



# GRUNDSCHALTUNGEN DER LEISTUNGSELEKTRONIK

## ÜBUNG

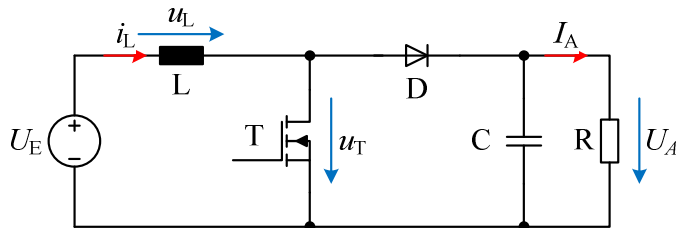
### Inhalte:

- Überblick Hochsetzsteller
- Auslegung einer Speicherdrossel

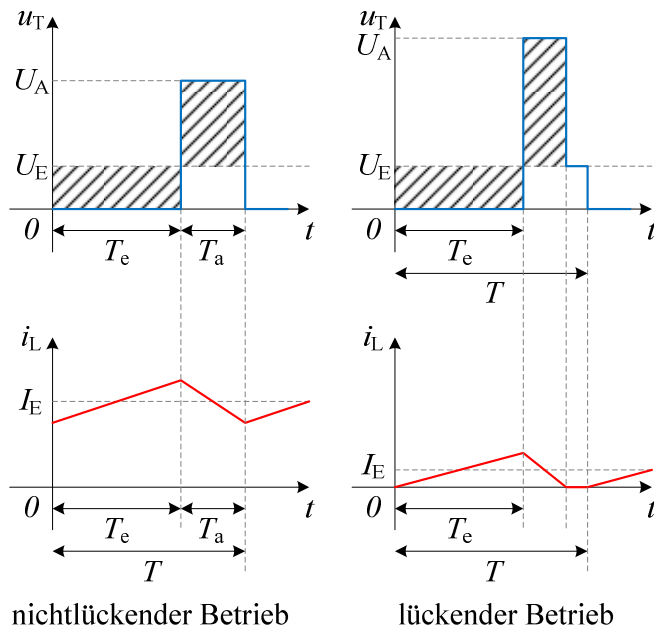
Diese Arbeitsblätter werden in der Übung ausgefüllt/ergänzt

# 1 Hochsetz-Gleichstromsteller

Besteht die Aufgabe, einen Gleichstromverbraucher mit einer hohen Gleichspannung zu versorgen und steht nur eine Gleichspannungsquelle mit geringer Amplitude zur Verfügung, so kommen Hochsetz-Gleichstromsteller (boost converter) entsprechend Abbildung 1.1 zum Einsatz.



$U_E$ : Eingangsspannung  
 $U_A$ : Ausgangsspannung  
 T: Transistor  
 D: Diode  
 L: Induktivität  
 C: Kondensator  
 R: Lastwiderstand



$T_e$ : Einschaltdauer  
 $T_a$ : Ausschaltdauer  
 $T$ : Periodendauer

nichtlückender Betrieb

lückender Betrieb

Abbildung 1.1: Hochsetzsteller

## Funktion

Es gilt:

$T_e$ : T ist leitend, die Speicherinduktivität L wird aufgeladen, D sperrt,

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_E}{L}.$$

Die Last R wird aus der in C gespeicherten Energie versorgt.

$T_a$ : T ist nichtleitend, die Speicherinduktivität L entlädt sich über D auf den Glättungskondensator C und den Lastwiderstand R,

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_E - U_A}{L}.$$

Die Spannungszeitflächen der an L liegenden Spannung müssen für beide Schaltzustände gleich sein. Daraus folgt:

$$\begin{aligned}
 U_E \cdot T_e &= (U_A - U_E) \cdot T_a \\
 U_E \cdot (T_e + T_a) &= U_A \cdot T_a \\
 U_A &= U_E \cdot \frac{T}{T_a} = \alpha \cdot U_E \\
 \alpha &= \frac{T}{T_a}
 \end{aligned}$$

Da die Schaltung als verlustfrei angenommen wurde, ergibt sich der Mittelwert des Eingangsstromes zu

$$I_E = \frac{U_A}{U_E} \cdot I_A = \alpha \cdot I_A$$

Beim Hochsetzsteller kann sogenannter "lückender" Betrieb dadurch entstehen, dass die in L gespeicherte Energie nicht ausreicht, den Stromfluss während der Zeit  $T_a$  aufrecht zu halten. Dieser Zustand tritt insbesondere bei geringem Laststrom  $I_A$  auf. Als Folge des Lückbetriebes steigt die Spannung  $U_A$  an. Es gilt dann:

$$U_A \geq U_E \frac{T}{T_a} = f(\alpha, U_E, I_L)$$

Im Lückbetrieb nimmt die an T auftretende Verlustleistung durch folgende Effekte ab:

- Geringes  $di/dt$  nach dem Einschalten
- Der Ausräumstrom von D ist Null, da D bereits nichtleitend ist.

### Steuerverfahren

- Pulsbreitensteuerung
- Pulsfolgesteuerung
- Zweipunktregelung

### Anwendungen

- Erzeugung von positiven Hilfsspannungen
- Power Factor Correction (PFC) bzw. Leistungsfaktorkorrektur
- "Maximum Power Point (MPP)"-Tracker in PV-Anlagen

• E-Fahrzeug: Erzeugung konstanter Hochvolt-Gleichspannung (z.B. für Motor-Wechselrichter aus schwankender Batteriespannung)

## 2 Auslegung einer Speicherdrossel

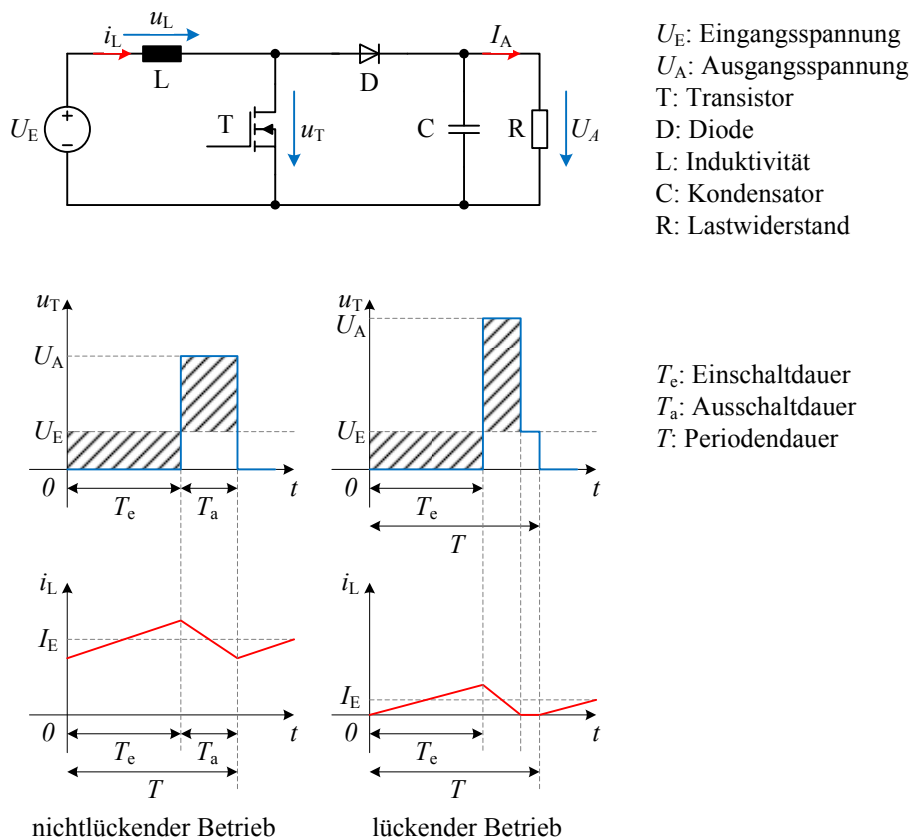


Abbildung 2.1: Hochsetzsteller

Die Glättungsdrossel eines Hochsetzstellers soll ausgelegt werden.

Gegeben sind (nichtlückender Betrieb):

Nennstrom (Ausgang):	$I_A = 5 \text{ A}$
Eingangsspannung:	$U_E = 30 \text{ V}$
Ausgangsspannung:	$U_A = 60 \text{ V}$
Schaltfrequenz:	$f_s = 100 \text{ kHz}$
Stromripple:	$\Delta i_L = \pm 0,5 \text{ A} = 1 \text{ A}$

- Berechnen Sie die Ein- und Ausschaltzeiten  $T_e$  und  $T_a$ .
- Berechnen Sie den Induktivitätswert und die zu speichernde Energie der Drossel.
- Welchen E42-Kern (Datenblatt im Anhang, max. Flussdichte  $B_{\max} \leq 0,3 \text{ T}$ ) würden sie dafür wählen? Welche Windungszahl hat die Drossel?
- Welcher Drahtdurchmesser ist dafür geeignet?

zu a) Berechnung der Schaltdauern über Spannungsverhältnis  $U_E / U_A$ :

$$U_E \cdot T_e = (U_A - U_E) \cdot T_a, \text{ mit } T = \frac{1}{f_s} = T_e + T_a = 10 \text{ ms}$$

$$\text{folgt: } \frac{U_A}{U_E} = \frac{T_e + T_a}{T_a}, \text{ bzw. } T_a = \frac{U_E}{U_A} \cdot \frac{1}{f_s} = 5 \mu\text{s}$$

$$\text{und } T_e = T - T_a = 5 \mu\text{s}$$

$$T = 10 \mu\text{s}$$

zu b) Berechnung des benötigten Induktivitätswertes über den Stromripple:

$$\text{Während } T_e: \frac{di_L}{dt} = \frac{U_E}{L} \text{ mit } \frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\pm 0.5 \text{ A}}{T_e} = \frac{1 \text{ A}}{5 \text{ ms}}$$

$$\Rightarrow L = 30 \text{ V} \cdot \frac{5 \text{ ms}}{1 \text{ A}} = 150 \mu\text{H}$$

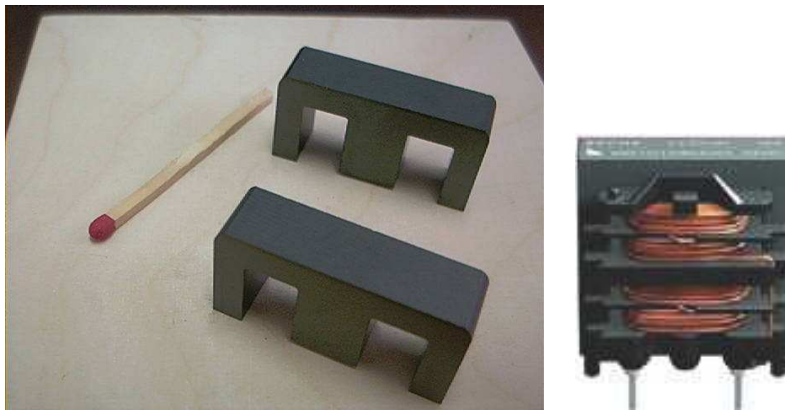
Berechnung der gespeicherten Energie:

$$I_E = \frac{U_A}{U_E} \cdot I_A = 10 \text{ A}$$

$$\text{Max. Drosselstrom: } \hat{i}_L = I_E + \frac{\Delta i_L}{2} = 10.5 \text{ A}$$

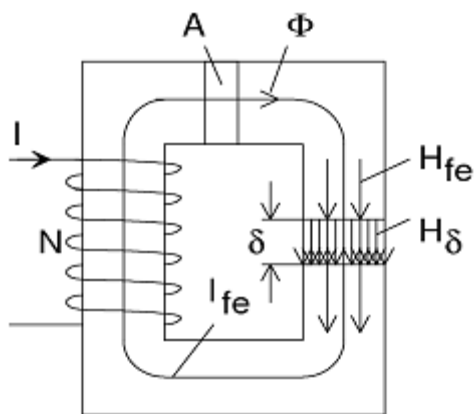
$$\Rightarrow W = \frac{1}{2} L \cdot \hat{i}_L^2 = \frac{1}{2} \cdot 150 \text{ mH} \cdot 10.5 \text{ A}^2 \\ = 8.26 \text{ mWs}$$

zu c) Auswahl E42-Kern:



Am Beispiel eines einfachen Kerns wird die Auslegung durchgeführt:

Die Energie ist in Form von magnetischer Feldenergie gespeichert, und zwar sowohl im Ferrit als auch im Luftspalt des Kerns. Die Baugröße einer Speicherdrossel wächst ungefähr proportional zur zu speichernden Energie.



- I : Drosselstrom
- N: Zahl der Windungen
- A: Kernquerschnitt
- $l_{Fe}$ : effektive magnetische Kernlänge
- $\delta$ : Luftspaltlänge
- $\Phi$ : magnetischer Fluss
- B: magnetische Flussdichte
- $H_{Fe}$ : magnetische Feldstärke im Kern
- $H_{\delta}$ : magnetische Feldstärke im Luftspalt

Die Feldenergie in der Speicherdrossel beträgt:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \int \vec{H} \cdot \vec{B} dV \approx \frac{1}{2} \cdot \vec{H}_{Fe} \cdot \vec{B}_{Fe} \cdot V_{Fe} + \frac{1}{2} \cdot \vec{H}_{\delta} \cdot \vec{B}_{\delta} \cdot V_{\delta}$$

Die magnetische Flussdichte  $B$  ist stetig und hat im Luftspalt und im Ferrit näherungsweise die gleiche Größe, d. h.  $B \approx B_{Fe} \approx B_{\delta}$ . Die magnetische Feldstärke  $H$  ist nicht stetig, sie ist im Luftspalt um den Faktor  $\mu_r$  größer als im Ferrit. Führt man dies in obige Gleichung ein, so ergibt sich mit  $\vec{B} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}$ ,  $V_{Fe} = l_{Fe} \cdot A$  und  $V_{\delta} = \delta \cdot A$ :

$$W \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot \left( \frac{l_{Fe}}{\mu_r} + \delta \right) \cdot A$$

$\mu_r$  beträgt im Ferrit ca. 1000...4000. Die effektive magnetische Kernlänge geht nur mit  $l_{Fe} / \mu_r$  in die Energieberechnung ein. Daher kann man bei üblichen Kernabmessungen sagen, dass die Energie maßgeblich im Luftspalt gespeichert ist.

Daher gilt in guter Näherung:

$$W \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot \delta \cdot A$$

⇒ Speicherdrosseln brauchen einen Luftspalt. In diesem ist die Energie gespeichert.

Da die Energie im Luftspalt gespeichert ist, benötigt man ein bestimmtes Luftspaltvolumen, um die geforderte Energie  $\frac{1}{2} \cdot L \cdot \hat{I}^2$  zu speichern. Die maximal zulässige Flussdichte beträgt bei handelsüblichen Ferriten ca.  $B_{\max} \leq 0,3 \text{ T}$ . Das notwendige Luftspaltvolumen beträgt:

Mit diesem Volumen kann ein entsprechender Kern aus einem Datenbuch gewählt werden. Beispielsweise kann der E-Kern E42 gewählt werden, der laut Datenblatt eine effektive Kern-Querschnittsfläche  $A_{Fe} = 236 \text{ mm}^2$  besitzt. Um auf das benötigte Luftspaltvolumen zu kommen, muss also ein Luftspalt von

eingefügt werden.

Für vorgefertigte Spulenkerne geben die Hersteller häufig eine Induktivitätskonstante  $A_L$  ( $A_L$ -Wert, meist in nH pro Quadratwindung) an, die dem Kehrwert des magnetischen Widerstands  $R_m$  entspricht. In diesem Wert sind bereits alle Materialkonstanten und die spezielle Geometrie der Anordnung als Näherung zusammengefasst. Wenn man den Kern mit  $N$  Windungen bewickelt, erhält man eine Spule mit der Induktivität:

Im Datenblatt des E-Kerns E42 ist dieser  $A_L$ -Wert für unterschiedliche Luftspalte angegeben. Wählt man einen Kern mit einem Luftspaltwert  $\geq$  dem zuvor berechneten Wert, resultiert für diesen Kern die erforderliche Windungszahl  $N$ :

Zur Kontrolle kann nun noch die maximal auftretende magnetische Flussdichte berechnet werden. Diese darf nicht größer als 0,3 Tesla sein:

$$\text{Energie gleichgesetzt: } \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot V_\delta = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{B_{\max}^2}{\mu_0} \cdot V_\delta = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \hat{i}_L^2 \quad \text{mit } B_{\max} = 0.3 \text{ T}, L = 150 \text{ mH}, \hat{i}_L = 10.5 \text{ A}$$

$$\Rightarrow V_\delta = \frac{L \cdot \hat{i}_L^2 \cdot \mu_0}{B_{\max}^2} = 240 \text{ mm}^3$$

$$\delta = \frac{V_\delta}{A_{Fe}} = \frac{240 \text{ mm}^3}{236 \text{ mm}^2} \approx 1 \text{ mm}$$

$$L = A_L \cdot N^2 = \frac{l}{R_m} \cdot N^2$$

$$\text{Für } \delta = 1140 \text{ um} \Rightarrow A_L = 315 \text{ nH}$$

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{150 \text{ mH}}{315 \text{ nH}}} = 22 \text{ wdg}$$

zu d) Berechnung Drahtdurchmesser

Die Stromdichte  $S$  der Wicklung kann zwischen 2 und 5 A/mm<sup>2</sup> gewählt werden (je nach Größe und Isolation, das heißt, wie gut die Wärme abgeführt werden kann). Daraus folgt für den Drahtdurchmesser  $d$ :

$$A = \pi r^2 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$S = \frac{I}{A} \quad \text{mit } I = 10 \text{ A}$$

$$\Rightarrow d = \sqrt{\frac{4I}{\pi \cdot S}} \quad \text{mit } S = 2 \dots 5 \text{ A/mm}^2$$

$$\Rightarrow d = 2.52 \dots 1.59 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{\sim} &= \int_0^\delta H \cdot dl & B &= \mu_0 \cdot \frac{N \cdot \hat{i}_L}{\delta} \leq 0.3 \text{ T} \\ \downarrow & & \downarrow & \\ N \cdot I & & H \cdot \delta &\Rightarrow 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \cdot \frac{22 \times 10.5 \text{ A}}{1 \times 10^{-3} \text{ m}} \leq 0.3 \text{ T} \\ & & \downarrow & \\ & & \text{Luft:} & \\ & & B = \mu_0 H & \quad 0.29 \text{ T} \leq 0.3 \text{ T} \end{aligned}$$

Überprüfung der Speicherdrosselauslegung per Schaltungssimulation z. B. mit LTSpice

Download unter: <http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice>



## Anhang: Datenblatt für unterschiedliche E42-Kerne

Ferroxcube

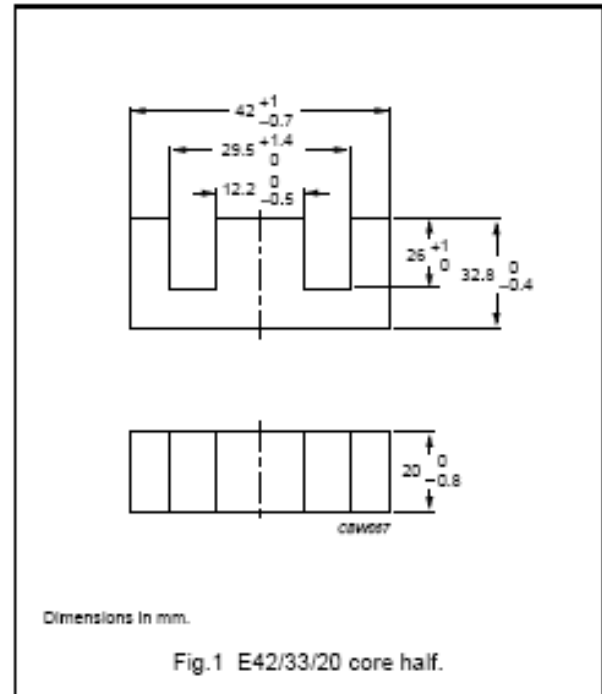
### E cores and accessories

E42/33/20

#### CORE SETS

##### Effective core parameters

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
$\Sigma(l/A)$	core factor (C1)	0.614	mm <sup>-1</sup>
$V_e$	effective volume	34200	mm <sup>3</sup>
$l_e$	effective length	145	mm
$A_e$	effective area	236	mm <sup>2</sup>
$A_{min}$	minimum area	234	mm <sup>2</sup>
m	mass of core half	~ 82	g

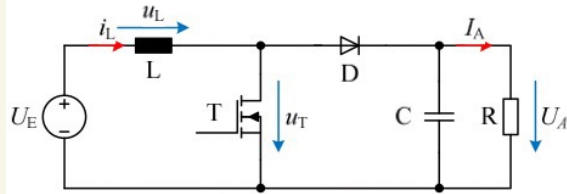


#### Core halves

$A_L$  measured in combination with a non-gapped core half, clamping force for  $A_L$  measurements  $40 \pm 20$  N, unless stated otherwise.

GRADE	$A_L$ (nH)	$\mu_e$	AIR GAP ( $\mu$ m)	TYPE NUMBER
3C90	100 $\pm 5\%$ <sup>(1)</sup>	~ 49	~ 5480	E42/33/20-3C90-E100
	160 $\pm 5\%$ <sup>(1)</sup>	~ 78	~ 2840	E42/33/20-3C90-E160
	250 $\pm 5\%$ <sup>(1)</sup>	~ 122	~ 1540	E42/33/20-3C90-E250
	315 $\pm 5\%$	~ 154	~ 1140	E42/33/20-3C90-A315
	400 $\pm 8\%$	~ 196	~ 840	E42/33/20-3C90-A400
	630 $\pm 15\%$	~ 308	~ 470	E42/33/20-3C90-A630
	4000 $\pm 25\%$	~ 1960	~ 0	E42/33/20-3C90
3C92 <small>des</small>	2900 $\pm 25\%$	~ 1420	~ 0	E42/33/20-3C92
3C94	4000 $\pm 25\%$	~ 1960	~ 0	E42/33/20-3C94
3F3	100 $\pm 5\%$ <sup>(1)</sup>	~ 49	~ 5480	E42/33/20-3F3-E100
	160 $\pm 5\%$ <sup>(1)</sup>	~ 78	~ 2840	E42/33/20-3F3-E160
	250 $\pm 5\%$ <sup>(1)</sup>	~ 122	~ 1540	E42/33/20-3F3-E250
	315 $\pm 5\%$	~ 154	~ 1140	E42/33/20-3F3-A315
	400 $\pm 8\%$	~ 196	~ 840	E42/33/20-3F3-A400
	630 $\pm 15\%$	~ 308	~ 470	E42/33/20-3F3-A630
	3700 $\pm 25\%$	~ 1810	~ 0	E42/33/20-3F3

# 1. Hochsetz-Gleichstromsteller



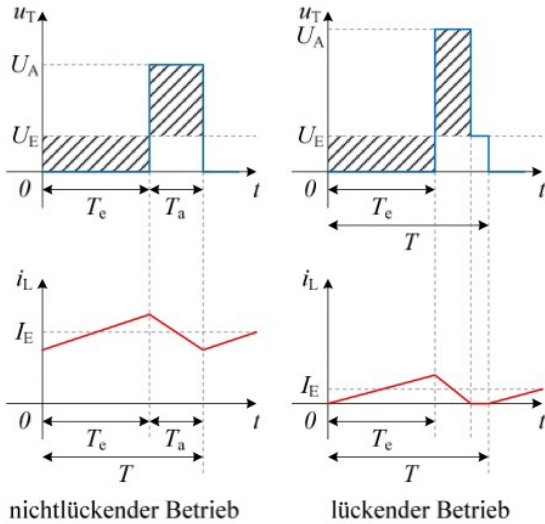
$T_e$ : T ist leitend, die Speicherinduktivität L wird aufgeladen, D sperrt,

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_E}{L}$$

Die Last R wird aus der in C gespeicherten Energie versorgt.

$T_a$ : T ist nichtleitend, die Speicherinduktivität L entlädt sich über D auf den Glättungskondensator C und den Lastwiderstand R,

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_E - U_A}{L}$$



$$\alpha = \frac{T}{T_a}$$

$$I_E = \frac{U_A}{U_E} \cdot I_A = \alpha \cdot I_A$$

## Anwendungen

- Erzeugung von positiven Hilfsspannungen
- Power Factor Correction (PFC) bzw. Leistungsfaktorkorrektur
- "Maximum Power Point (MPP)"-Tracker in PV-Anlagen

• E-Fahrzeug: Erzeugung konstanter Hochvolt-Gleichspannung (z.B. für Motor-Wechselrichter aus schwankender Batteriespannung)

