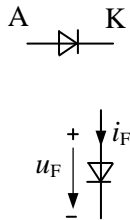


## 2. Leistungshalbleiter

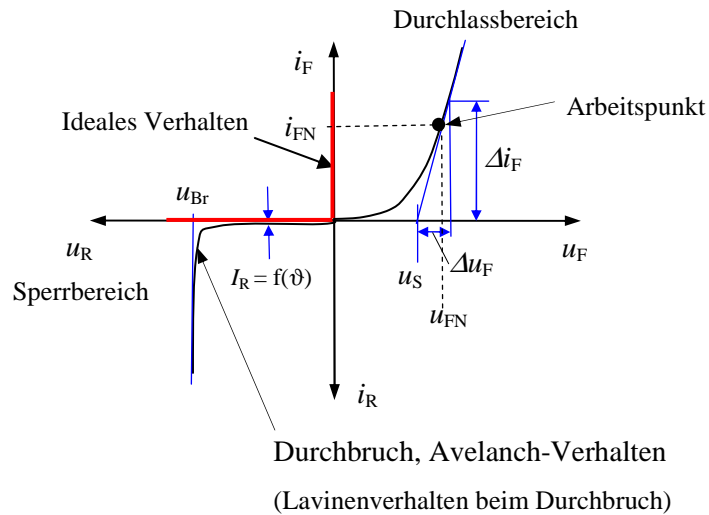
### 2.1. Diode

Diode: pn-Übergang

Schaltzeichen:



Kennlinie:



Leistungsdiode: psn-Übergang

↙ Schwach dotierte Schicht → Hohe Sperrfähigkeit

$i_F$ : Flusstrom bis zu 3000A

$u_R$ : Sperrspannung bis zu 6000V ⇒ Schaltleistung einige Megawatt

#### 2.1.1. Verhalten der Gleichrichterdiode

Beschreibung im Durchlassbereich:

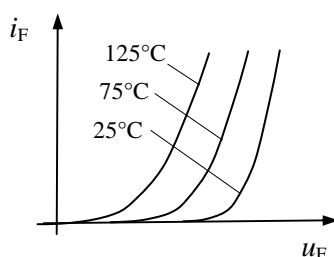
Näherung mit Hilfe einer Geraden

Schleusenspannung:  $u_S, u_{F0}, u_{D0}$  oder  $u_{T0}$

Differentieller Widerstand:  $r_F, r_D$  oder  $r_T$

$$u_F = u_S + r_F \cdot i_F \quad \text{mit} \quad r_F = \frac{\Delta u_F}{\Delta i_F}$$

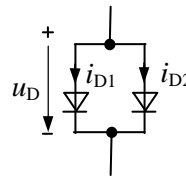
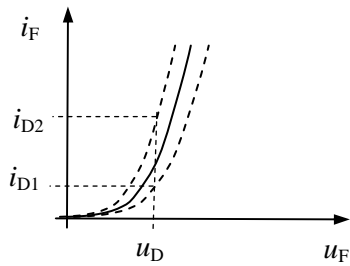
Temperaturabhängig im Durchlassbereich:  $u_F = f(\vartheta)$



Schleusenspannung verringert sich mit steigender Temperatur!

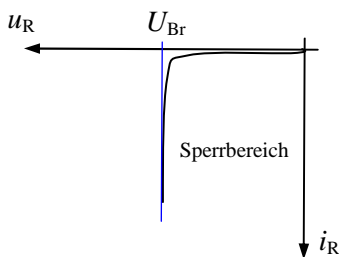
Differentieller Widerstand steigt mit steigender Temperatur!

Parallelschaltung von Dioden:



⇒ Problem: Unsymmetrische Stromaufteilung!

Beschreibung im Sperrbereich:



Datenblatt:

- $U_{Br}$ : Break down voltage  
Durchbruchspannung
- $U_{RRM}$ : Reverse Recovery Max  
(Periodisch zulässige Spitzenspannung)
- $U_{RRM} = 0.9 \cdot U_{Br}$

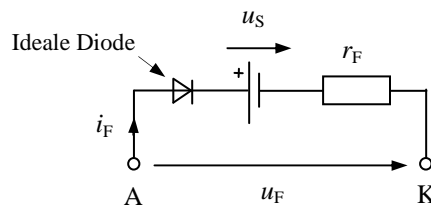
Maximale Beanspruchung ist Abhängig vom Einsatzgebiet!

Für öffentliche Netze gilt:

$$U_{RRM} = S \cdot \hat{U}_R \quad S = 2-3 \quad \text{Sicherheitsfaktor}$$

### 2.1.2. Verlustleistung der Gleichrichterdiode

ESB der Diode:



Leistung allgemein:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

$$P_V = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T u(t) \cdot i(t) dt$$

Diode:  $u(t) = u_S + r_F \cdot i_F$

$$i(t) = i_F$$

$$P_V = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T (u_S + r_F \cdot i_F) \cdot i_F dt$$

$$P_V = u_S \cdot \frac{1}{T} \int_{t=0}^T i_F dt + r_F \cdot \frac{1}{T} \int_{t=0}^T i_F^2 dt$$

$$P_V = u_S \cdot I_{FAV} + r_F \cdot I_{FRMS}^2$$

Verlustleistung  $\Rightarrow$  Wärme  $\Rightarrow$  Kühlung erforderlich!

Formel für die Kühlung:

$$P_V = \frac{T_J - T_u}{\sum R_{th}}$$

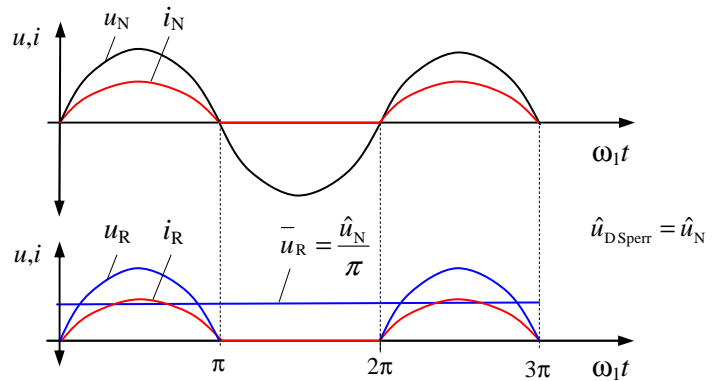
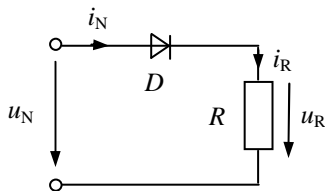
$T_J$ : Sperrschichttemperatur

$T_u$ : Umgebungstemperatur

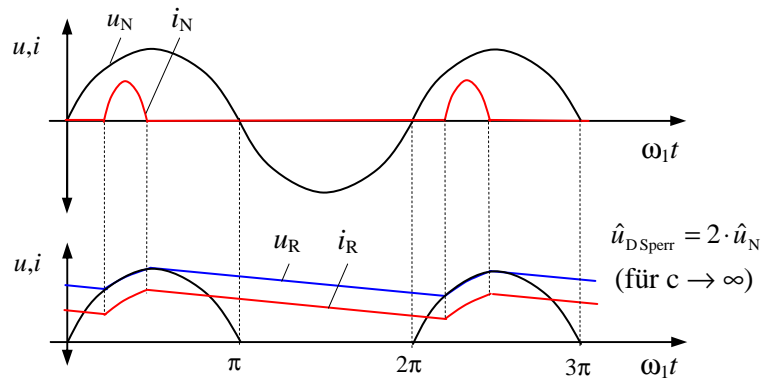
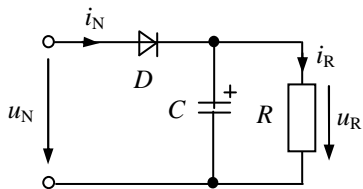
$R_{th}$ : Thermischer Widerstand

### 2.1.3. Ideale Diode an Last

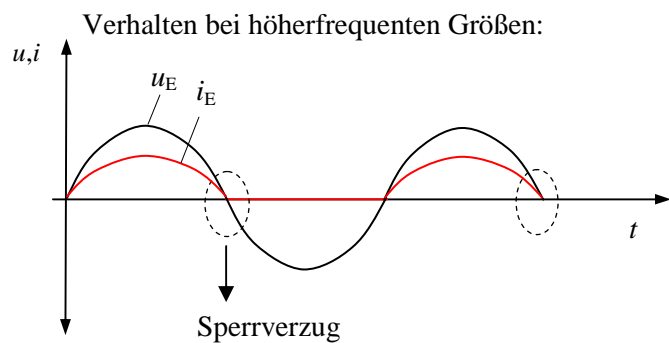
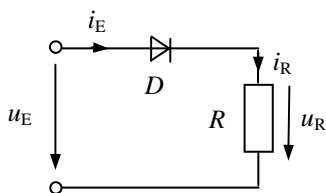
Ohmsche Last



Mit Glättungskondensator:

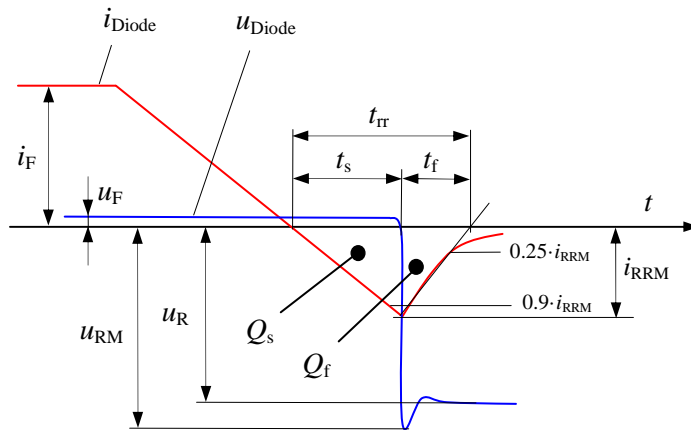


### 2.1.4. Dynamisches Verhalten



$\rightarrow$  Abschaltvorgänge werden verzögert!

Charakterisierung des Sperrverzugs einer Diode:

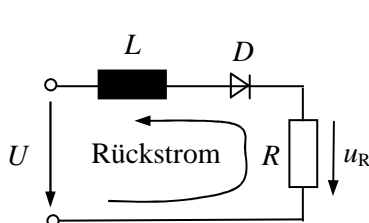


- $u_F$ : Fluss- oder Durchlassspannung
- $i_F$ : Fluss- oder Durchlassstrom
- $u_R$ : Rückwärtsspannung
- $u_{RM}$ : Maximale Rückwärtsspannung
- $i_{RRM}$ : Reverse recovery current maximum (Maximaler Diodenrückstrom)
- $t_{rr}$ : Reverse recovery time (Sperrverzögerung)
- $t_s$ : Nachlaufzeit
- $t_f$ : Abfallzeit
- $Q_{rr}$ : Sperrverzugsladung ( $Q_{rr} = Q_s + Q_f$ )
- $Q_s$ : Nachlaufladung
- $Q_f$ : Fallzeitladung

Typische Sperrverzögerungszeiten von Dioden:

- Normale Diode:  $t_{rr} \approx 1-2\mu s$
- Schnelle Diode:  $t_{rr} \approx 10-50ns$
- Schottky Diode:  $t_{rr} \approx 1-2ns$

Spannungsimpulse durch Stromabriss in einer Diode:



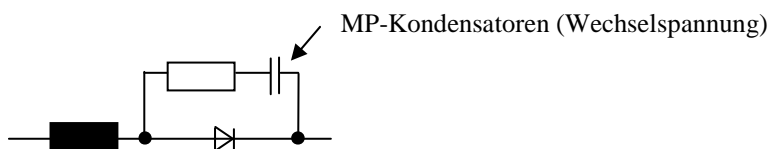
$$u_L = L \frac{di}{dt}$$

z.B.  $L = 0.1\mu H$  und  $\frac{di}{dt} = 1000 \frac{A}{\mu s}$

$$u_L = 100V$$

Abhilfe: TSE- Schutzbeschaltung

TSE: Träger-Stäu-Effekt

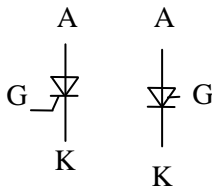


Schaltung ermöglicht einen Strom in Rückwärtsrichtung außerhalb der Diode!

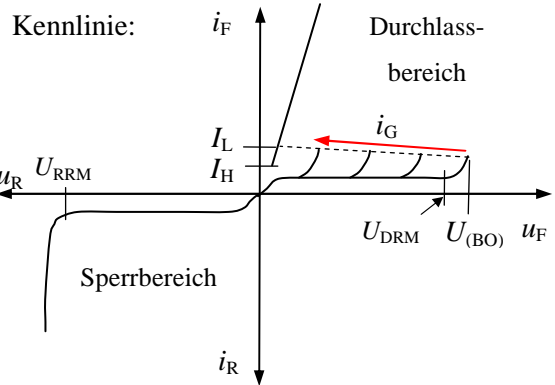
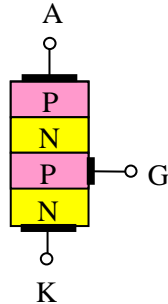
## 2.2. Thyristoren und Triacs

### 2.2.1. Thyristor

Schaltzeichen:



Aufbau:



$I_H$ : Haltestrom  
 $I_L$ : Einraststrom  
 $U_{(BO)}$ : Kippspannung

$U_{RRM}$ : Rückwärtsspitzenperspg.

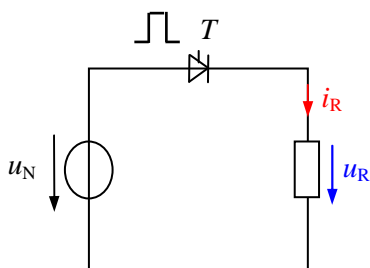
$U_{DRM}$ : Vorwärtsspitzenperspg.

Beschreibung des Verhaltens:

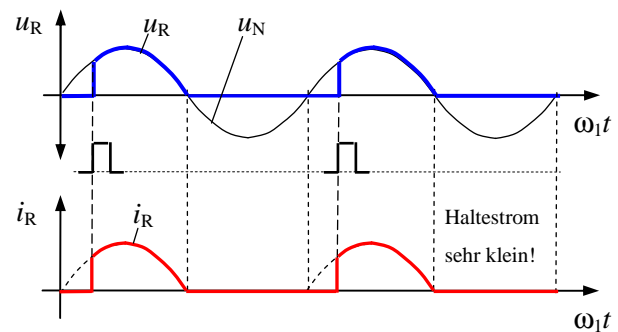
- Thyristor sperrt in Rückwärtsrichtung ((2 PN-Übergänge)
- Thyristor sperrt auch in Vorwärtsrichtung (1 PN-Übergang). Zündet aber nach Überschreiten der Spannung  $U_{(BO)}$  (Steuerstrom  $i_G = 0$ )
- Mit (Gate)-Ansteuerimpuls wird der Thyristor in Vorwärtsrichtung gezielt zum leiten gebracht
- Bei unterschreiten des Haltestromes  $I_H$  geht der Thyristor wieder in den Sperrzustand

Schaltungsbeispiele:

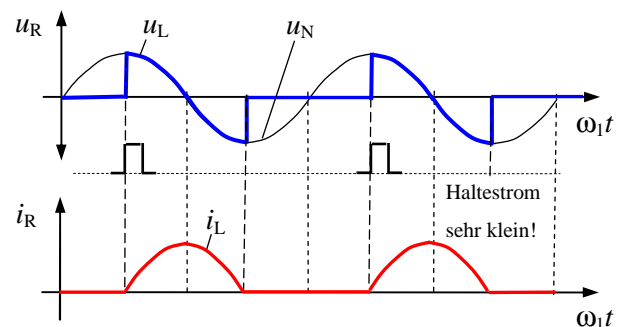
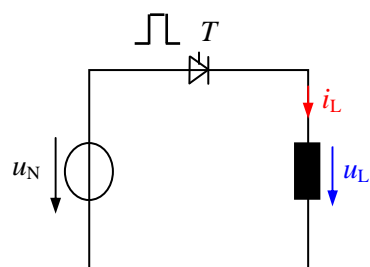
- Ohmsche Last



Strom- und Spannungsverläufe:



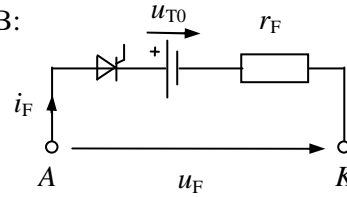
- Induktive Last



**Statisches Verhalten des Thyristors**

- Beschreibung im Durchlassbereich:

ESB:



Näherung mit Hilfe einer Graden

Schleusenspannung:  $u_{T0}$ , oder  $u_{F0}$

Differentieller Widerstand:  $r_T$  oder  $r_F$

$$u_F = u_{T0} + r_T \cdot i_F \quad \text{mit} \quad r_F = \frac{\Delta u_F}{\Delta i_F}$$

⇒ Verlustberechnung vergleiche mit Diode!

- Beschreibung im Sperrbereich:

⇒ Sperrverhalten wie Diode!

**Dynamisches Verhalten des Thyristors**

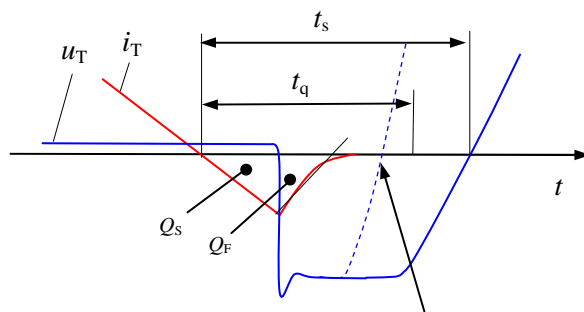
Einschaltverhalten (Sichere Zündung mit Zündstrom):

- mindest Gatestrom:  $\hat{i}_{G \text{ typ.}} = 1 - 2 \text{ A}$
- mindest Gatestrom – Impulsdauer:  $t_{IG \text{ typ.}} = 6 - 10 \mu\text{s}$
- Mindest Gatestrom – Anstiegszeit:  $\frac{di_G}{dt} \geq (1 - 2) \frac{\text{A}}{\mu\text{s}}$

Achtung: Beim Einschalten muss ein Thyristorstrom  $i_T \geq$  dem Einraststrom  $i_L$  fließen können!

Im Betrieb muss der Thyristorstrom  $i_T \geq$  dem Haltestrom  $i_H$  sein!

Ausschaltverhalten (Ausschaltvorgabe von außen):



- Freiwerdezeit  $t_q$
- Schonzeit  $t_s \approx (1.3 - 1.5) \cdot t_q$

Ausschaltbedingung:

$$i_T < i_H \text{ und } u_T < 0 \text{ für } t > t_q$$

Netzthyristoren  $t_q \approx (50 \dots 100) \mu\text{s}$

Frequenzthyristoren  $t_q \approx (6 \dots 60) \mu\text{s}$

Ist die Schonzeit  $t_s$  kleiner als die Freiwerdezeit  $t_q$  schaltet der Thyristor wieder durch!

$$t_q = f\left(\vartheta, i_T, u_T, \frac{di_T}{dt}, \frac{du_T}{dt}\right)$$

TSE-Schutzbeschaltung erforderlich (vergl. Diode)!

**Weitere wichtige Halbleitereigenschaften:**

- Kritische Spannungssteilheit  $\frac{du_T}{dt}$  kritisch

Maximal zulässige Spannungsanstieg bei der der Thyristor bei offenem Gate noch nicht in den leitenden Zustand gelangt.

Typisch:  $\frac{du_T}{dt}$  kritisch  $\approx (200 \dots 500) \frac{V}{\mu s}$

- Kritische Stromsteilheit  $\frac{di_T}{dt}$  kritisch

Maximal zulässige Stromsteilheit beim Einschalten.

Typisch:  $\frac{di_T}{dt}$  kritisch  $\approx (100 \dots 500) \frac{A}{\mu s}$

Forderung:  $\frac{di_T}{dt} \leq \frac{di_T}{dt}$  kritisch

Stromanstiegsbegrenzung mit Reihendrossel erforderlich:

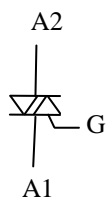
- Üblich Sättigungsdrossel:
  - Zunächst langsamer Stromanstieg
  - Nach Sättigung schneller Stromanstieg

**Anwendung von Thyristoren:**

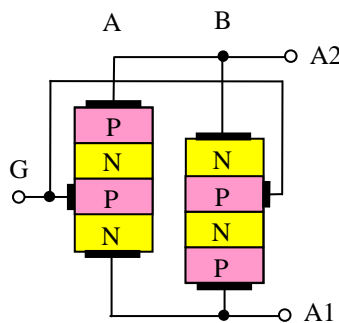
- Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen (HGÜ), Netzkopplungen
- Gleichstromantriebe
- Wechselstromsteller

**2.2.2. Triac**

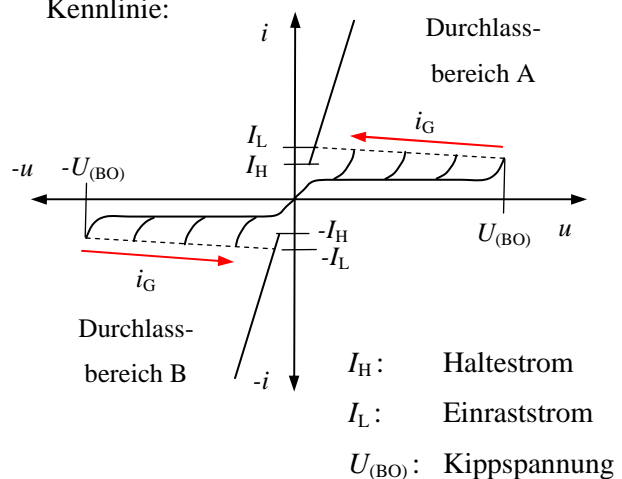
Schaltzeichen:



Aufbau:



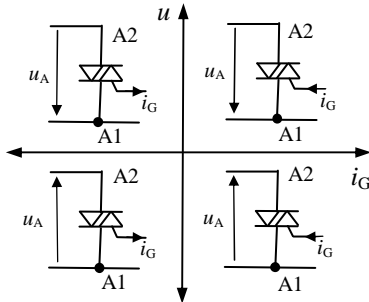
Kennlinie:



Aufbau und Verhalten eines Triacs:

- Zwei Thyristoren werden antiparallel geschaltet (Lediglich ein Zündstrom!)
- Triac sperrt in Rückwärts- und Vorwärtsrichtung. Zündet beim Überschreiten der Spannung  $U_{(B0)}$  (Steuerstrom  $i_G = 0$ )
- Mit einem (Gate)-Ansteuerimpuls wird der Triac zum leiten gebracht
- Bei unterschreiten des Haltestromes  $I_H$  geht der Triac wieder in den Sperrzustand

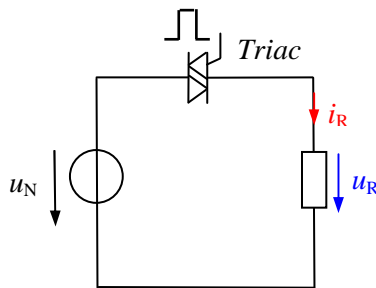
Ansteuerung des Triacs:



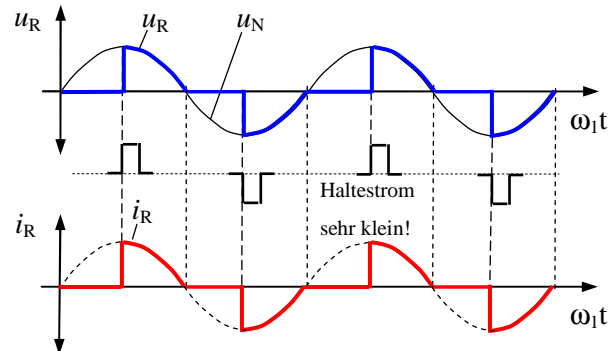
- Steuerempfindlichkeit im I und III Quadranten gut
- Ca. doppelter Steuerstrom im II und IV Quadranten erforderlich

Schaltungsbeispiele:

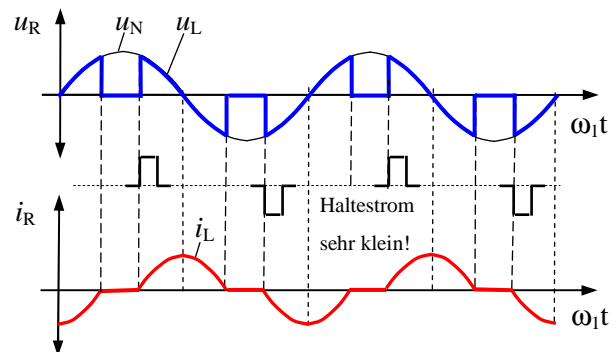
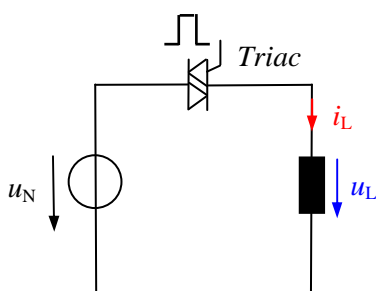
- Ohmsche Last



Strom- und Spannungsverläufe:



- Induktive Last



Triac Anwendungen:

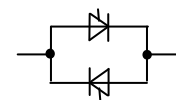
Phasenanschnittsteuerungen (z.B. Dimmer)

Industrielle Anwendungen:

Triac - Funktion mit zwei Thyristoren

Problem: Aufwendige Ansteuerung!

Zwei galvanisch getrennte Ansteuerkreise erforderlich.

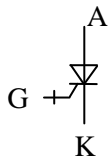




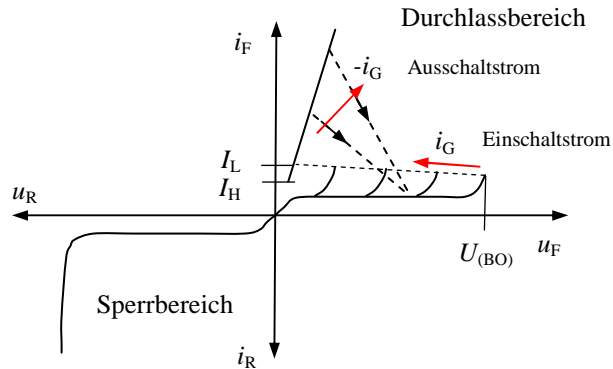
### 2.2.3. Gate Turn Off Thyristor (GTO)

Der Gate Turn Off Thyristor (GTO) ist ein Thyristor, der zusätzlich mittels negativem Gatestrom abgeschaltet werden kann.

Schaltzeichen:



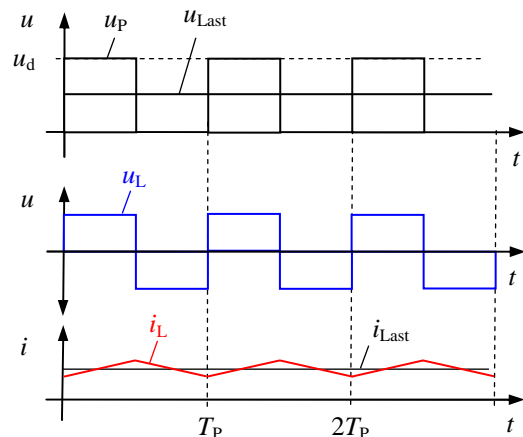
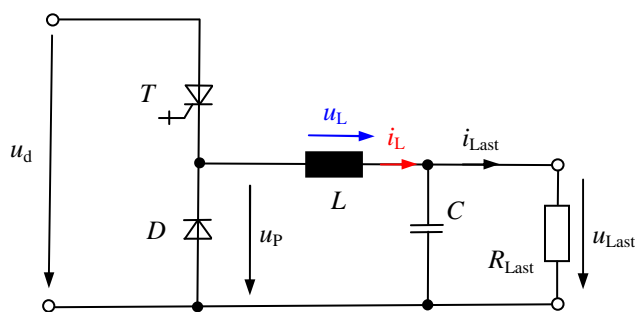
Kennlinie:



Aufbau und Verhalten eines GTOs:

- Aufbau wie normaler Thyristor, allerdings ist die Kathode mit Gatefinger durchsetzt
- GTO sperrt in Rückwärts- und Vorwärtsrichtung
- (Gate)-Ansteuerimpuls bringt den GTO in Vorwärtsrichtung zum leiten
- Negativer (Gate)-Ansteuerimpuls führt zum sperren des GTOs  
(Achtung: Großer Gatestrom 0.2 - 0.3fach des abzuschaltenden Stromes)
- Bei unterschreiten des Haltestromes  $I_H$  geht der GTO auch ohne (Gate)-Abschaltung wieder in Sperrzustand

Stellerschaltung mit GTOs:



GTO Anwendungen:

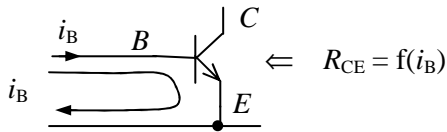
- Gepulste Wechselrichter mit sehr großen Leistungen
- Gleichstromsteller mit sehr großen Leistungen

### 2.3. Transistoren

Für leistungselektronische Anwendungen wird der Transistor vorwiegend im Schalterbetrieb genutzt!

#### Transistortechnologien in der Leistungselektronik:

🚧 NPN-Transistor (Leistungstransistor)



- Stromgesteuertes Bauelement (Ansteuerverluste)

- Einsatzbereich:

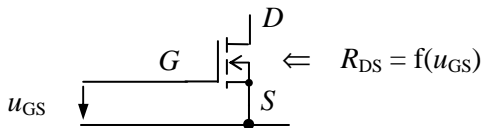
$f_{Takt}$  bis ca. 10kHz

bis ca. 1000V

bis einige 10A

Wird heute aufgrund der Ansteuerverluste kaum noch eingesetzt!

🚧 N-Kanal MOSFET selbstsperrend



- Spannungsgesteuertes Bauelement

- Einsatzbereich:

$f_{Takt}$  bis 20kHz oder  $f_{Takt} > 20kHz$

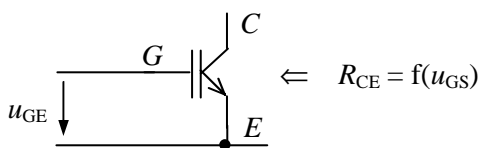
bis ca. 200V

bis ca. 1200V

bis ca. 300A

bis ca. 30A

🚧 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)



- Spannungsgesteuertes Bauelement

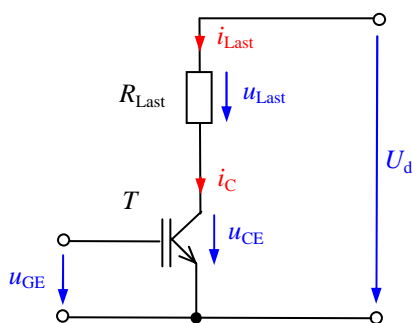
- Einsatzbereich:

$f_{Takt}$  bis ca. 30kHz

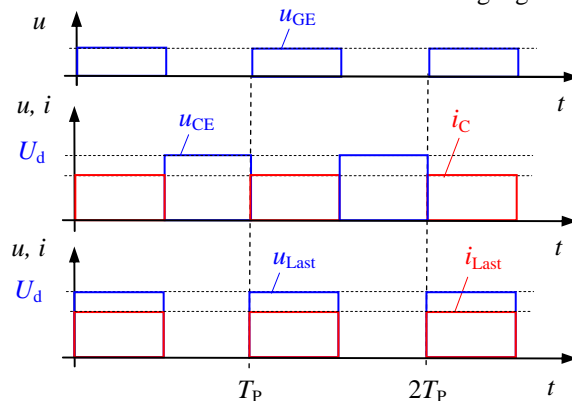
von ca. 150V bis ca. 6.5kV

von ca. 10A bis ca. 3.0kA

Schalten bei ohmscher Last



Schaltvorgänge idealisiert!

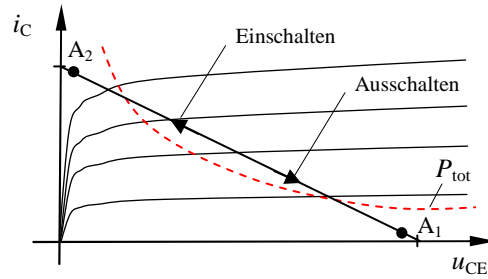
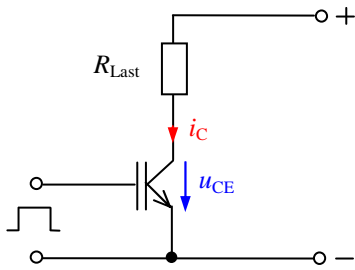


Leistungshalbleiter

Dynamischer Übergang beim Schalten:

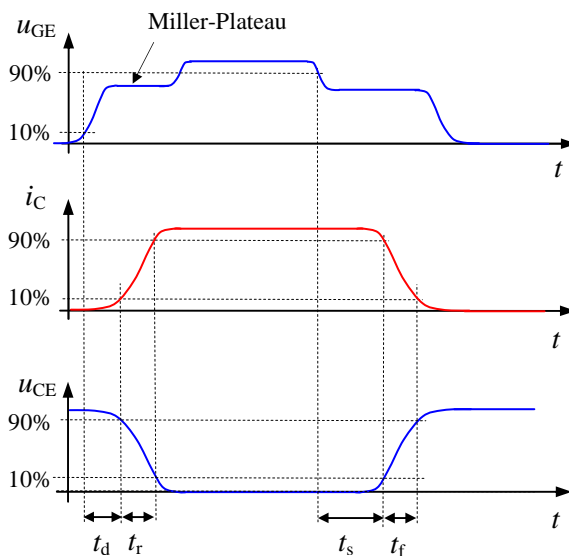
A1: Ausschaltzustand

A2: Einschaltzustand



⇒ Verlustleistungshyperbel wird schnell durchlaufen!

Definition der Schaltzeiten:



$t_d$ : Verzögerungszeit (delay time)

$t_r$ : Anstiegszeit (rise time)

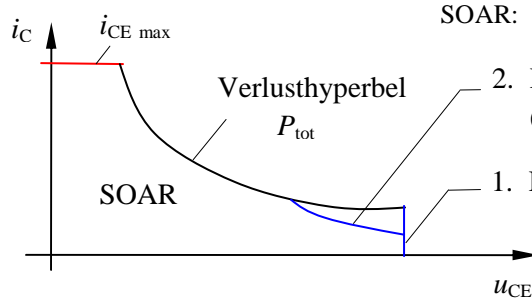
$t_s$ : Speicherzeit (storage time)

$t_f$ : Abfallzeit (fall time)

$t_{on} = t_d + t_r$

$t_{off} = t_s + t_f$

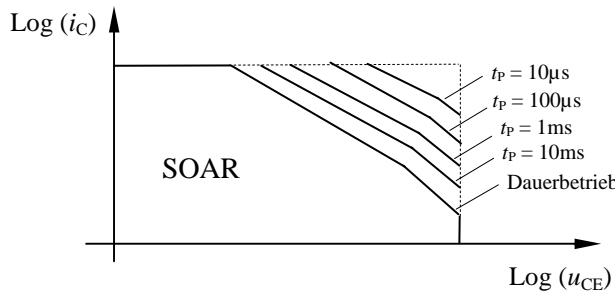
Betriebsgrenzen eines Transistors



SOAR: Safe Operated Area Sicherer Arbeitsbereich

2. Durchbruch (Second break down)  
(Verursacht durch E-Felder bei leitender Basis  $\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$ )

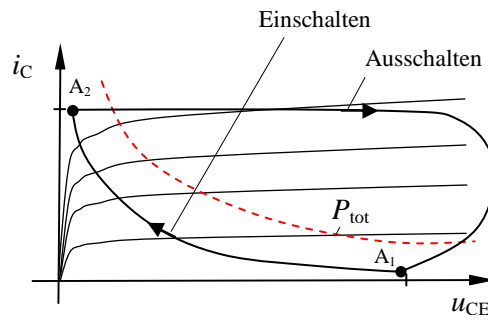
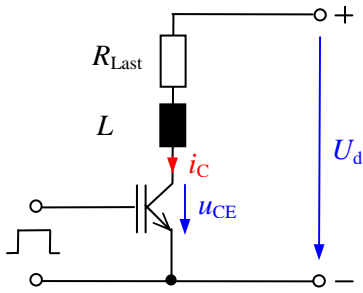
Gilt nur für bipolaren Transistor!



Logarithmische Darstellung:

Typische Angabe im Datenblatt!

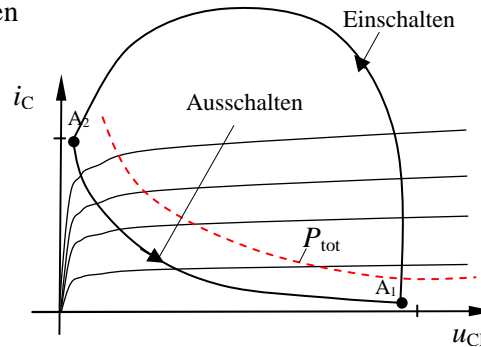
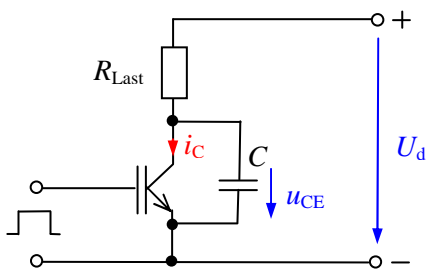
Einfluss durch (parasitäre) Induktivitäten beim Schalten



- Entlastung beim Einschalten:
- Starke Belastung beim Ausschalten:

Der Stromanstieg wird durch die Drossel begrenzt!  
Die Spannung an der Drossel muss negativ werden damit der Drosselstrom sinkt. Dies hat zur Folge, dass die Spannung am Schaltelement zunächst in etwa auf die Eingangsspannung  $U_d$  ansteigt bis der Strom zu sinken beginnt.

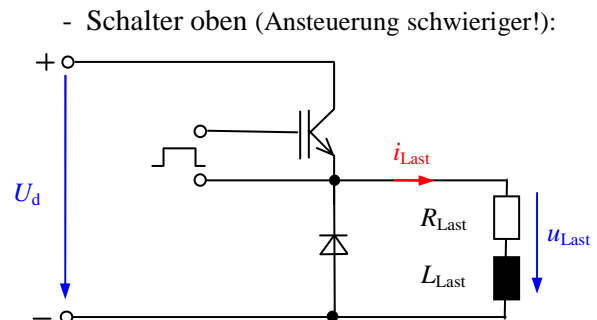
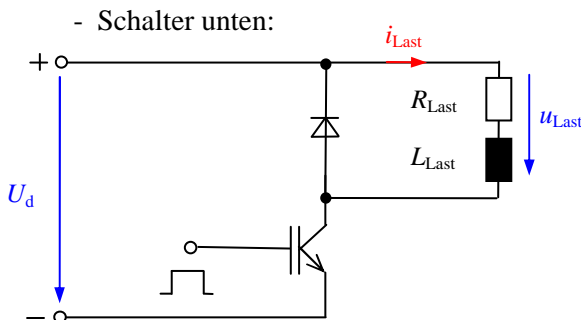
Einfluss durch (parasitäre) Kapazitäten beim Schalten



- Starke Belastung beim Einschalten:
- Entlastung beim Ausschalten:

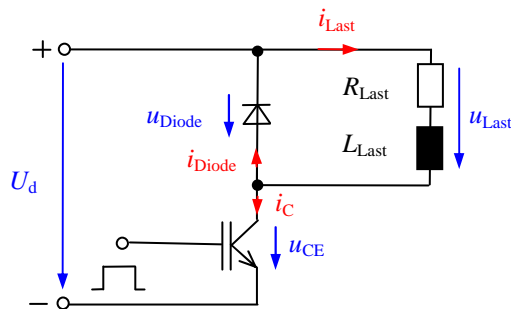
Beim Einschalten beginnt der Laststrom über das Schaltelement zu fließen. Darüber hinaus wird der Kondensator über das Schaltelement entladen.  
Der Spannungsanstieg am Schaltelement wird durch den Kondensator begrenzt!

Schalten induktiver Lasten: → Freilauf erforderlich!

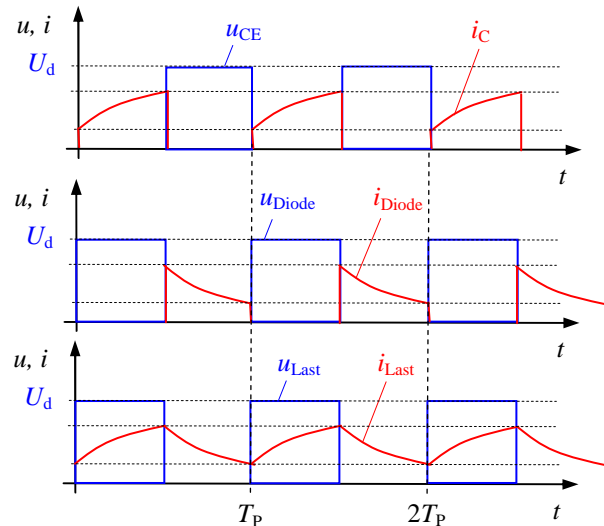


Erforderliche Maßnahmen zur Realisierung eines vollständigen Umrichters

Ein Freilaufzweig für die ohmsch/induktive Lasten wurde schon eingefügt!



Schaltvorgänge idealisiert!



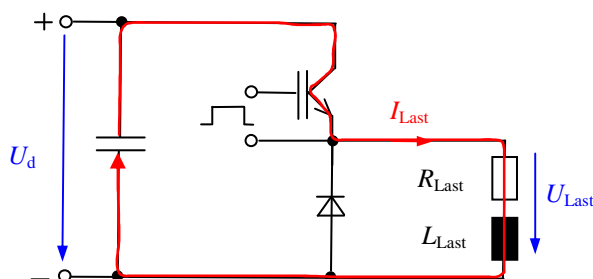
Mit dem Freilaufzweig wird erreicht, dass der Laststrom nach dem Schaltvorgang weiter fließen kann. Abrupte Stromsprünge im Ausgangskreis während der Schaltvorgänge werden somit vermieden!

Problem: Im Eingangskreis mit der Spannungsquelle  $U_d$  tritt ein pulsformiger Strom auf. Die Leitungen für den Anschluss der Spannungsquelle können durchaus einige Meter betragen. Die parasitären Induktivitäten des Eingangskreises belasten die Halbleiter beim Schalten.

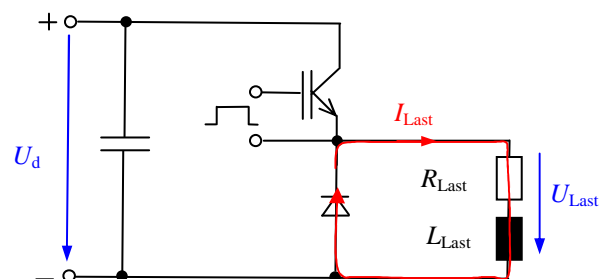
Abhilfe: Ein Stützkondensator im Gleichspannungseingang des Konverters

Betriebsbereiche für einen vollständigen Umrichter (Steller)

Arbeitsbereich:



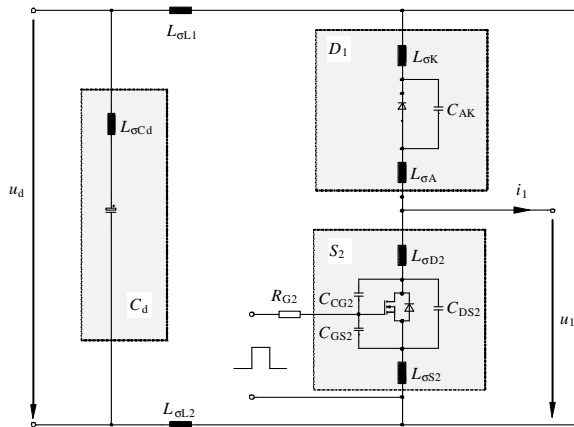
Freilaufbereich:



Die beiden Betriebsbereiche zeigen, dass der Strom im Eingangskreis und im Lastkreis unabhängig vom Schaltvorgang fließen kann. Eine sprunghafte Stromänderung während der Schaltvorgänge tritt nur noch im Schaltkreis: **Stützkondensator, Transistor und Diode** auf. Dieser Schaltkreis des Umrichters sollte sehr sorgfältig und induktivitätsarm aufgebaut werden!

**Untersuchung der Schaltvorgänge:**

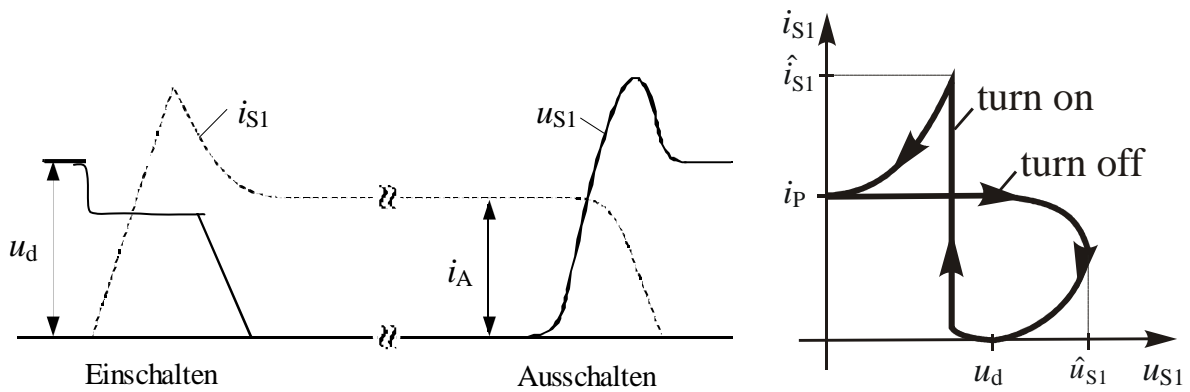
Relevanter Schaltkreis mit den parasitären Elementen des Umrichters:



Parasitäre Elemente des Schaltkreises führen zum:

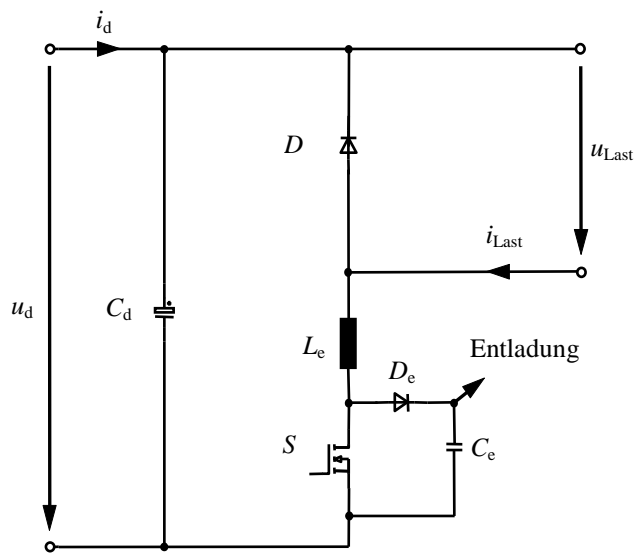
- Spannungseinbruch beim Einschalten
- Spannungsüberschwingen beim Ausschalten

Spannungs- und Stromverlauf während der Schaltvorgänge:



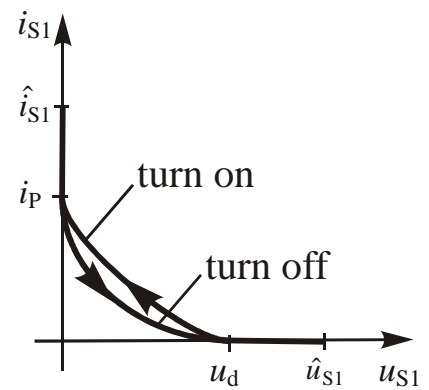
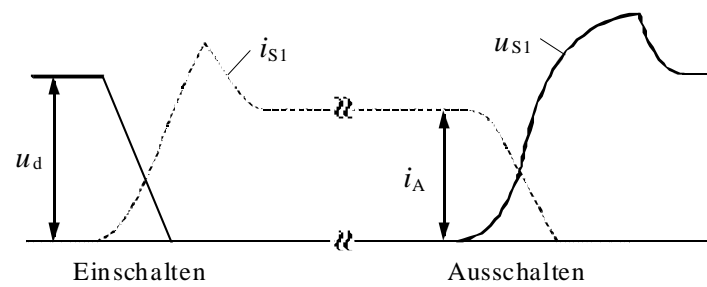
Annahme: Gleich großer Strom beim Ein- und Ausschalten!

Entlastungsnetzwerk für die Schaltelemente



- Drossel begrenzt den Stromanstieg beim Einschalten
- Kapazität begrenzt den Spannungsanstieg beim Ausschalten

Spannungs- und Stromverläufe bei den Schaltvorgängen

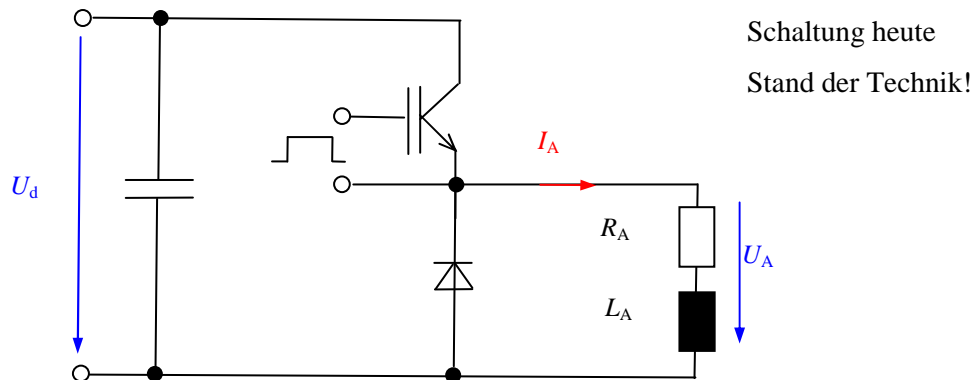


⇒ Die Verluste werden zum Teil in das Entlastungsnetzwerk verlagert!

### Mögliche Realisierung eines Gleichstromstellers

Mit Schaltelement zum ein- und ausschalten (oben) oder mit herkömmlichen Thyristoren und Löschschtaltung (unten).

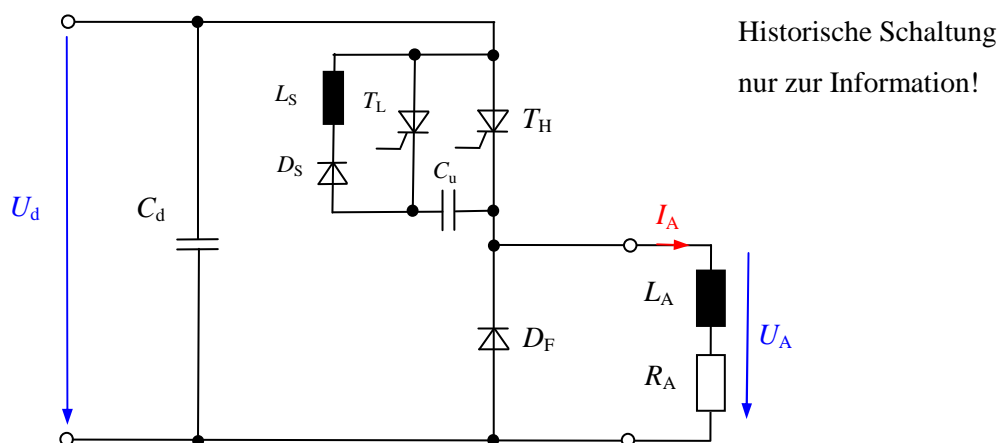
#### Gleichstromsteller mit Schaltelementen



Das Schaltelement in diesem Steller muss über den Ansteuerkreis ein- und ausschaltbar sein!  
Mögliche Schaltelemente: IGBT, MOSFET, bipolarer Transistor oder GTO.

#### Gleichstromsteller mit Umschwinglöschtung

Bei Einsatz von herkömmlichen Thyristoren ist eine Löschschtaltung erforderlich!  
Umschwinglöschtung nach Tröger.

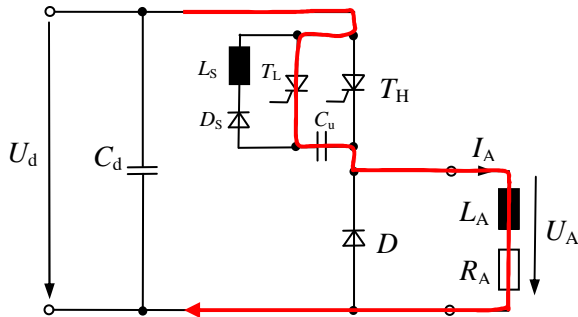


Bei diesen Konvertertypen wird im Eingang jeweils eine Gleichspannung  $U_d$  eingepreßt ( $U_d \approx \text{konstant}$ ). Aus diesem Grunde gehört die Schaltung zur der Gruppe der Voltage Source Konverter.

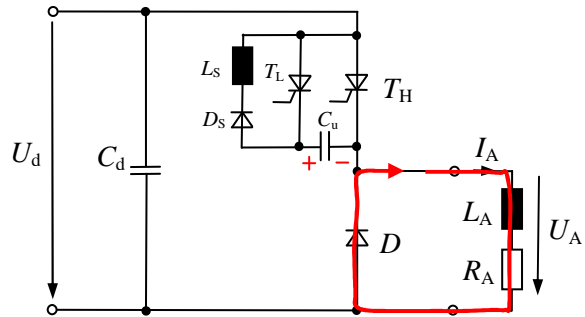


## Gleichstromsteller mit Umschwinglöschschaltung (Historische Schaltung!)

### - Erstes Laden des Umschwingkondensators -

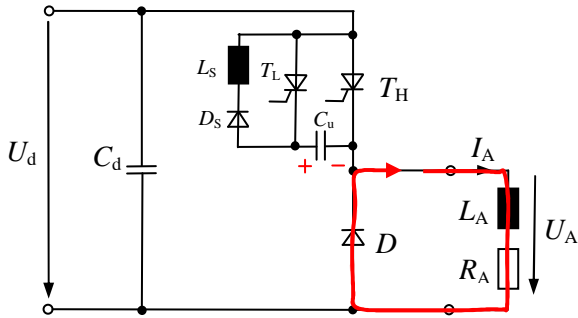


Löschtransistor  $T_L$  wird gezündet  
Laden von Kondensator  $C_u$

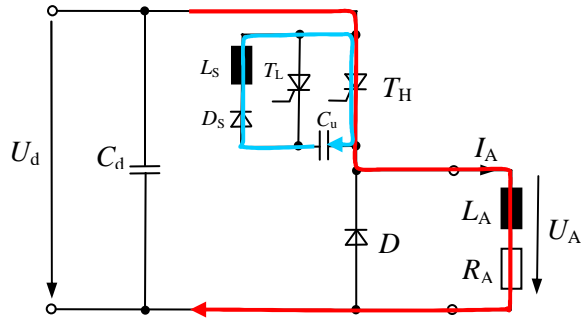


Freilaufstrom klingt langsam ab  
Schaltung ist betriebsbereit

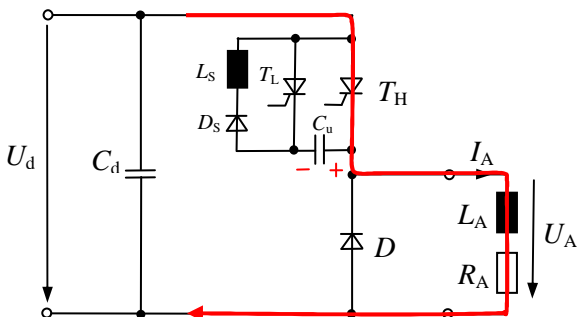
### - Normaler Betrieb -



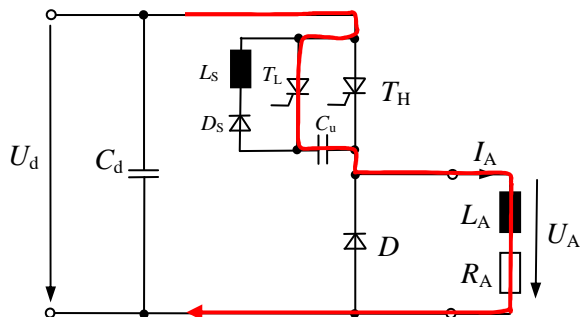
Freilaufbereich



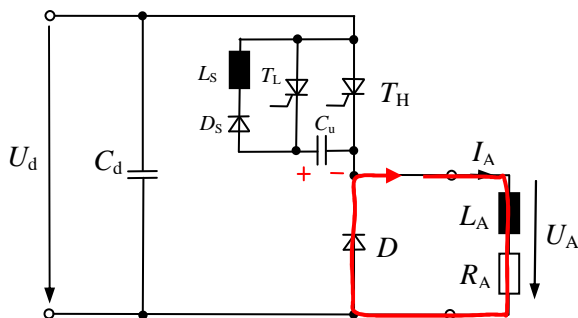
Hauptthyristor  $T_H$  wird gezündet  
Umladen von Kondensator  $C_u$



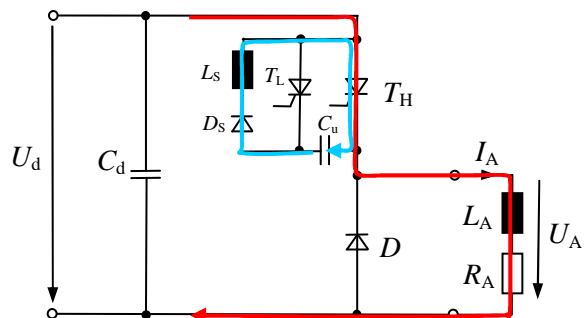
Arbeitsbereich



Kondensator wird um/aufgeladen

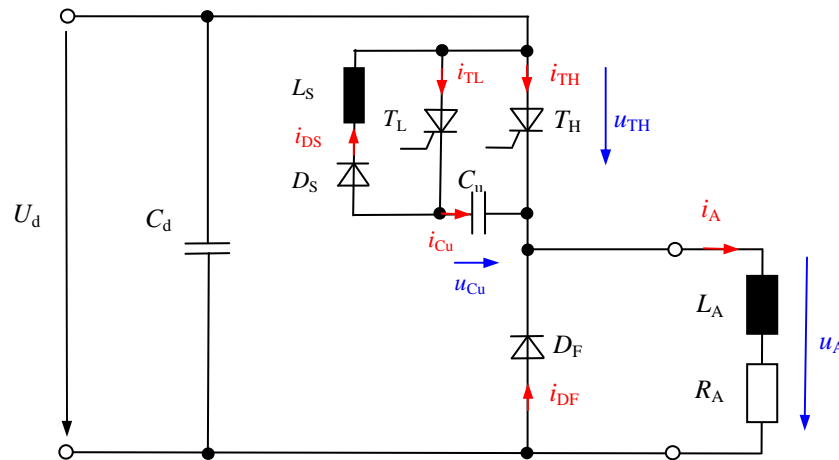


Freilaufbereich

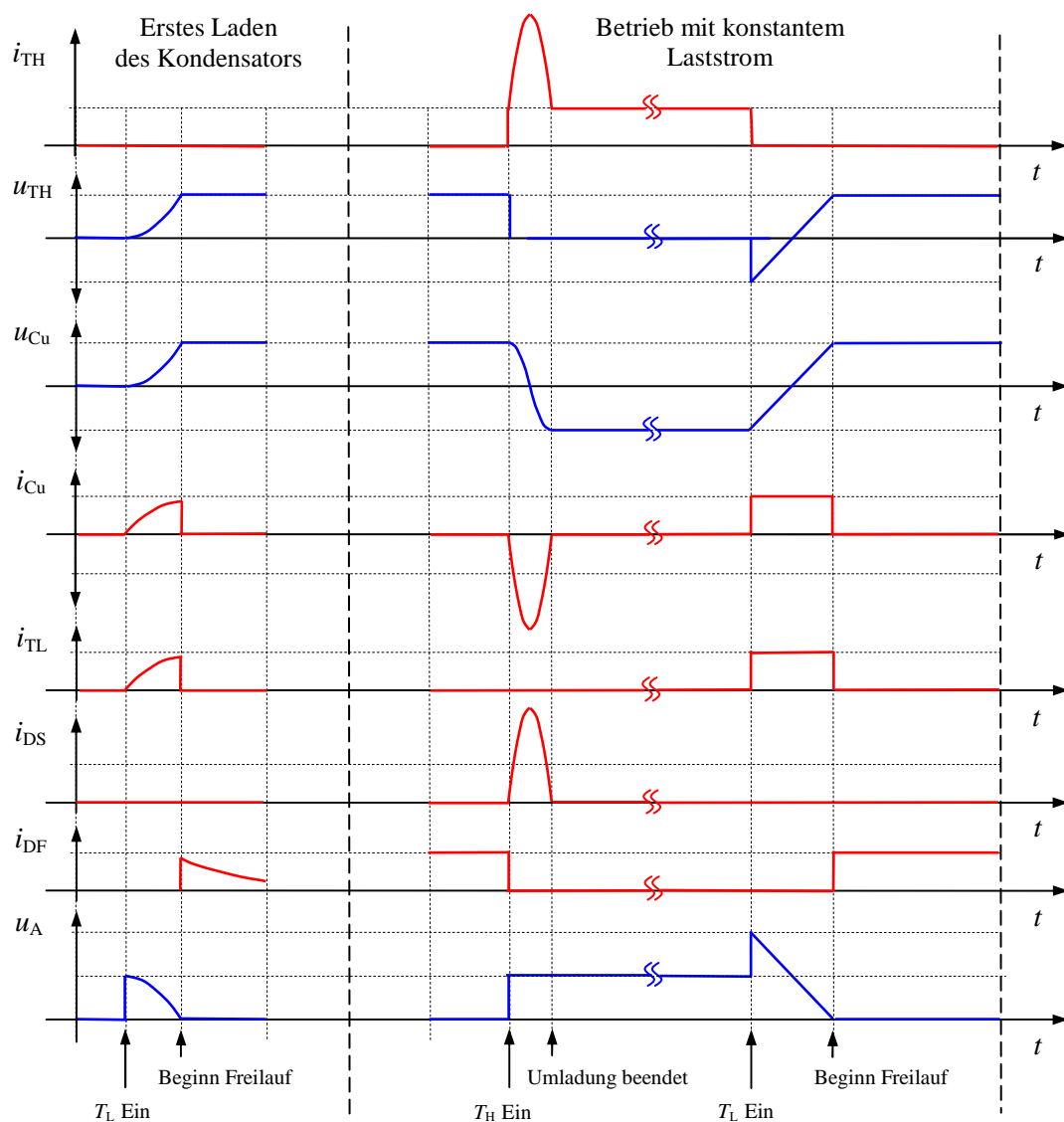


Hauptthyristor wird gezündet  
Umladen von Kondensator  $C_u$

Gleichstromsteller mit Umschwinglöschschaltung (Historische Schaltung!):



Idealisierte Strom- und Spannungsverläufe:



## 2.4. Verluste und Kühlung

Für den sicheren Betrieb eines Halbleiters müssen die maximalen Temperaturen des Halbleiterkristalls eingehalten werden. Folgende Schritte sind erforderlich:

- ⇒ Bestimmung der auftretenden Verluste
- ⇒ Dimensionierung der Kühlung

### 2.4.1. Verluste bei Halbleitern

Einteilung der Verluste bei Halbleitern:

- Durchlassverluste
- Schaltverluste
- Sperrverluste
- Ansteuerungsverluste

#### Verluste bei Schaltungen mit Thyristoren und Dioden (Netzgeführte Umrichter)

- Durchlassverluste
- ⇒ Berechnung der Durchlassverluste bei Dioden und Thyristoren:

$$\text{Diode: } P_{VD} = u_{DO} \cdot I_{DAV} + r_D \cdot I_{DRMS}^2$$

$$\text{Thyristor: } P_{VD} = u_{T0} \cdot I_{TAV} + r_T \cdot I_{TRMS}^2 \quad (\text{Siehe auch Kapitel 2.1.1.})$$

- Geringe Schaltverluste
- ⇒ Betrieb im allgemeinen mit kleinen Schaltfrequenzen!
- Geringe Sperrverluste
- ⇒ Sehr kleine Leckströme!
- Geringe Ansteuerungsverluste
- ⇒ Ansteuerung mittels Zündimpuls!

#### Verluste bei Schaltungen mit Transistoren und Dioden (Getaktete Schaltungen)

- Durchlassverluste
- ⇒ Berechnung der Durchlassverluste bei Transistoren:

$$\text{IGBT und bipolarer Transistor: } P_{VD} = u_{T0} \cdot I_{TAV} + r_T \cdot I_{TRMS}^2$$

$$\text{MOSFET: } P_{VD} = r_{DSon} \cdot I_{TRMS}^2 \quad (r_{DSon}: \text{leitender Kanal})$$

Beachte: Beim Betrieb in Rückwärtsrichtung sind Drain Source Kanal und interne Diode des MOSFETs parallel geschaltet!

- Schaltverluste

### *Schaltverluste an Transistoren*

Bei Betrieb mit hohen Frequenzen müssen die Schaltverluste mit berücksichtigt werden. Die Verlustenergien beim Ein- und Ausschalten werden im Datenblatt angegeben. Die Verlustleistung berechnet sich durch Multiplikation dieser Energien mit der Taktfrequenz:

$$P_{VS} = (W_{T\text{on}} + W_{T\text{off}}) \cdot f_T$$

$W_{T\text{on}}$  und  $W_{T\text{off}} = f(U_{\text{Sperr}}, I_{\text{Durchlass}}, \text{Schaltdauer}, \text{Temperatur}, \text{Steuerspannung})$

### *Schaltverluste in Dioden*

Bei Stromrichtern im Schalterbetrieb werden üblicherweise Dioden eingesetzt. Die Schaltverluste bei Übergang in den Sperrzustand müssen berücksichtigt werden. Es gilt folgende Näherung:

$$P_{VS} = \frac{Q_{tr}}{2} \cdot U_{\text{Sperr}} \cdot f_T$$

Bemerkung: Ein großer Teil der Ladung wird nahezu verlustlos ausgeräumt ( $\Rightarrow Q_{tr}/2$ )!

### *Schaltverluste durch Avalancheverhalten bei MOSFETs*

Normal kein dauerhafter Betrieb mit Avalanchedurchbrüche. Muss nur bei extremen Situationen berücksichtigt werden.

- Geringe Sperrverluste

$\Rightarrow$  Sehr kleine Leckströme!

- Ansteuerverluste

Geringe Ansteuerverluste bei IGBTs und MOSFETs.

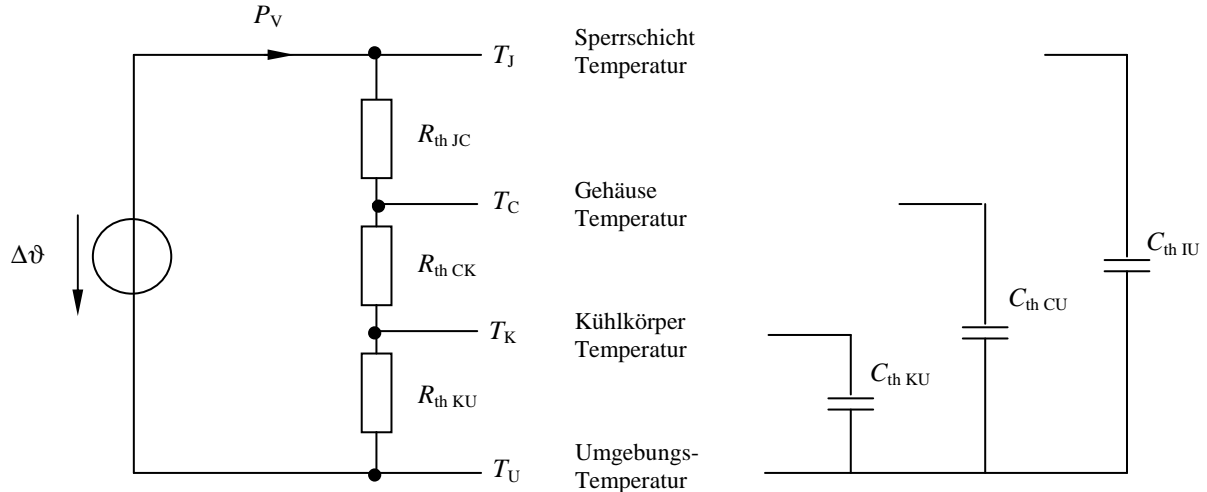
$\Rightarrow$  Nur kurze pulsartige Ansteuerströme da Bauteile spannungsgesteuert (Nur Ladung bzw. Entladung der Gate – Eingangskapazitäten!).

Größere Ansteuerverluste beim bipolaren Transistor, da Basisstrom während der gesamten Einschaltdauer fließt. Bauteil wird aber kaum noch eingesetzt!

**2.4.2. Kühlung von Halbleitern**

Beispiel: Kühlung eines Halbleiters mit Kühlkörper

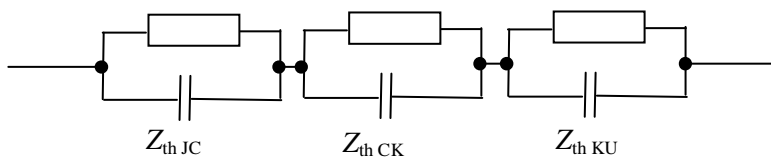
**Physikalisches Ersatzschaltbild:**



Formel: 
$$P_V = \frac{\Delta\vartheta}{\sum_{i=1}^n Z_{th i}(t)} = \frac{T_J - T_U}{Z_{th JC}(t) + Z_{th CK}(t) + Z_{th KU}(t)}$$

Bestimmung der  $Z_{th}$ -Werte beim physikalischen Modell schwierig!

**Betrachtung als Kettenleiter (Umrechnung in Kettenleiter möglich!):**



Ermittlung der  $Z_{th}$ -Werte einfacher! 
$$Z_{th i} = R_{th i} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right)$$

**Übliche Auslegung für den Dauerbetrieb!**

$$P_V = \frac{T_J - T_U}{R_{th JC} + R_{th CK} + R_{th KU}} \quad \text{für } t \rightarrow \infty \text{ gilt } Z_{th}(t) = R_{th}$$

- $R_{th JC}$  Datenblattangabe: Bauelement
- $R_{th CK}$  Datenblattangabe: Isolierfolie, Wärmeleitpaste
- $R_{th KU}$  Datenblattangabe: Kühlkörper

Kühlvarianten:

- Kühlung über Kühlkörper
- Luftselbstkühlung
- Forcierte Luftkühlung (Lüfter typ 6m/s)
- Ölkühlung
- Wasserkühlung
- Heat pipes Kühlung (Wärmerohr-Kühlung)

## 2.5. Überstromschutz von Leistungshalbleitern

Dioden, Thyristoren                      Schutz durch Speziälsicherung möglich!

*Belastungsgrenzen:*

Grenzstrom:

Maximaler Dauerstrom, Übliche Angabe:

Grenzstromkennlinie mit Scheitelwert sinusförmiger 50Hz-Halbschwingungen

Stoßstrom-Grenzwert  $I_{TSM}$ :

Höchstzulässiger Strom einer Sinushalbschwingung (50Hz).  
(Einmalige Belastung)

Grenzlastintegral ( $I^2t$ -Wert):

Höchstzulässiger Wert des Zeitintegrals  $\int i^2 dt$

Übliche Angabe im Datenblatt für 10ms

Es gilt: 
$$\int i^2 dt = \frac{I_{TSM} \cdot T_P}{2}$$

Transistoren

Schutz durch Strombegrenzung oder/und Abschaltung!

(Sicherung i.a. zu langsam!)

*Auslöseverfahren:*

Üblich:  $I^2t$ - Begrenzung in Regelung integriert (Wärme  $\sim I^2$ )

$U_{CE}$  – Abschaltung bei IGBTs

## 2.6. Weitere Leistungshalbleiter

### Thyristoren:

RLT	Rückwärtsleitender Thyristor
ASCR	Asymmetrisch Sperrender Thyristor

### GTO:

IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor
	GTO mit integrierter Gate - Ansteuerung $\Rightarrow$ Kurze Schaltzeiten

### Dioden:

Schottky - Dioden Dioden mit sehr kurzen Sperrverzugszeiten, Typen für maximale Sperrspannungen bis ca. 200V erhältlich!

### Siliziumkarbid – Bauelemente:

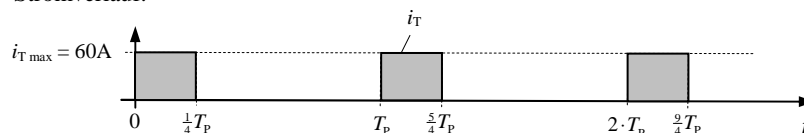
Betrieb mit Temperaturen bis ca. 350°C  
Dioden haben extrem kurze Sperrverzugszeiten  
Bauelemente sind noch extrem teuer

## Übungsaufgaben zu Kapitel 2

### Aufgabe 1

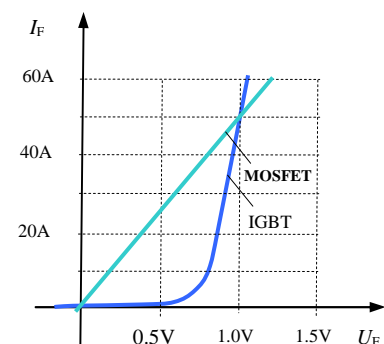
Ein IGBT und ein MOSFET werden mit dem dargestellten pulsformigen Strom belastet. Darüber hinaus sind die Durchlasskennlinien der Bauelemente gegeben.

Stromverlauf:



- Berechnen Sie den Mittel- und den Effektivwert des Stromes.
- Beschreiben Sie das Durchlassverhalten der Transistoren in Näherung durch Linearisierung ( $u_{T0}$ ,  $r_T$  und  $r_{DS\ on}$ )
- Bestimmen Sie die Durchlassverluste im IGBT.
- Wie groß sind die Durchlassverluste im MOSFET?

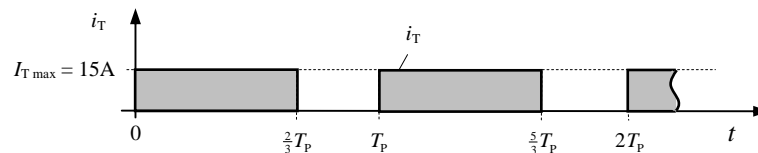
Durchlasskennlinie:



### Aufgabe 2

Ein IGBT wird mit dem dargestellten Strom belastet. Die Taktfrequenz beträgt  $f_T = 20\text{kHz}$ . Vom IGBT sind die Schleusenspannung  $U_{T0} = 0.9\text{V}$  und der differentielle Widerstand  $r_T = 20\text{m}\Omega$  gegeben. Darüber hinaus wurden die Verlustenergien beim Einschalten  $W_{\text{Ein}} = 0.3\text{mWs}$  und beim Ausschalten  $W_{\text{Aus}} = 0.2\text{mWs}$  des IGBTs messtechnisch bestimmt.

Stromverlauf:

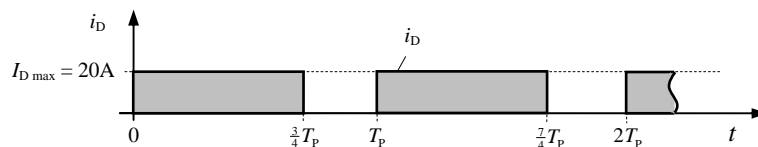


- Zeichnen Sie das Schaltzeichen eines IGBTs und benennen Sie die Anschlüsse.
- Berechnen Sie den Mittel- und den Effektivwert des dargestellten Stromes.
- Bestimmen Sie die Durchlassverluste, Schaltverluste und Gesamtverluste im IGBT.

### Aufgabe 3

Eine Leistungsdiode wird mit dem dargestellten Strom belastet. Die Taktfrequenz beträgt  $f_T = 25\text{kHz}$ . Von der Diode sind die Schleusenspannung  $U_{D0} = 0.8\text{V}$  und der differentielle Widerstand  $r_D = 20\text{m}\Omega$  gegeben. Darüber hinaus wurde die Verlustenergie beim Ausschalten der Diode  $W_{\text{Aus}} = 0.2\text{mWs}$  messtechnisch bestimmt (Anmerkung:  $W_{\text{Ein}}$  ist vernachlässigbar!).

Stromverlauf:



- Berechnen Sie den Mittel- und den Effektivwert von dargestellten Strom.
- Bestimmen Sie die Durchlassverluste, Schaltverluste und Gesamtverluste in der Diode.
- Skizzieren Sie den prinzipiellen Strom- und Spannungsverlauf beim Ausschalten einer Diode. Geben Sie die Sperrverzugszeit  $t_{\text{tr}}$  in der Grafik an.

### Aufgabe 4

Für eine Leistungsdiode mit der Verlustleistung  $P_V = 30\text{W}$  soll ein Kühlkörper ausgelegt werden. Die zulässige Sperrschichttemperatur beträgt  $T_{J\text{zul}} = 150^\circ\text{C}$  und die Umgebungstemperatur ist  $T_u = 30^\circ\text{C}$ . Diese Diode soll mittels Isolierfolie elektrisch isoliert an den Kühlkörper befestigt werden.

- Zeichnen Sie das physikalische thermische Ersatzschaltbild der Gesamtanordnung (Mit den thermischen Widerständen und den thermischen Kapazitäten!).
- Die Kühlung soll für den Dauerbetrieb ausgelegt werden. Bestimmen Sie den maximal zulässigen thermischen Gesamtwiderstand der Anordnung.
- Der interne thermische Widerstand der Diode beträgt  $R_{\text{thJC}} = 0.6\text{K/W}$  und der der Isolierfolie ist  $R_{\text{thCK}} = 1.2\text{K/W}$ . Bestimmen Sie den maximalen Kühlkörper-Widerstand  $R_{\text{thKU}}$ .



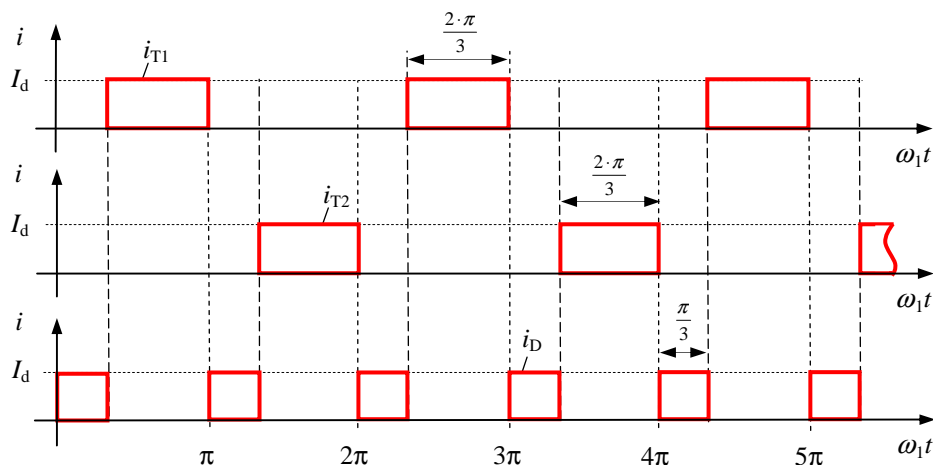
### Aufgabe 5

Die Stromverläufe in den Thyristoren  $T_1$  und  $T_2$  sowie in der Diode  $D$  sind in der Zeichnung dargestellt. Die Gehäusebauform von allen Leistungshalbleitern ist identisch, so dass die thermischen Widerstände zwischen Sperrschicht und Kühlkörper jeweils gleich groß sind. Schaltverluste sollen vernachlässigt werden.

Gegebene Daten:

Gleichstrom	$I_d = 60\text{A}$	
Umgebungstemperatur	$t_u = 50^\circ\text{C}$	
Thermische Widerstände	$R_{th\text{JK}} = 0.6\text{ K/W}$	- Sperrschicht Kühlkörper -
	$R_{th\text{KU}} = 0.3\text{ K/W}$	- Kühlkörper Umgebung -

Stromverläufe:



- Berechnen Sie die Mittel- und Effektivwerte von den dargestellten Thyristorströmen sowie vom Diodenstrom.
- Laut Datenblatt haben alle Halbleiter die Schleusenspannung  $u_{T0} = 1\text{V}$  und den differentiellen Widerstand  $r_T = 5\text{m}\Omega$ . Bestimmen Sie die Verlustleistung in den Thyristoren.
- Alle Thyristoren sind auf einem Kühlkörper montiert. Berechnen Sie die Kühlkörpertemperatur  $t_K$  und die Sperrschichttemperatur  $t_j$  der Thyristoren.