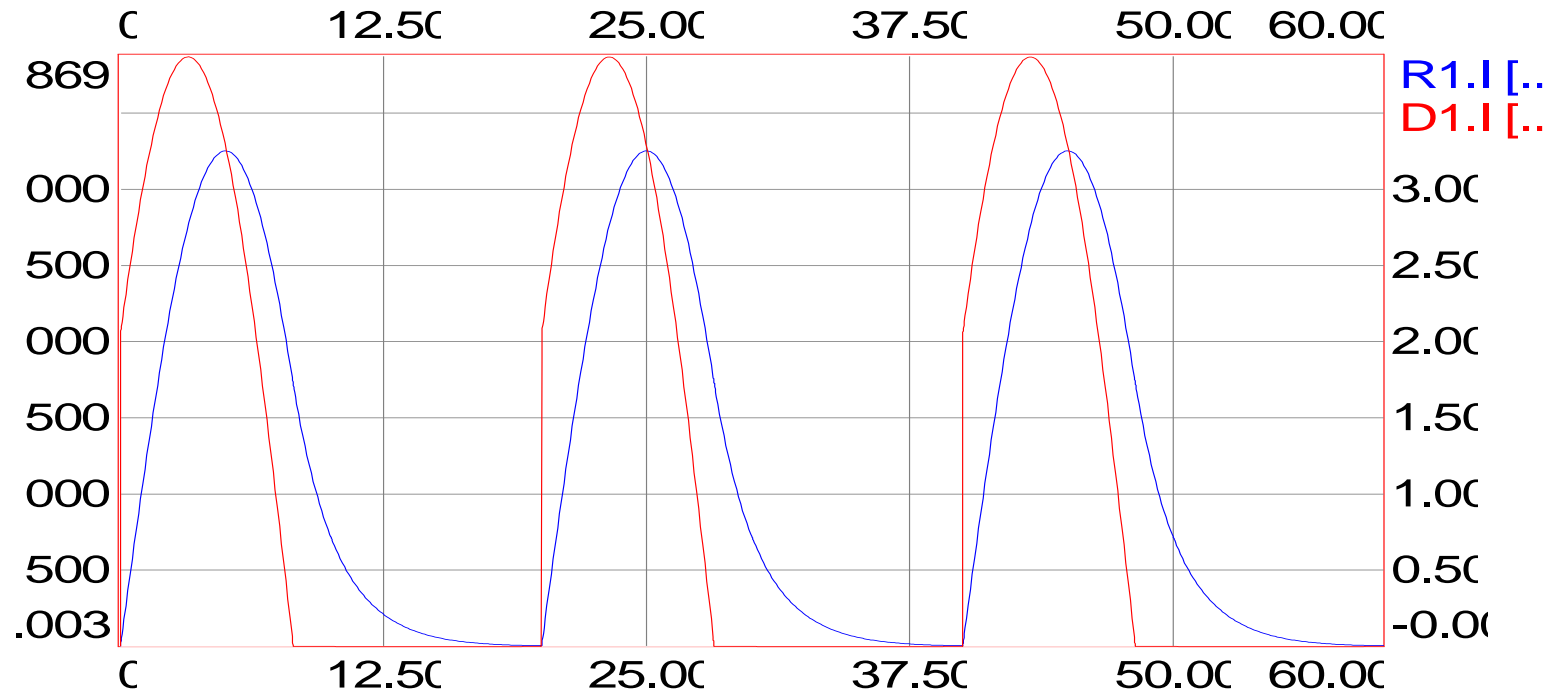
C1 verlängert die Leitdauer von R1,
verkürzt jedoch die von D1!



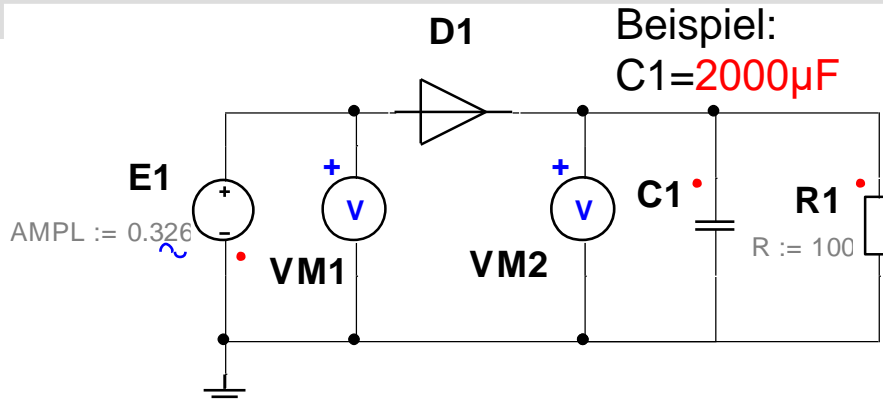
$$U_{D1\max} \sim \hat{E}_1$$

M1U-Schaltung mit ohmsch-kapazitiver Last

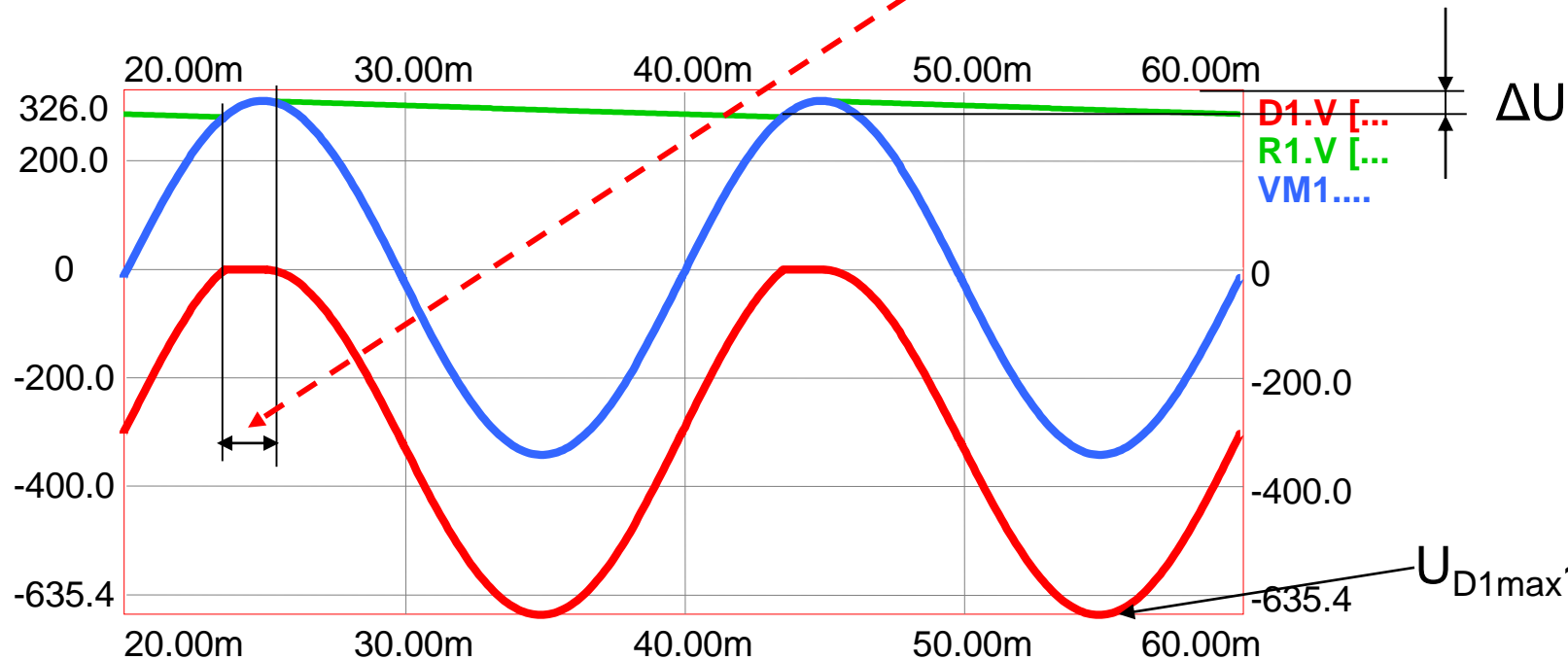
- Durch die verkürzte Leitdauer der Dioden erhöht sich der Stromspitzenwert und damit die effektive Strombelastung der Dioden!!!



M1U-Schaltung mit ohmsch-kapazitiver Last



C1 verlängert die Leitdauer von R1,
verkürzt jedoch die von D1!



Überschlägige Berechnung:

▪ Maximale Spannung:

$$U_{d\max} = \hat{e}_1$$

▪ Minimale Spannung:

$$U_{d\min} = \hat{e}_1 - I_d \cdot (T / C_1)$$

▪ Gleichstrom:

$$I_d = \frac{U_{d\max} + U_{d\min}}{2R_1} = \frac{\hat{e}_1}{R_1 + \frac{T}{2C_1}}$$



$$U_{d\min} = \hat{e}_1 - \frac{\hat{e}_1}{\frac{R_1 C_1}{T} + 0,5} = \hat{e}_1 \left(1 - \frac{T}{R_1 C_1 + 0,5T} \right)$$

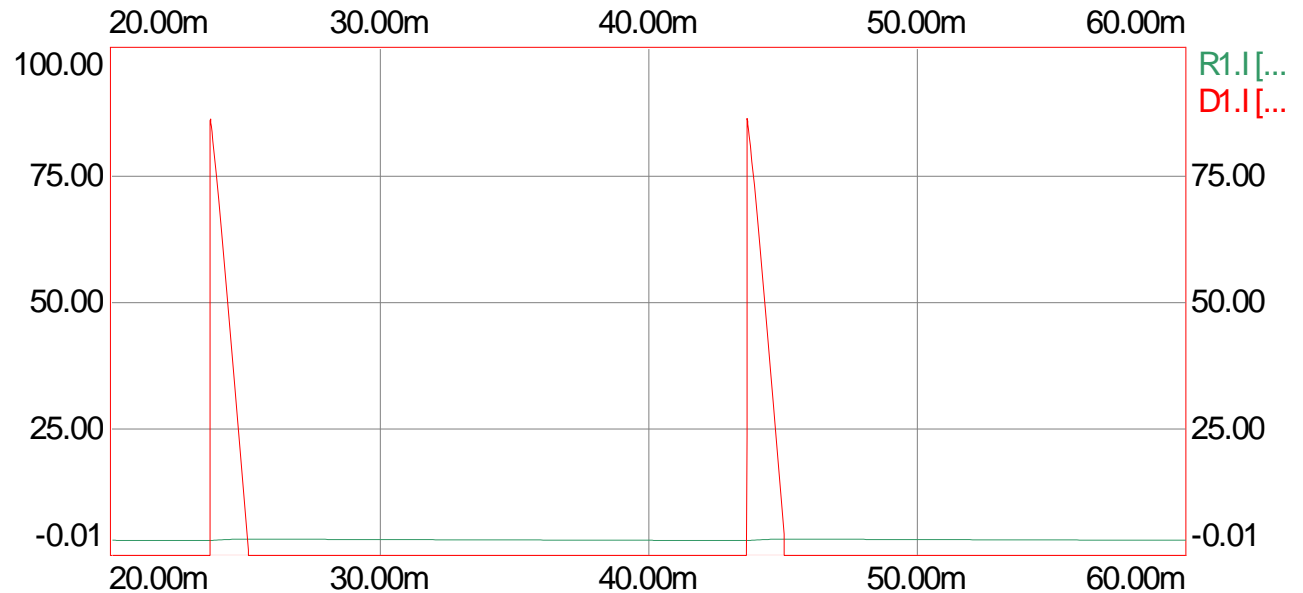
➤ Spitzenstrom:

$$\hat{i}_{D1} = C_1 \cdot \omega \cdot \hat{e}_1 \cdot \cos \left(\arcsin \left(1 - \frac{T}{R_1 C_1 + 0,5T} \right) \right)$$

➤ Welligkeit:

$$\Delta U = U_{d\max} - U_{d\min} = \frac{\hat{e}_1}{\frac{R_1 C_1}{T} + 0,5} = \hat{e}_1 \left(1 - \frac{T}{R_1 C_1 + 0,5T} \right)$$

Ströme in der M1U + RC



Näherung für
obere Schranke

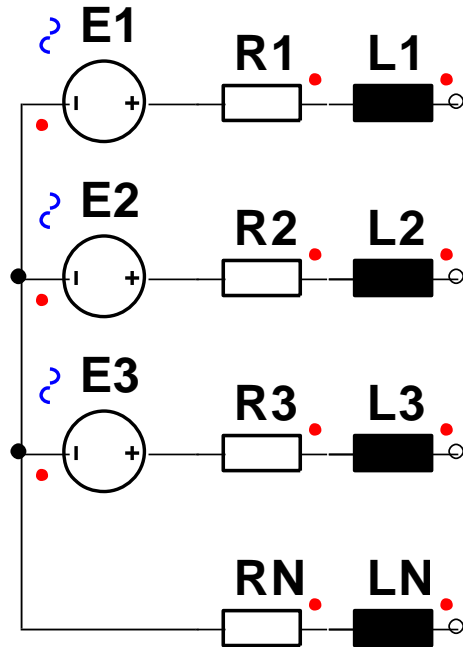
$$\hat{i}_{D1} = C_1 \cdot \frac{du}{dt} = C_1 \cdot \omega \cdot \hat{e}_1 \cdot \cos \left(\arcsin \left(1 - \frac{T}{R_1 C_1 + 0,5T} \right) \right)$$

→ liefert: $\hat{I}_{D1} = 87A$ bei $I_d = 3,1A$ ist $I_{RMS} = 14,09A$!!!

→ erhöhter effektiver Strom

→ **erhöhte Scheinleistungsaufnahme!**

In realen Anwendungen ist die Impedanz des 3~400V-Netzes von Null verschieden:



$$R_1=R_2=R_3=0,24\Omega$$

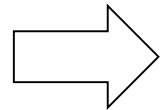
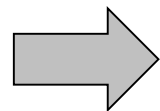
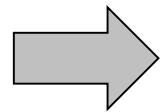
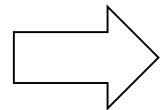
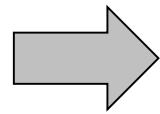
$$R_N=0,16\Omega$$

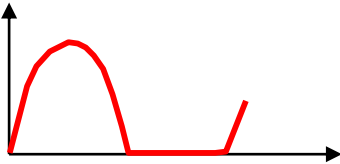
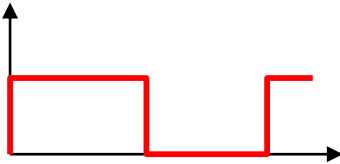
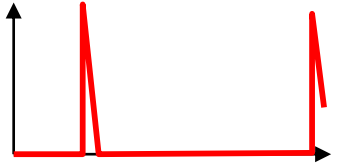
$$\omega L_1=\omega L_2=\omega L_3=0,15\Omega$$

$$\omega L_N=0,10\Omega \quad \text{bei } 50\text{Hz}$$

Typische Leistungsfaktoren P/S sind für die M1 + RC-Last daher $<0,5$

Vergleich der verschiedenen Belastungsfälle der M1U



	R- Last	RL-Last + Freilauf	RC-Last
Netz- stromverlauf			
Stromform- faktor $I_{\text{RMS}}/I_{\text{AV}}$	$\frac{\pi}{2}$	$\sqrt{2}$	$\gg \frac{\pi}{2}$
Leistungs- faktor P/S	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{2}{\pi}$	$< 0,5$
Max. Ventil- spannung	\hat{e}	\hat{e}	$2\hat{e}$
Spitzenstrom/ Gleichstrom	π	1	$\gg \pi$

M1U - Zusammenfassung:

Aufbau und Funktionsweise (Spannungsverläufe, Stromverläufe) für

- Ohmsche Last
- Ohmsch-induktive Last (ohne und mit Freilaufdiode)
- Ohmsch-kapazitive Last

Was haben wir heute gemacht ?

- **Einführung in die Lehrveranstaltung**
 - Ablauf und Themen der Lehrveranstaltung
 - Aufgaben der Leistungselektronik und Applikationsbeispiele
- **Ungesteuerte Gleichrichter**
 - Diode
 - M1U mit verschiedenen Lasten

Was kommt in der nächsten Vorlesung ?

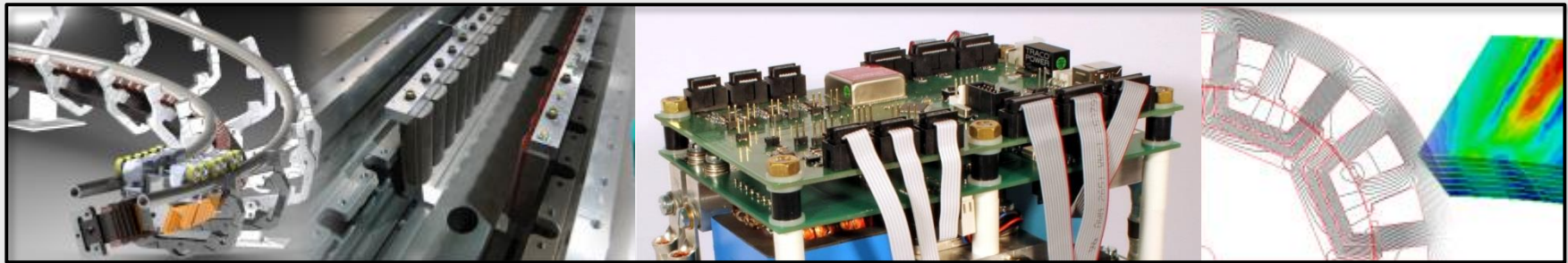
- **Ungesteuerte Gleichrichter**
 - M2U und M3U
 - B2U und B6U



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

T.: + 49 (0)531 3913901

M.Sc. Robert Keilmann

M: r.keilmann@tu-braunschweig.de

T.: + 49 (0)531 3917910

www.imab.de



NIEDERSÄCHSISCHES
FORSCHUNGSZENTRUM
FAHRZEUGTECHNIK