



Technische
Universität
Braunschweig

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



Grundlagen der elektrischen Energietechnik

Teil 3: Grundlagen der Leistungselektronik

Vorlesung (7)

Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz

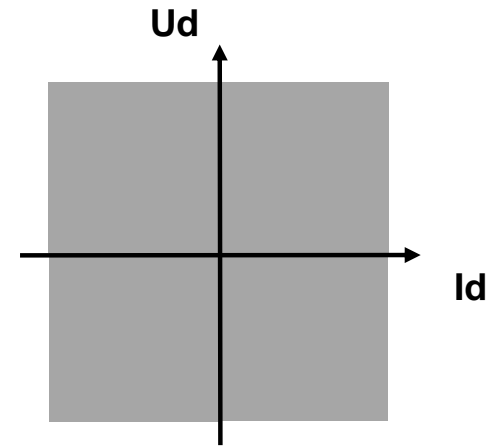
Institut für Elektrischen Maschinen, Antriebe und Bahnen - IMAB

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)

Vierquadrantensteller (4Q-Steller)

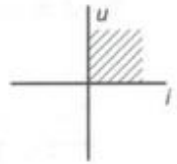
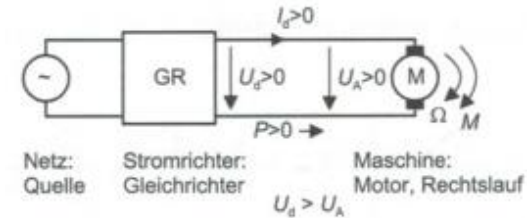
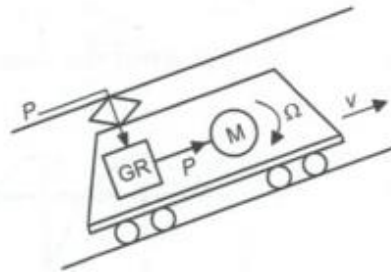
- Besteht die Forderung, sowohl die Spannung als auch den Strom in der Richtung umzukehren, kommen Vierquadrantensteller zum Einsatz.



4Q-Steller: Beispiel

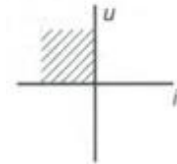
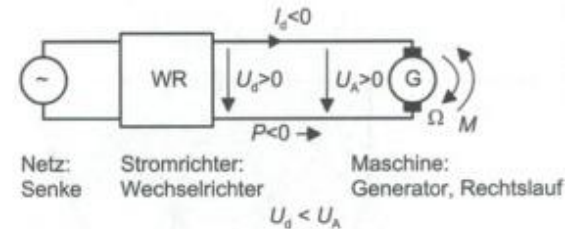
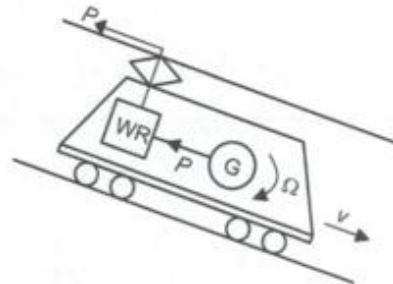
a)

Vorwärtsfahrt
antreiben



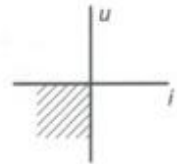
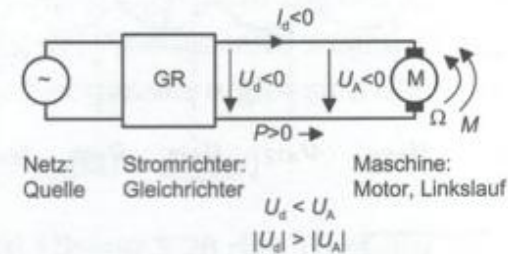
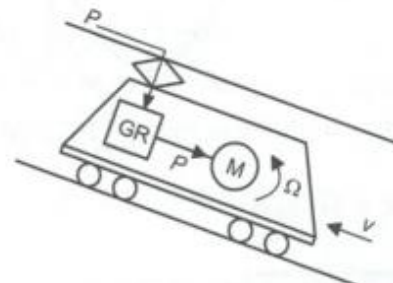
b)

Vorwärtsfahrt
bremsen



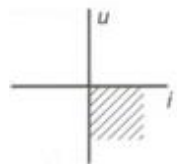
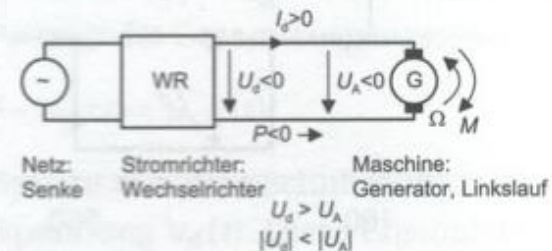
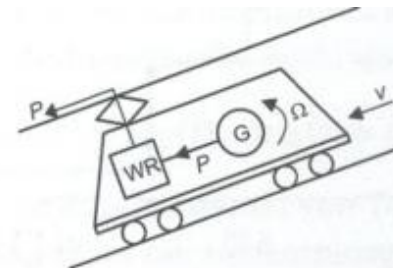
c)

Rückwärtsfahrt
antreiben



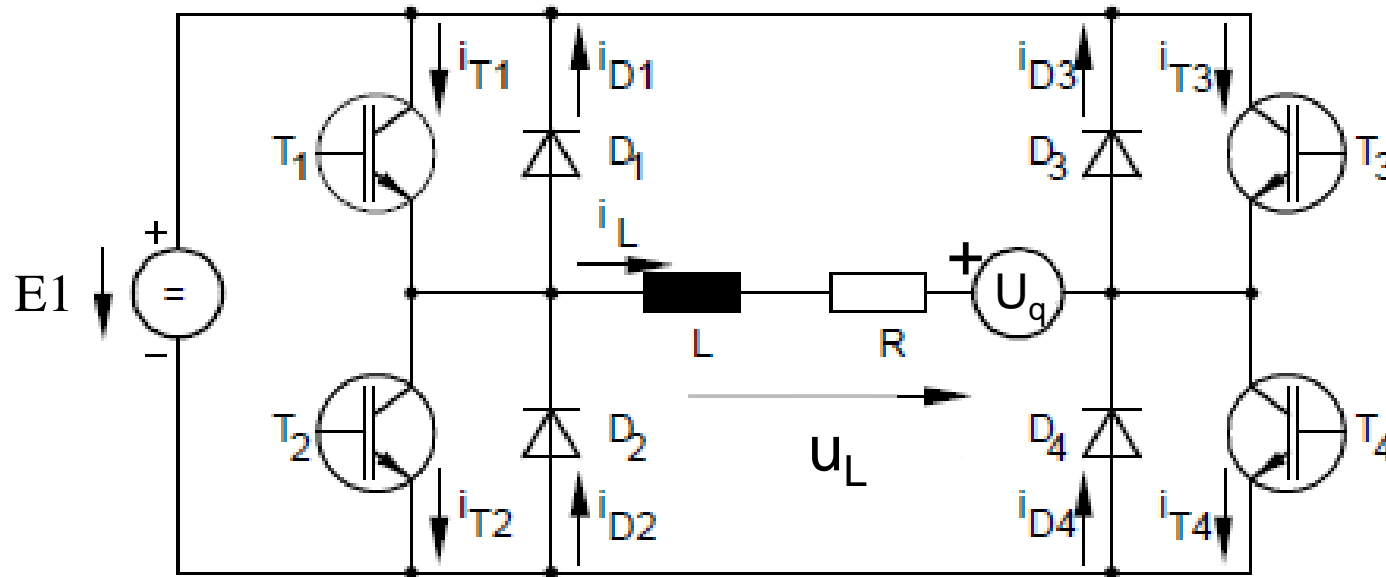
d)

Rückwärtsfahrt
bremsen



Quelle: Probst

Vierquadrantensteller (4Q-Steller): Aufbau

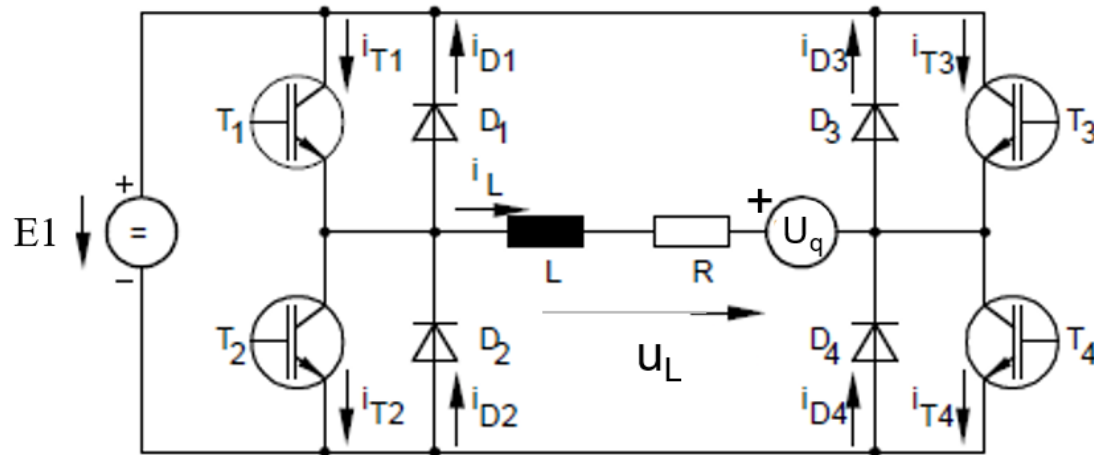


T_1, T_2, T_3, T_4 : Schalter (hier: IGBT)

D_1, D_2, D_3, D_4 : Freilauf-Dioden

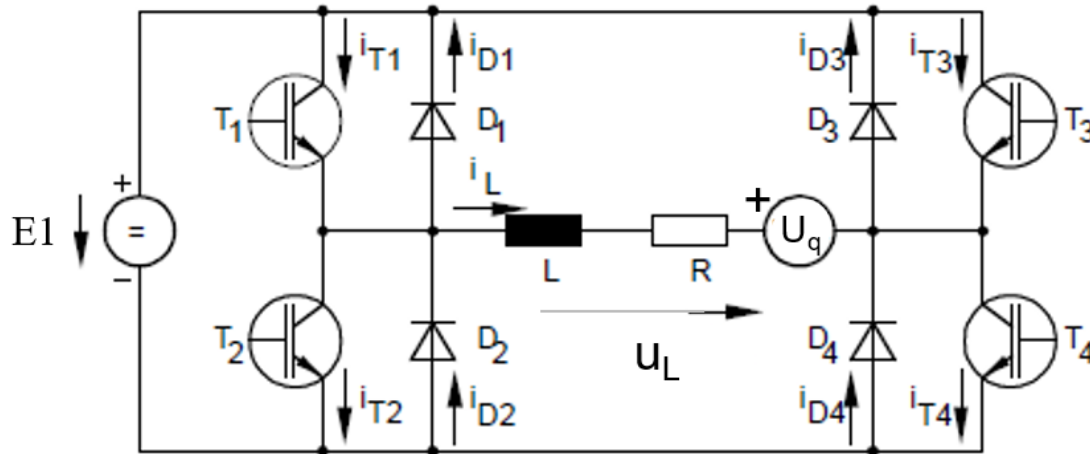
L, R : Last

Vierquadrantensteller (4Q-Steller): Aufbau



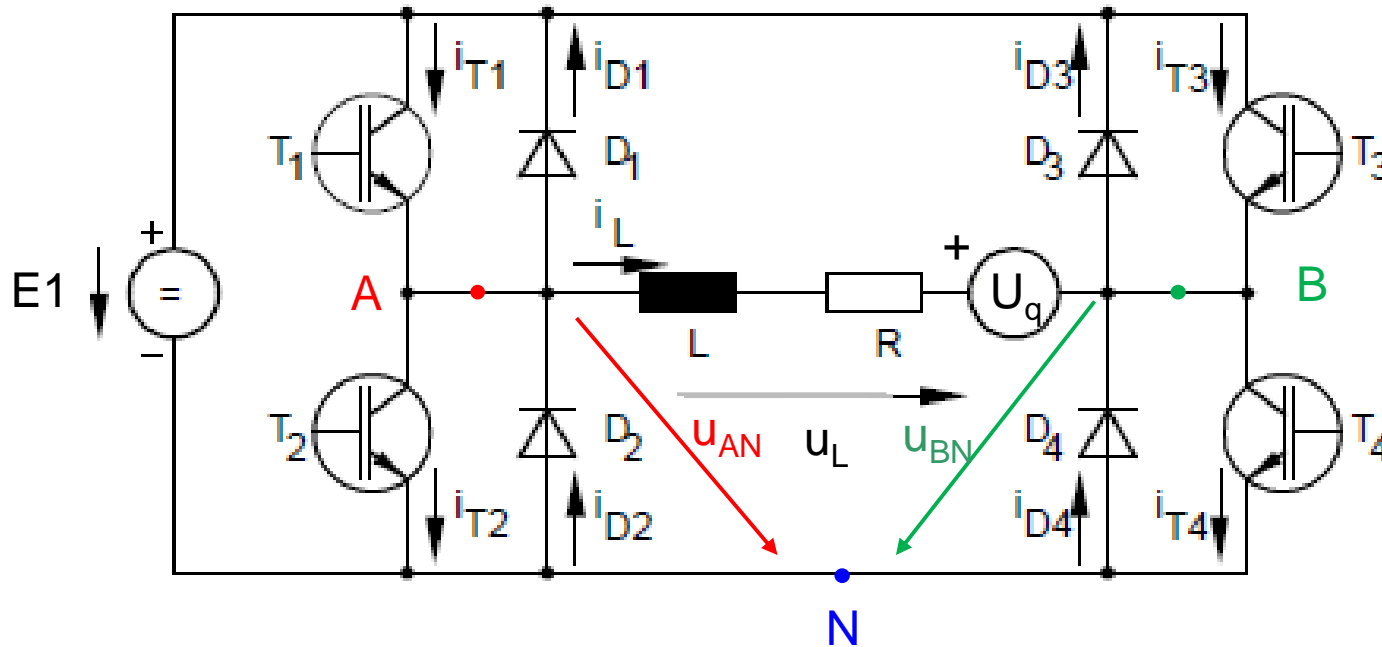
- Die Schaltung des Vierquadrantenstellers kann auch aufgefasst werden als die Antiparallelschaltung **zweier Zweiquadrantensteller**, die jeweils aus den in den Diagonalen angeordneten Leistungshalbleitern bestehen.
- Die Schaltung besteht aus **2 Halbbrücken** mit jeweils 2 Schaltern und 2 antiparallen Dioden.
- Der Vierquadrantensteller wird auch als **Vollbrücke** bezeichnet.

Vierquadrantensteller (4Q-Steller): Funktionsweise



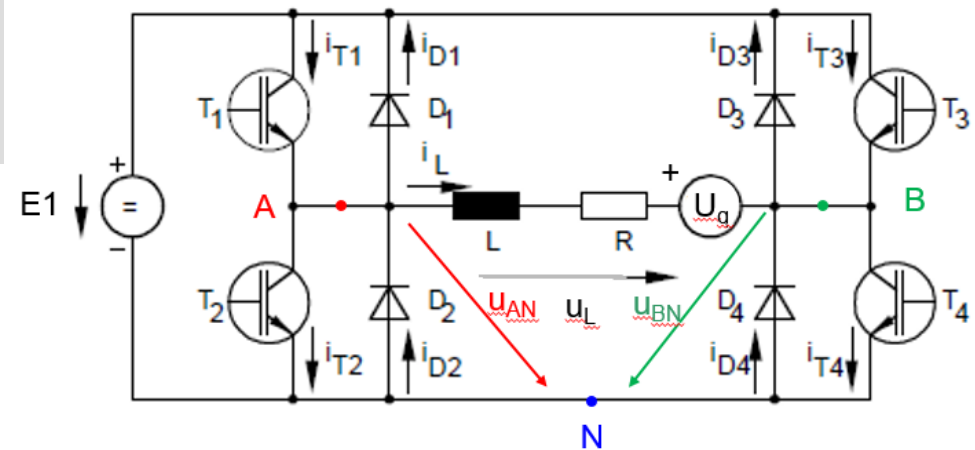
- Es kann ein kontinuierlicher Ausgangsstrom $i_L(t)$ eingestellt werden.
Je nach Zustand der Schalter ist der Ausgangsstrom positiv oder negativ.
- Die Ausgangsspannung $u_L(t)$ ist durch den Zustand der Schalter bestimmt:
 - Eine **positive Spannung** u_L entsteht durch periodisches, gleichzeitiges Schalten von **T1, T4** (entsprechend der Funktion eines Zweiquadrantenstellers).
 - Eine **negative Spannung** u_L entsteht durch periodisches, gleichzeitiges Schalten von **T2, T3**.
 - Die Ausgangsspannung kann auch zu **Null** werden (**Freilauf**).

Vierquadrantensteller (4Q-Steller): Funktionsweise



Ausgangsspannung: $u_L(t) = u_{AN}(t) - u_{BN}(t)$

Vierquadrantensteller: Schaltzustände und Ausgangsspannung



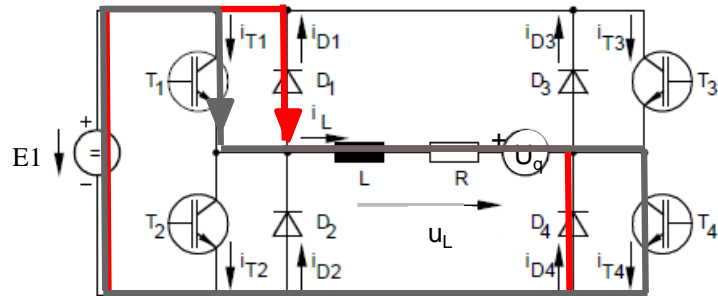
	T1	T2	T3	T4	u_{AN}	u_{BN}	$u_L = u_{AN}(t) - u_{BN}(t)$
(1)	Ein	Aus	Ein	Aus	+ E1	+ E1	0
(2)	Ein	Aus	Aus	Ein	+E1	0	+ E1
(3)	Aus	Ein	Ein	Aus	0	+ E1	- E1
(4)	Aus	Ein	Aus	Ein	0	0	0

- Die Ausgangsspannung u_L kann drei Werte annehmen: + E1 / - E1 / 0
- Die Spannungen u_{AN} und u_{BN} und damit auch u_L sind **nur abhängig** vom Schaltzustand der Schalter und **nicht abhängig** von der Stromrichtung.

Vierquadrantensteller: Mögliche Leitzustände

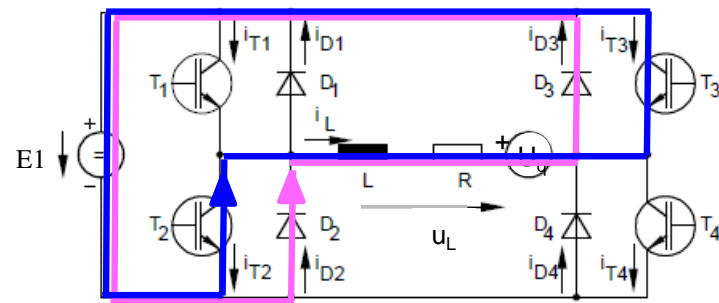
$$i_L > 0 / u_L = + E_1 \quad (1)$$

$$i_L < 0 / u_L = + E_1$$



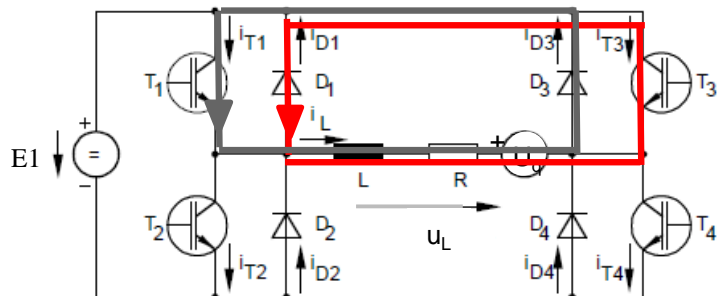
$$i_L > 0 / u_L = - E_1 \quad (3)$$

$$i_L < 0 / u_L = - E_1$$



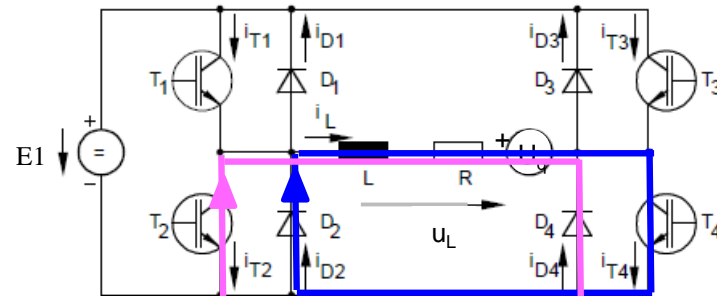
$$i_L > 0 / u_L = 0 \quad (2)$$

$$i_L < 0 / u_L = 0$$



$$i_L > 0 / u_L = 0 \quad (4)$$

$$i_L < 0 / u_L = 0$$



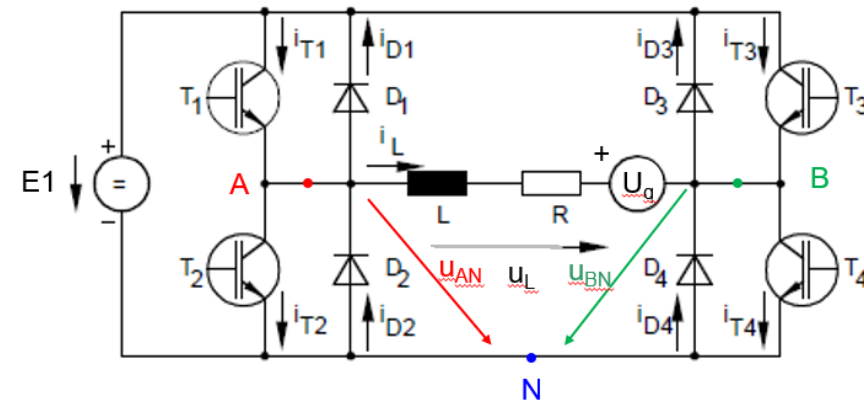
Vierquadrantensteller (4Q-Steller): Steuerung

- Beim Vierquadrantensteller kann die Polarität der Ausgangsspannung umgekehrt werden.
- Die Steuerung erfolgt über **Pulsweitenmodulation (PWM)**.
- Es wird ein Dreieckssignal (u_{ref}) mit **einer** oder auch **zwei** Steuerspannungen (u_{st}) verglichen.

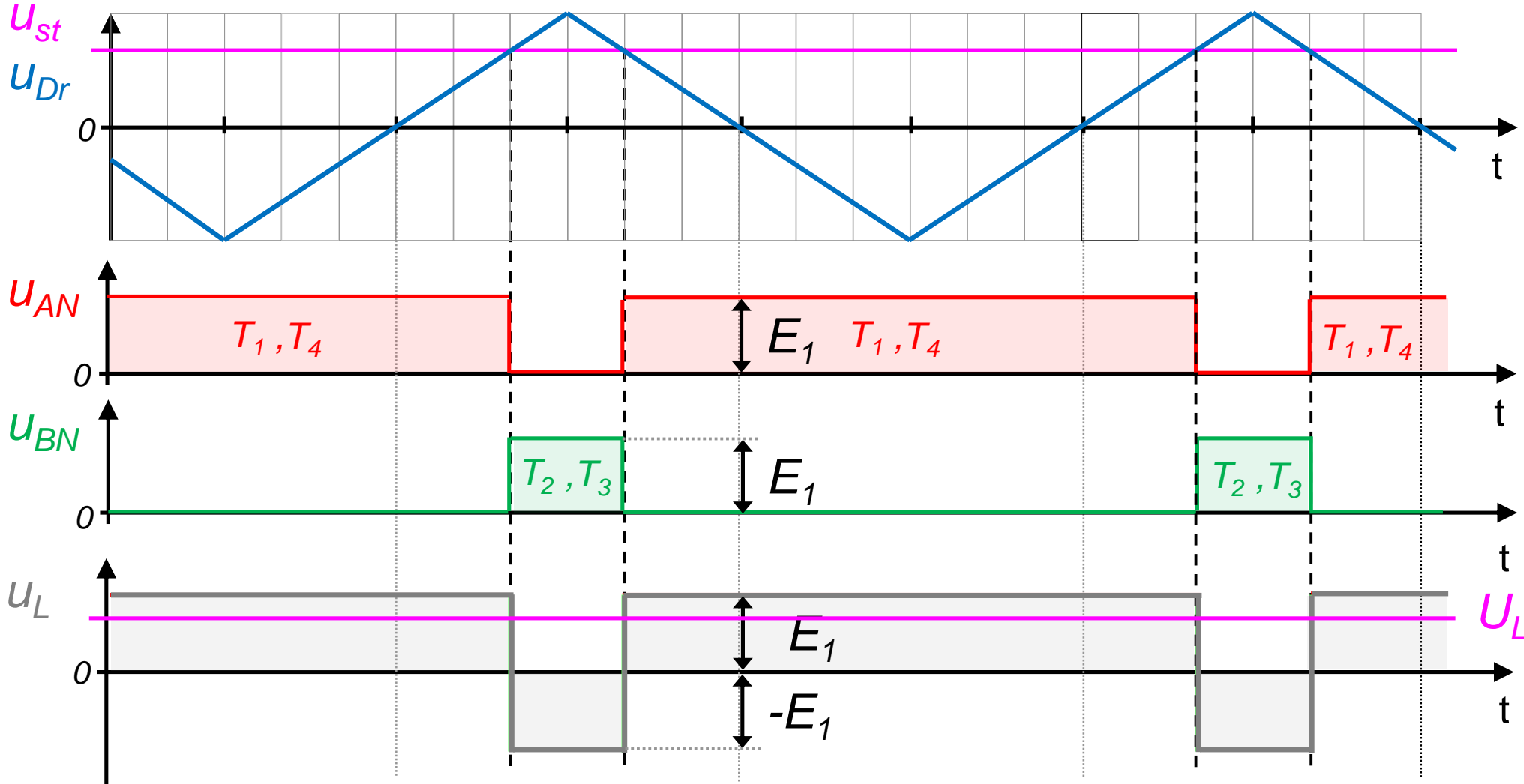
Vierquadrantensteller (4Q-Steller): Steuerung mit Pulsweitenmodulation

■ Pulsweitenmodulation (PWM) mit einer Steuerspannung

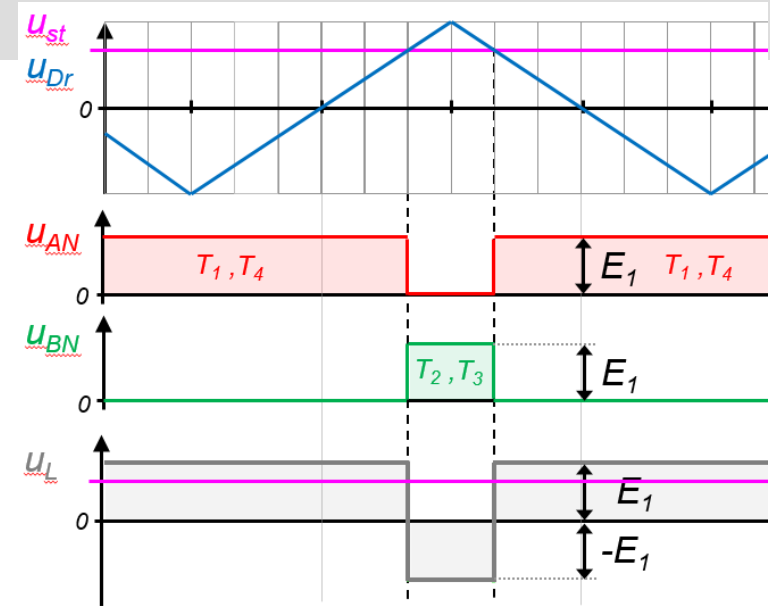
- Die Schalter in den Schalterpaaren T1, T4 und T2, T3 werden gleichzeitig ein- und ausgeschaltet.
 - Es ist immer jeweils ein Paar eingeschaltet.
 - Das Schaltsignal für die Transistoren wird durch Vergleich einer Dreiecksspannung u_{Dr} mit einer Steuerspannung u_{st} erzeugt.
 - Es gilt:
 - für $u_{st} > u_{Dr}$: sind T1, T4 eingeschaltet (und T2,T3 ausgeschaltet)
 - für $u_{st} \leq u_{Dr}$: sind T2, T3 eingeschaltet (und T1,T4 ausgeschaltet).
- **Der Momentanwert der Ausgangsspannung kann zwei Spannungsniveaus einnehmen: + $E1$ und – $E1$.**



Pulsweitenmodulation mit einer Steuerspannung



Pulsweitenmodulation mit einer Steuerspannung



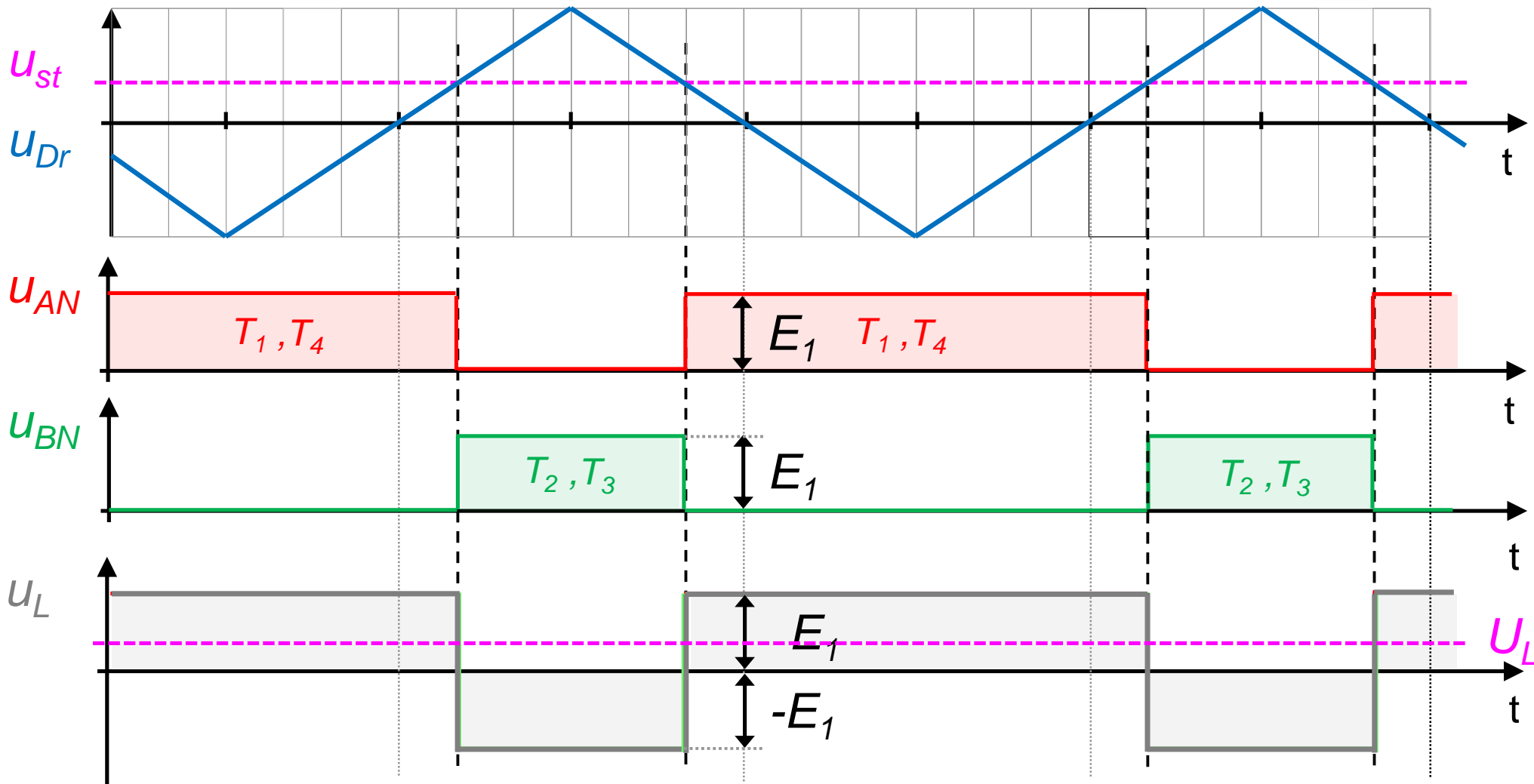
- Mittelwert der Ausgangsspannung:

$$U_L = U_{AN} - U_{BN} = E_1 \cdot v_{T_{T1}} - E_1 \cdot v_{T_{T3}} \quad \text{mit} \quad v_{T_{T1}} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{u_{st}}{\hat{U}_{Dr}} \right)$$

$$\text{und} \quad v_{T_{T3}} = 1 - v_{T_{T1}}$$

$$\Rightarrow U_L = E_1 \cdot \frac{u_{st}}{\hat{U}_{Dr}}$$

Pulsweitenmodulation mit einer Steuerspannung



Vierquadrantensteller (4Q-Steller): Steuerung mit Pulsweitenmodulation

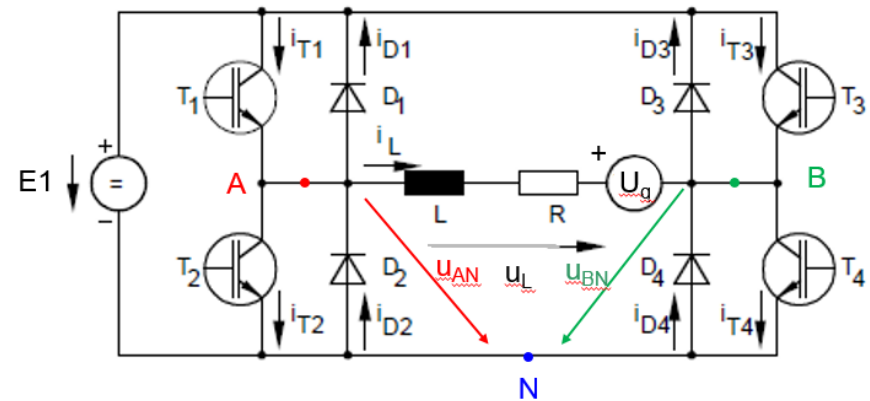
■ Pulsweitenmodulation (PWM) mit zwei Steuerspannungen

- Prinzipiell kann die Ausgangsspannung mit diesem Steuerverfahren 3 Spannungsniveaus einnehmen: $+E1 / -E1 / 0$.
- Die Schalter können auch unabhängig voneinander ein- und ausgeschaltet werden.
- Die Schaltsignale für die Transistoren werden durch Vergleich einer Dreiecksspannung u_{Dr} mit zwei Steuerspannungen erzeugt.

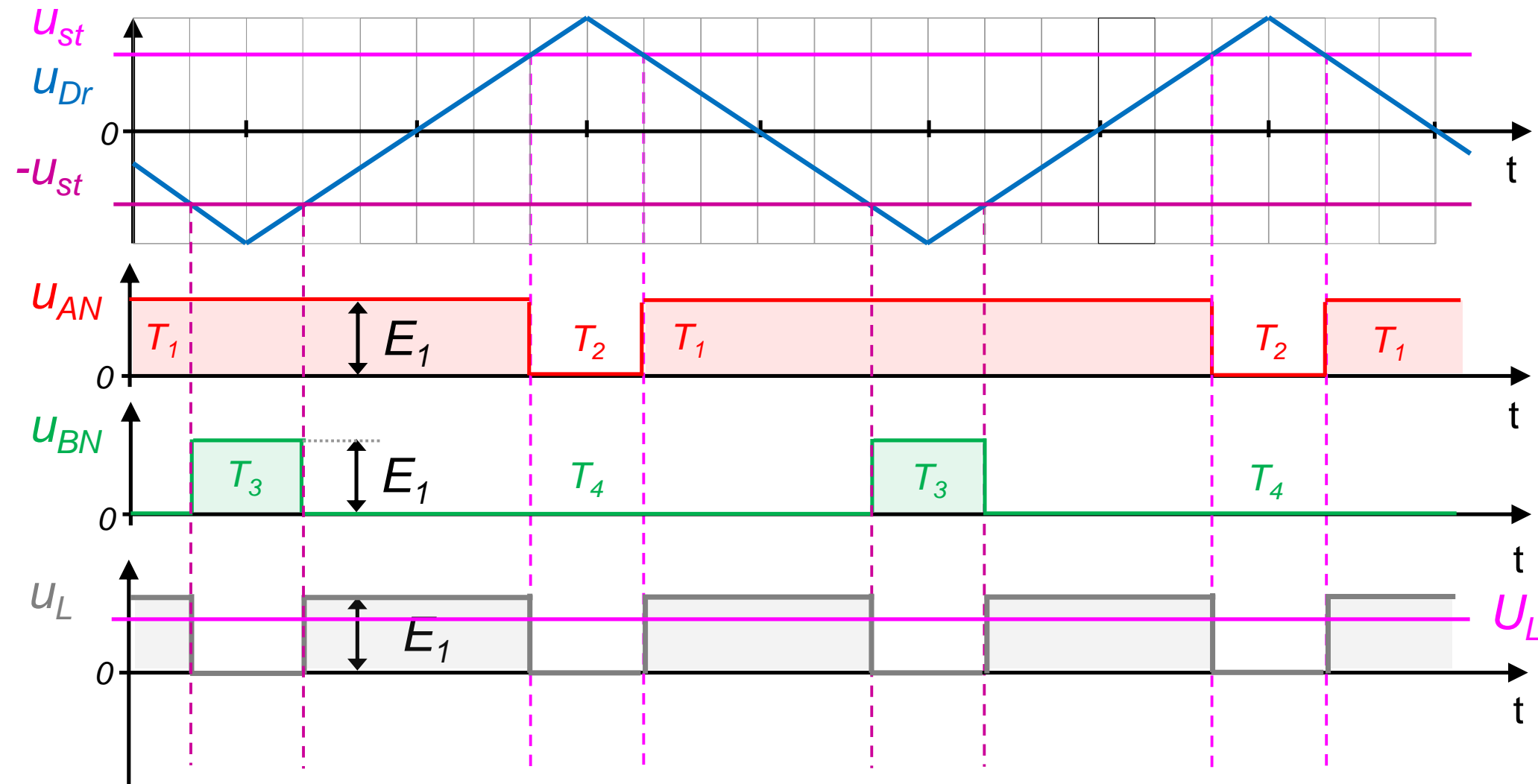
Eine Steuerspannung ist positiv ($+u_{st}$) und die andere negativ ($-u_{st}$).

Für positive Ausgangsspannung gilt:

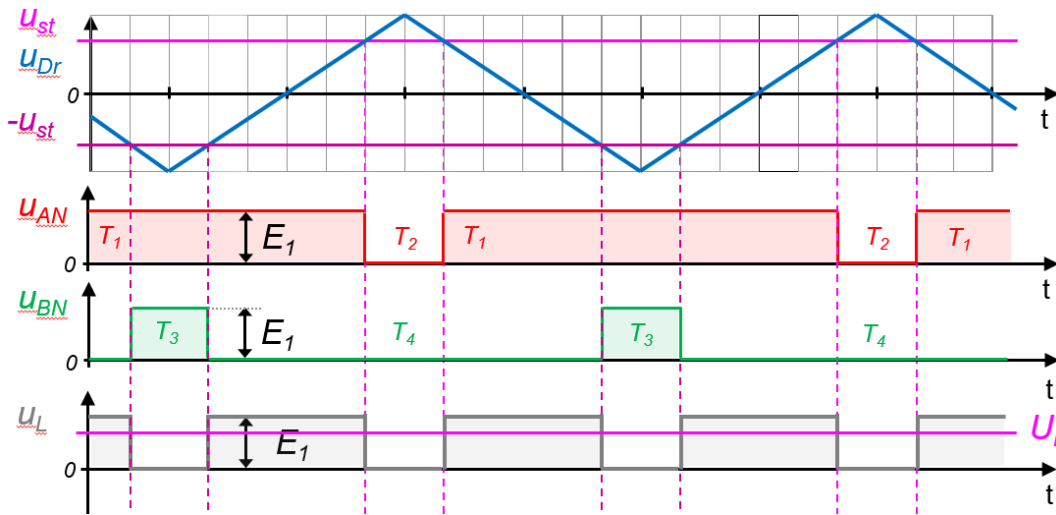
- für $+u_{st} \geq u_{Dr}$: ist T1 eingeschaltet
- für $+u_{st} < u_{Dr}$: ist T2 eingeschaltet
- für $-u_{st} \geq u_{Dr}$: ist T3 eingeschaltet
- für $-u_{st} < u_{Dr}$: ist T4 eingeschaltet.



Pulsweitenmodulation (PWM) mit zwei Steuerspannungen



Pulsweitenmodulation (PWM) mit zwei Steuerspannungen

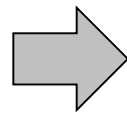


- Mit der Steuerung - wie im Bild gezeigt – wird die Ausgangsspannung positiv.

Durch Verstellen der Steuerspannungen sind auch negative Ausgangsspannungen möglich.

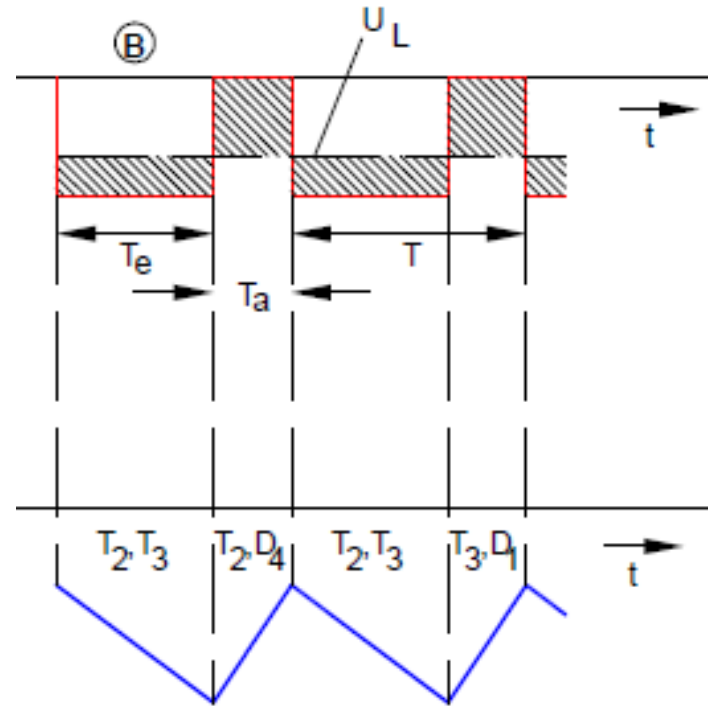
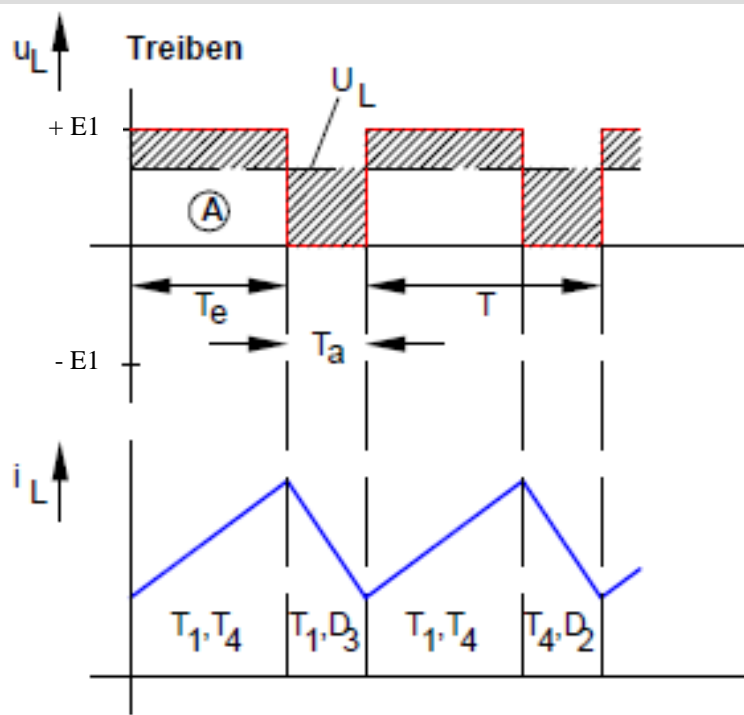
- Mittelwert der Ausgangsspannung:

$$U_L = U_{AN} - U_{BN} = E_1 \cdot v_{T_{T1}} - E_1 \cdot v_{T_{T3}}$$



$$U_L = E_1 \cdot \frac{u_{st}}{\hat{U}_{Dr}}$$

4Q-Steller: Betriebszustände



Antreiben, vorwärts (UL pos., IL pos.):

- T_1, T_4 sind leitend, $u_L = +E_1$.

Freilauf (UL pos., IL pos.):

- T_1, D_3 oder T_4, D_2 sind leitend, $u_L = 0$.

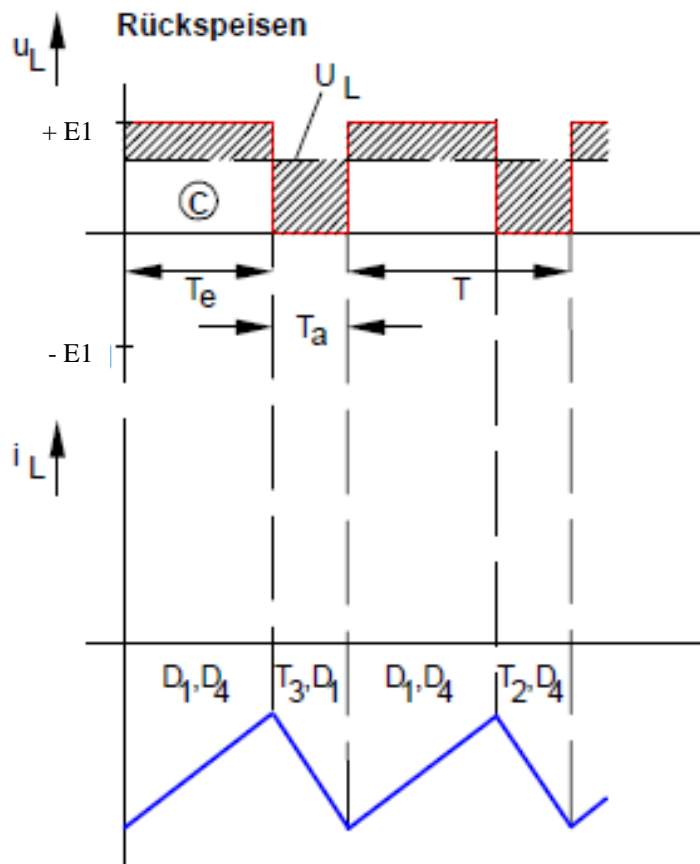
Antreiben, rückwärts (UL neg., IL neg.):

- T_2, T_3 sind leitend, $u_L = -E_1$.

Freilauf (UL neg., IL neg.):

- T_2, D_4 oder T_3, D_1 sind leitend, $u_L = 0$.

4Q-Steller: Betriebszustände

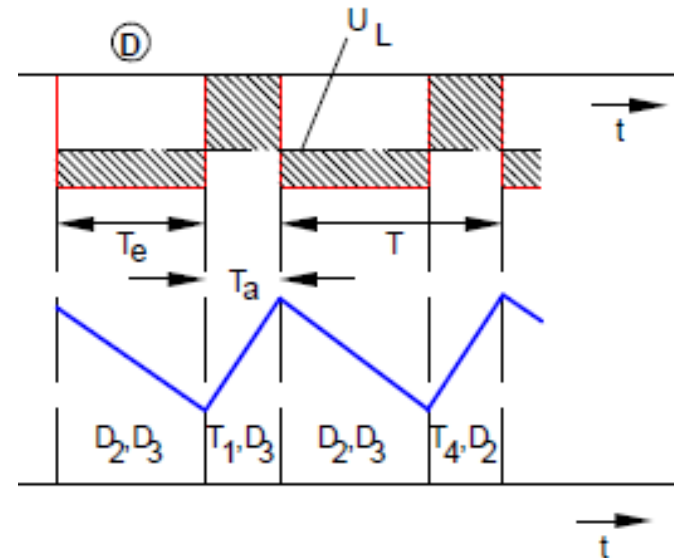


Rückspeisen (U_L pos., I_L neg.):

- D1, D4 sind leitend, $u_L = +E1$.

Freilauf (U_L pos, I_L neg.):

- T3, D1 oder T2, D4 sind leitend, $u_L = 0$



Rückspeisen, rückwärts (U_L neg., I_L pos.):

- D2, D3 leitend, $u_L = -E1$,

Freilauf (U_L neg, I_L pos.):

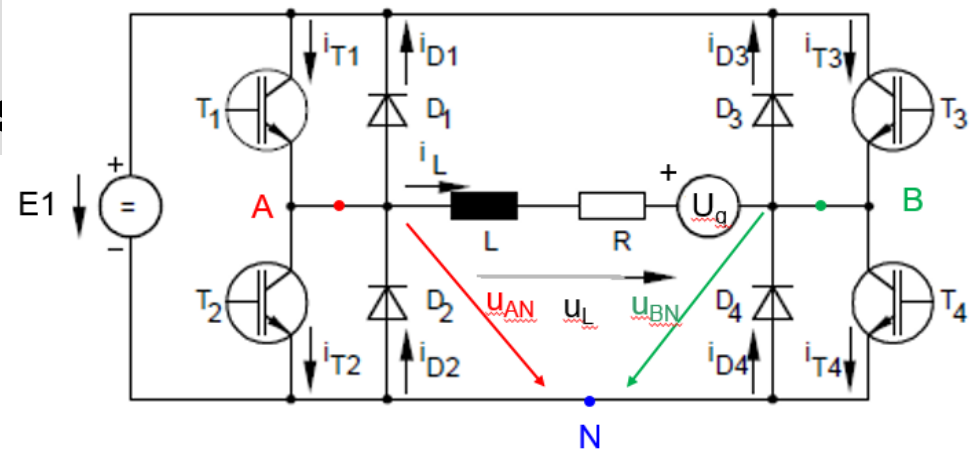
- T1, D3 oder T4, D2 leitend, $u_L = 0$.

4Q-Steller: Steuerverfahren

- Zur Verstellung der Spannung können die bereits beschriebenen Verfahren:
 - ***Pulsbreitensteuerung***
 - ***Pulsfolgesteuerung***
 - ***Zweipunktregelung***

eingesetzt werden.

4Q-Steller: Steuerung in der Praxis



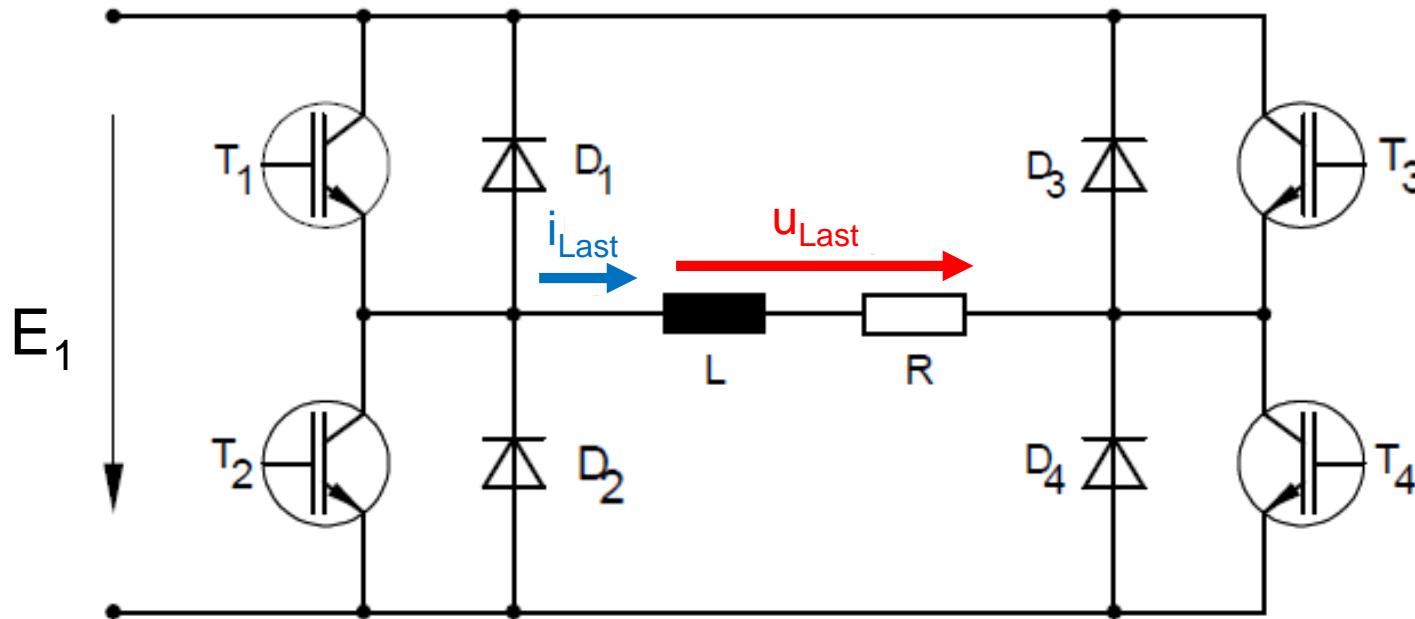
- Pro Halbbrücke ist immer ein Schalter geöffnet und der andere Schalter geschlossen.
 - **Gleichzeitiges Schließen** muss vermieden werden, da dies zum **Kurzschluß** der Eingangsspannungsquelle.
 - Die entstehenden **(Kurzschluß-) Ströme** durch die Halbleiter sind sehr hoch.
 - Dadurch entstehen hohe Verluste in den Halbleitern, die bis zur Zerstörung führen können.
- **In der Praxis wird daher beim Umschalten immer eine gewisse Zeit abgewartet, in der beide Schalter gleichzeitig ausgeschaltet sind.**

Diese Zeit wird **Verriegelungszeit oder Totzeit** genannt.

4Q-Steller: Anwendungen

- Speisung von Gleichstrommaschinen mit unterschiedlicher Drehrichtung
- Die Schaltung stellt auch das Grundkonzept eines **(*einphasigen*) selbstgeführten Wechselrichters** in Brückenschaltung dar.
- Durch entsprechende Steuerung kann ein Verbraucher mit Wechselspannung und Wechselstrom beliebiger Frequenz und Phasenlage gespeist werden.

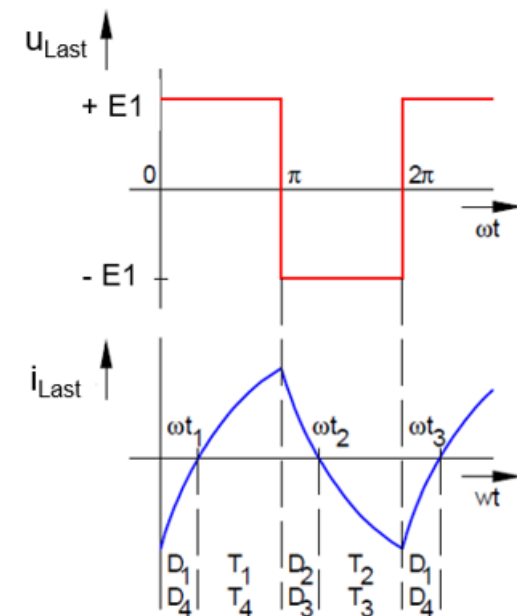
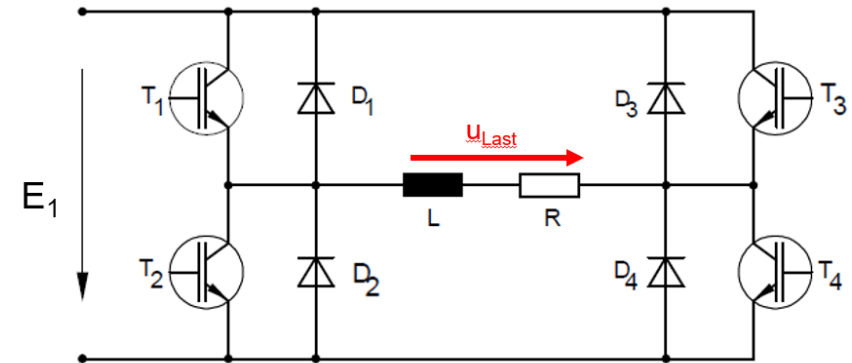
Einphasiger (selbstgeführter) Wechselrichter mit eingepprägter Spannung



- Die aus R , L bestehende Last bildet einen Wechselstromverbraucher.
- Für die Steuerung der Transistoren gibt es verschiedene Verfahren.
- Im folgenden wird ein für das Verständnis grundlegendes Verfahren, die sogenannte **Grundfrequenzsteuerung** oder **Blocksteuerung** betrachtet:

Einphasiger Wechselrichter mit eingepprägter Spannung: Grundfrequenzsteuerung oder Blocksteuerung

- Die Transistoren werden paarweise (T_1, T_4), (T_2, T_3) synchron und im Wechsel ein- und ausgeschaltet – wie bei PWM2.
- Ein rechteckige Ausgangsspannung u_L mit der Amplitude E_1 entsteht.
- Die Einschaltzeit t_{14} des Schalterpaares (T_1, T_4) ist gleich der Einschaltzeit t_{23} des Schalterpaares (T_2, T_3).
- Durch Änderung der Leitdauer kann die Frequenz von u_L gestellt werden.
- Zur Vermeidung eines Kurzschlusses ist zwischen t_{14} und t_{23} eine kurze Sicherheitszeit t_s einzufügen.
- Die Ausgangsspannung $u_{Last}(t)$ stellt eine Folge von rechteckförmigen Pulsen der Amplitude E_1 und der Periode $T_1 = 2\pi / \omega$ (bzw. der Frequenz $f_1 = 1/T_1$) dar und enthält eine sinusförmige Grundschwingung mit der Frequenz $f_1 = 1/T_1$ sowie Oberschwingungen mit höher Frequenz, die ein ganzzahliges Vielfaches von f_1 bilden.
- Die Freilaufdioden D_1 bis D_4 sind erforderlich, um bei angenommener induktiven Last einen Strom mit einem zur momentanen Spannung unterschiedlichen Vorzeichen zu ermöglichen.



Fourierreihe

- Ein periodisches Funktion $f(t)$ mit der Periodendauer T kann durch eine Fourier-Reihe dargestellt werden.

- Es gilt:
$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} (a_n \cdot \cos n\omega_1 t + b_n \cdot \sin n\omega_1 \cdot t).$$

Dabei ist $\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 = \frac{2 \cdot \pi}{T}$ mit $f_1 \dots$ Grundfrequenz.

Die Koeffizienten werden bestimmt durch:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t) \cdot dt \quad a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t) \cdot \cos n\omega_1 t \cdot dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t) \cdot \sin n\omega_1 t \cdot dt$$

Die Integration erfolgt über eine ganze Periodendauer T . (Dabei ist es unerheblich, ob die Integration von 0 bis T oder $-T/2$ bis $+T/2$ erfolgt.)

- Die gezeigte Rechteckfunktion lässt sich darstellen als:

$$f(t) = A \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \left(\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \cdot \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \cdot \sin(5\omega t) + \dots \right)$$

Was haben wir heute gemacht ?

- **Selbstgeführte Stromrichter**
 - Vierquadrantensteller (4Q-Steller)

Was kommt in der nächsten Vorlesung?

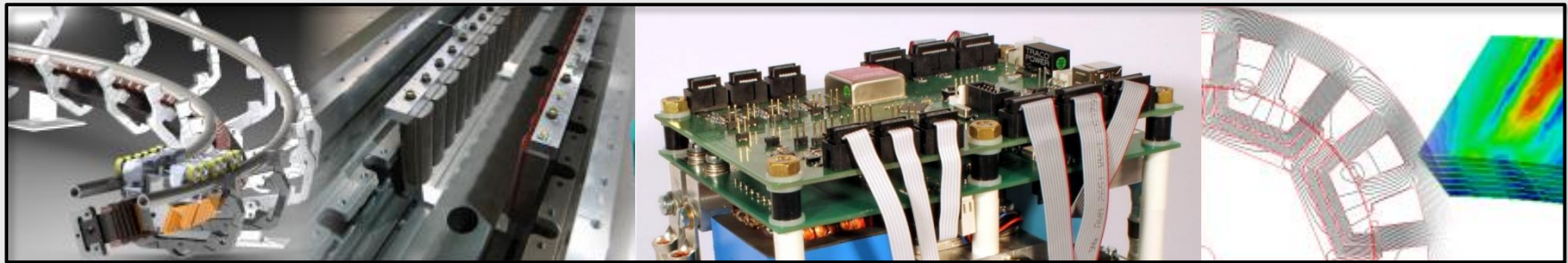
- **Selbstgeführte Stromrichter**
 - Umrichter



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