



Technische
Universität
Braunschweig

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



Grundlagen der Energietechnik

Teil 3: Grundlagen der Leistungselektronik

Vorlesung (3)

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)

Komponenten der Leistungselektronik

- Moderne Leistungshalbleiter:

- Diode
- Thyristor
- GTO
- IGBT
- MOSFET
- *Treiber für die steuerbaren Halbleiter*

➤ **Aktive Komponenten**

- Widerstände, NTC-Widerstände, Varistoren

- Kondensatoren
- Drosseln
- Transformatoren, Übertrager
- *Filter (EMV, du/dt-, Sinus-Filter)*
- *Messstellen*

➤ **Passive Komponenten**

Leistungshalbleiter lassen sich nach **Art der Ansteuerung** (**Steuerelektrode**) einteilen:

(1) **keine** Steuermöglichkeit über eine **Steuerelektrode**

► Diode

(2) steuerbar **über eine Steuerelektrode**

a) nur einschaltbar (und in eine Richtung durchlässig = unidirektional):

► gesteuerte Hg-Dampfgleichrichter, ► Thyatron,

► Thyristor

b) nur einschaltbar (und in zwei Richtungen durchlässig = bidirektional):

► getriggerte Funkenstrecken, ► Triac

c) ein- und ausschaltbar (und in eine Richtung durchlässig = unidirekt.):

► Crossatron,

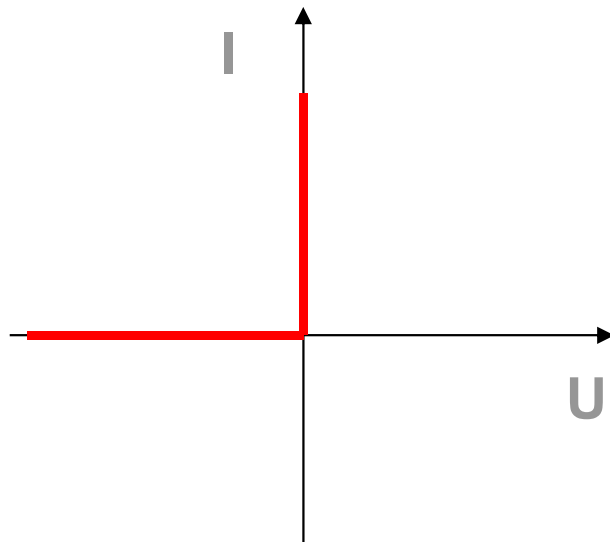
► **Bipolartransistor**, ► **GTO-Thyristor** (gate turn off), ► IGCT (integrated gate commutated thyristor),

► **MOSFET** (metal oxide silicon field effect transistor), ► **IGBT** (insulated gate bipolar transistor)

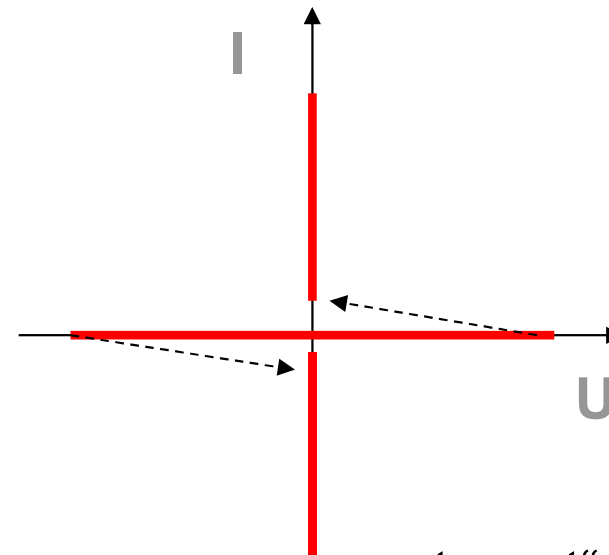
Leistungshalbleiter lassen sich nach Art der Ansteuerung (Spannung, Strom) einteilen:

➔ gesteuert durch angelegte Spannung oder eingepprägten Strom:

- **Gleichrichter-Dioden** (stromgesteuert)
- Funkenstrecken, DIAC, TRANZORB (spannungsgesteuert)

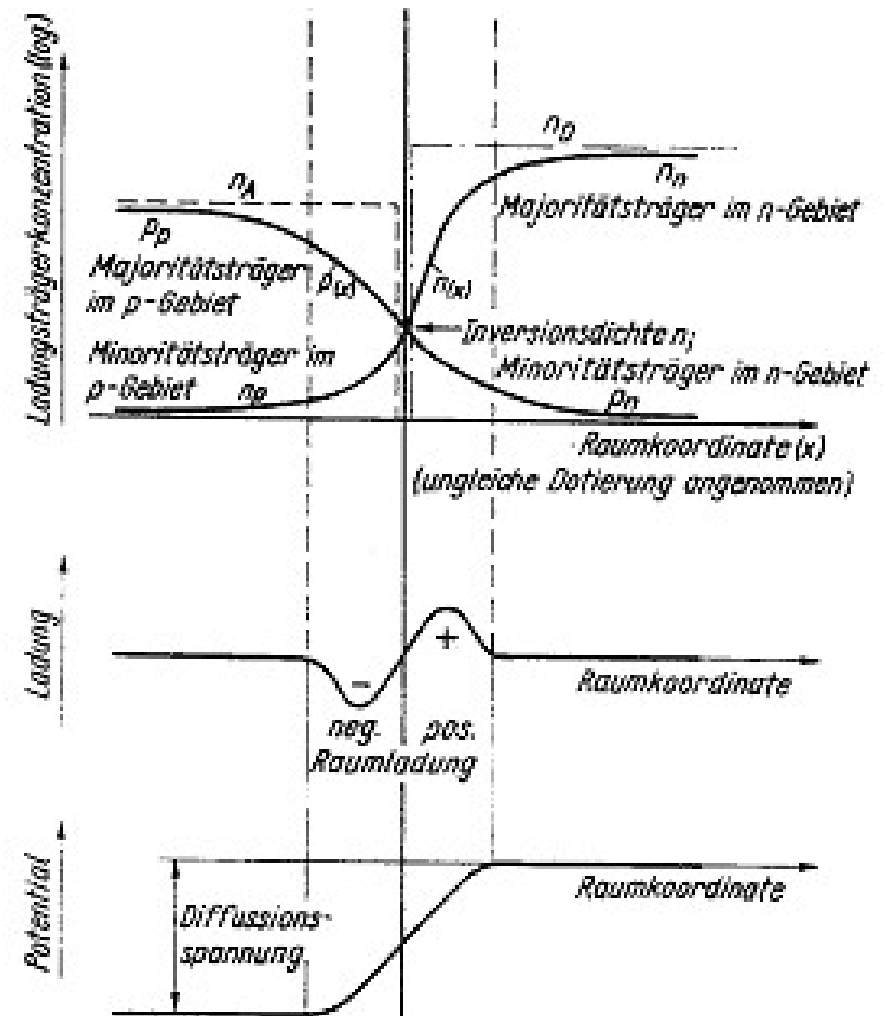
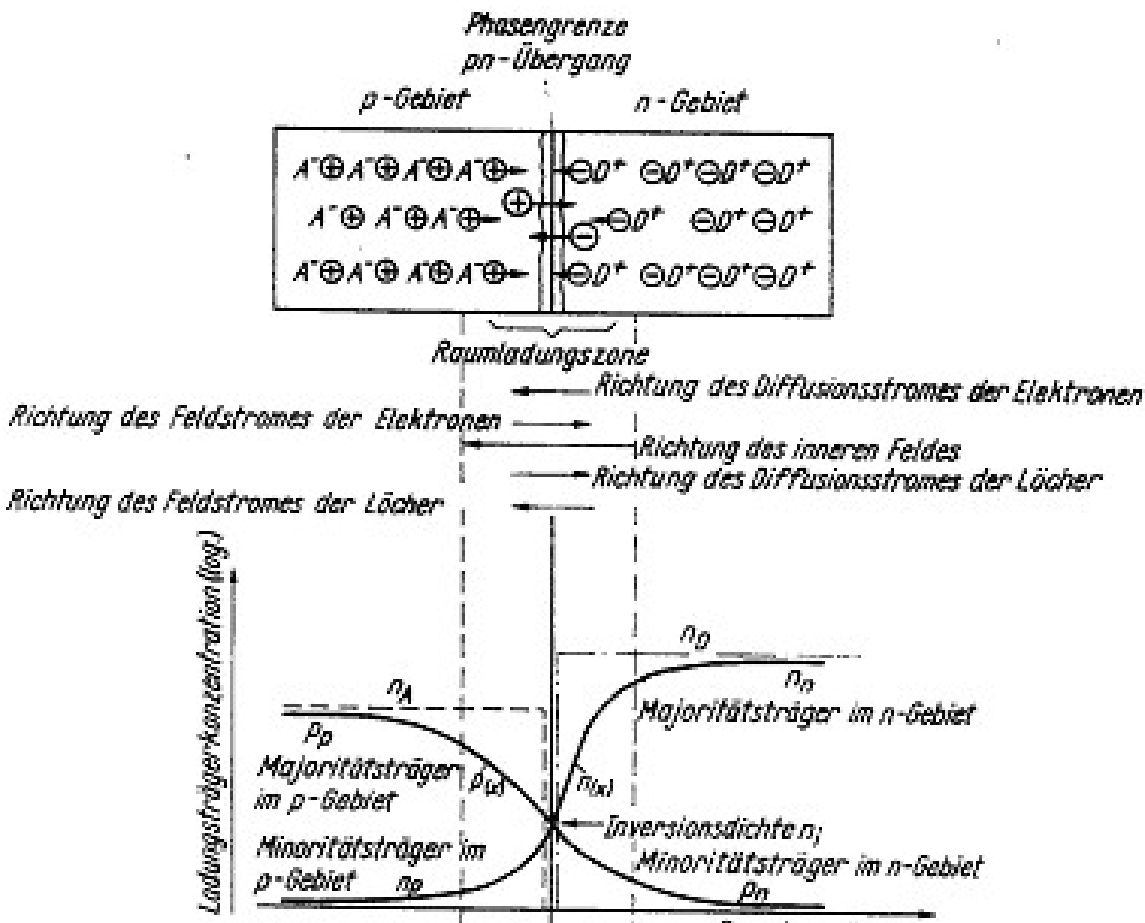


„stromgesteuert“



„spannungsgesteuert“

pn – Übergang ohne angelegte äußere Spannung

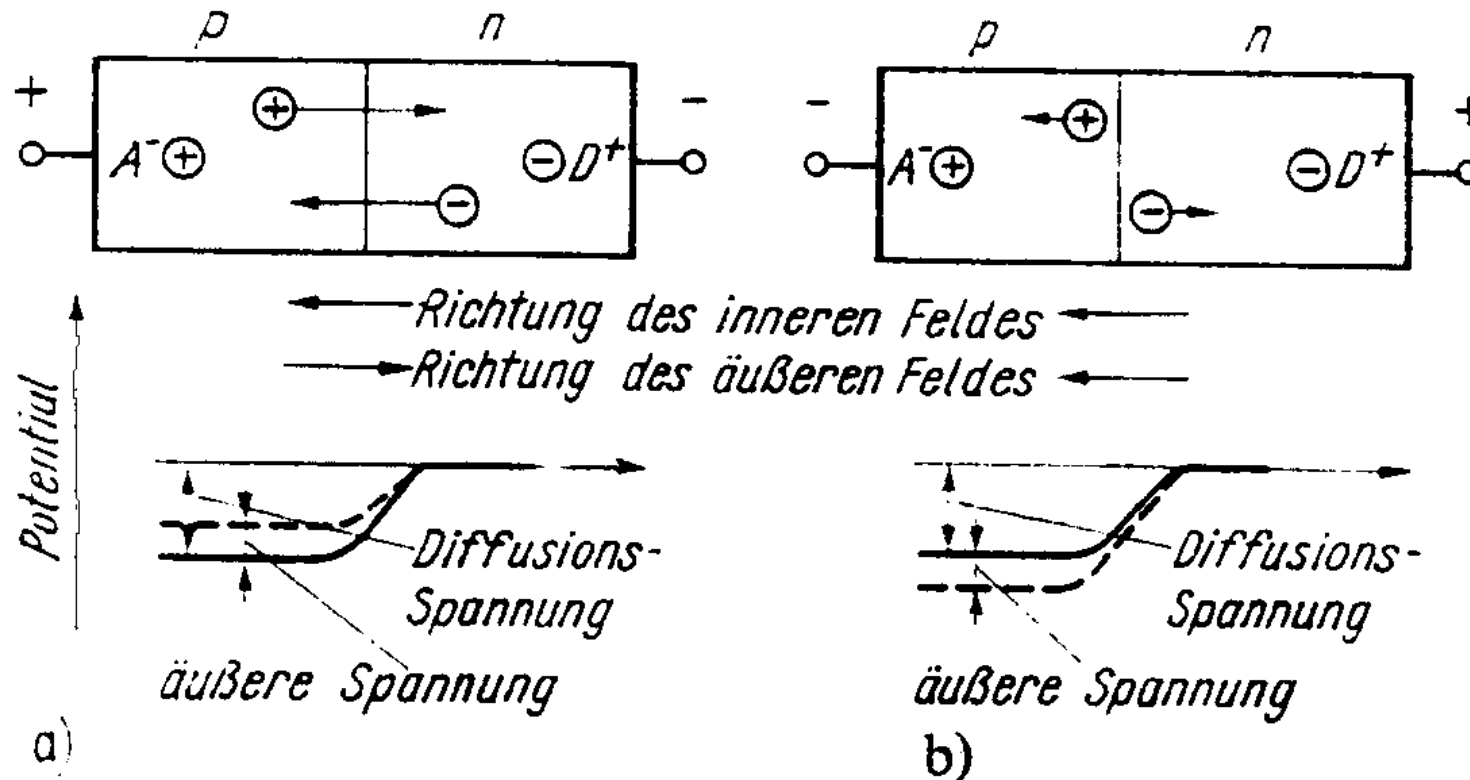


→ beim Ladungstransport, muss eine Potenzialbarriere überwunden werden!

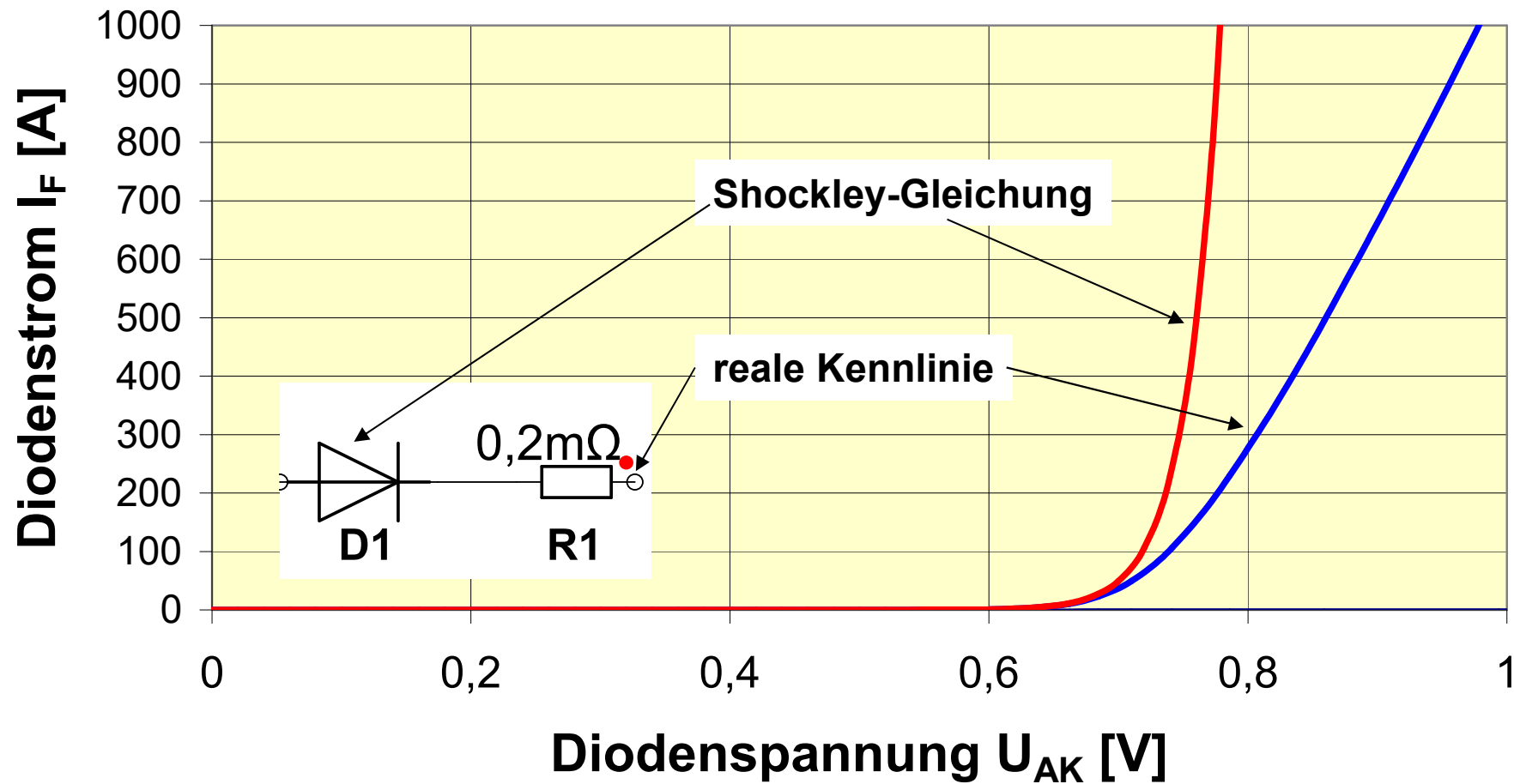
pn – Übergang mit äußerem Feld

(a) Durchlassrichtung

(b) Sperrrichtung

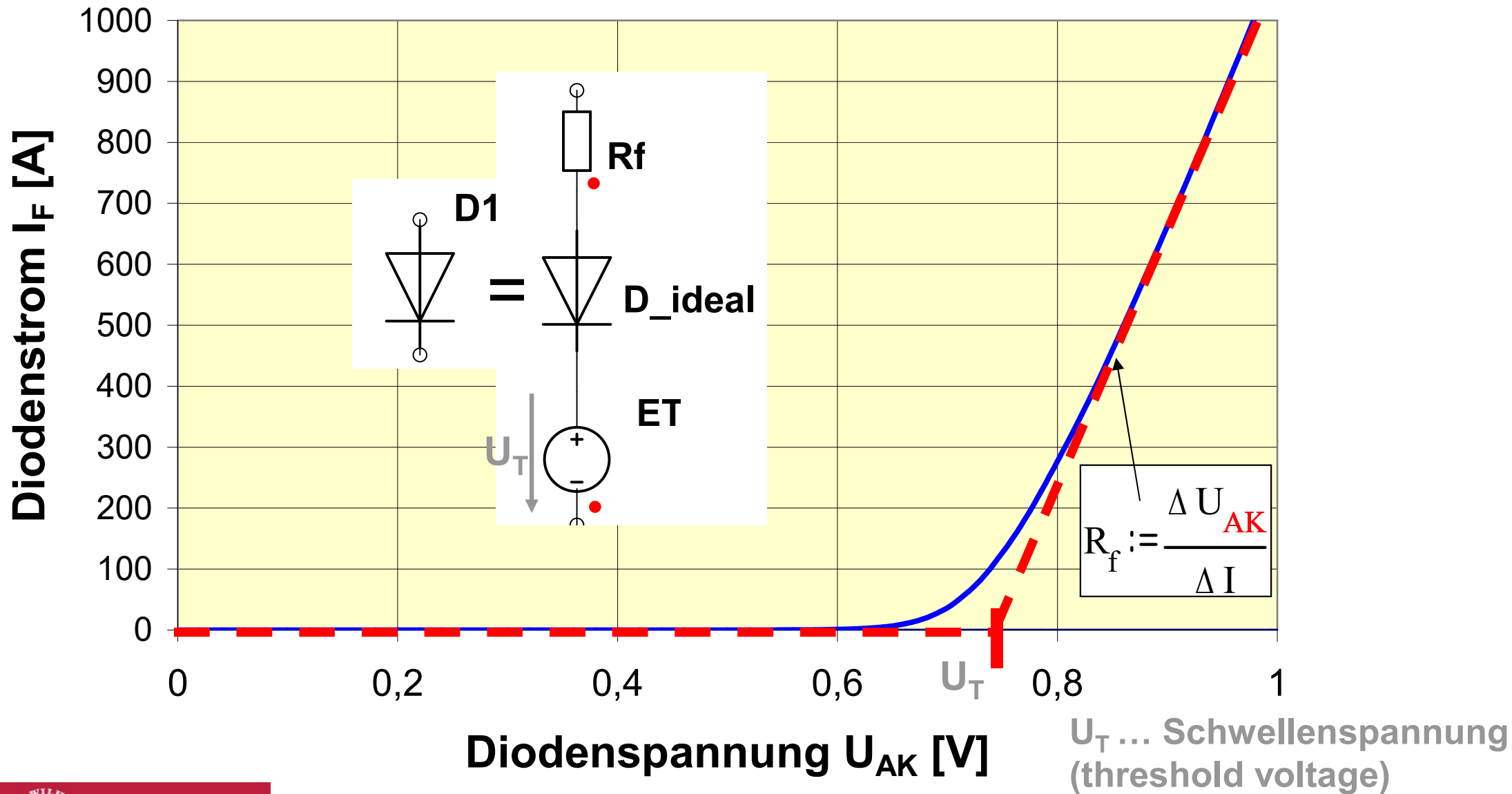


Durchlasskennlinie einer Siliziumdiode

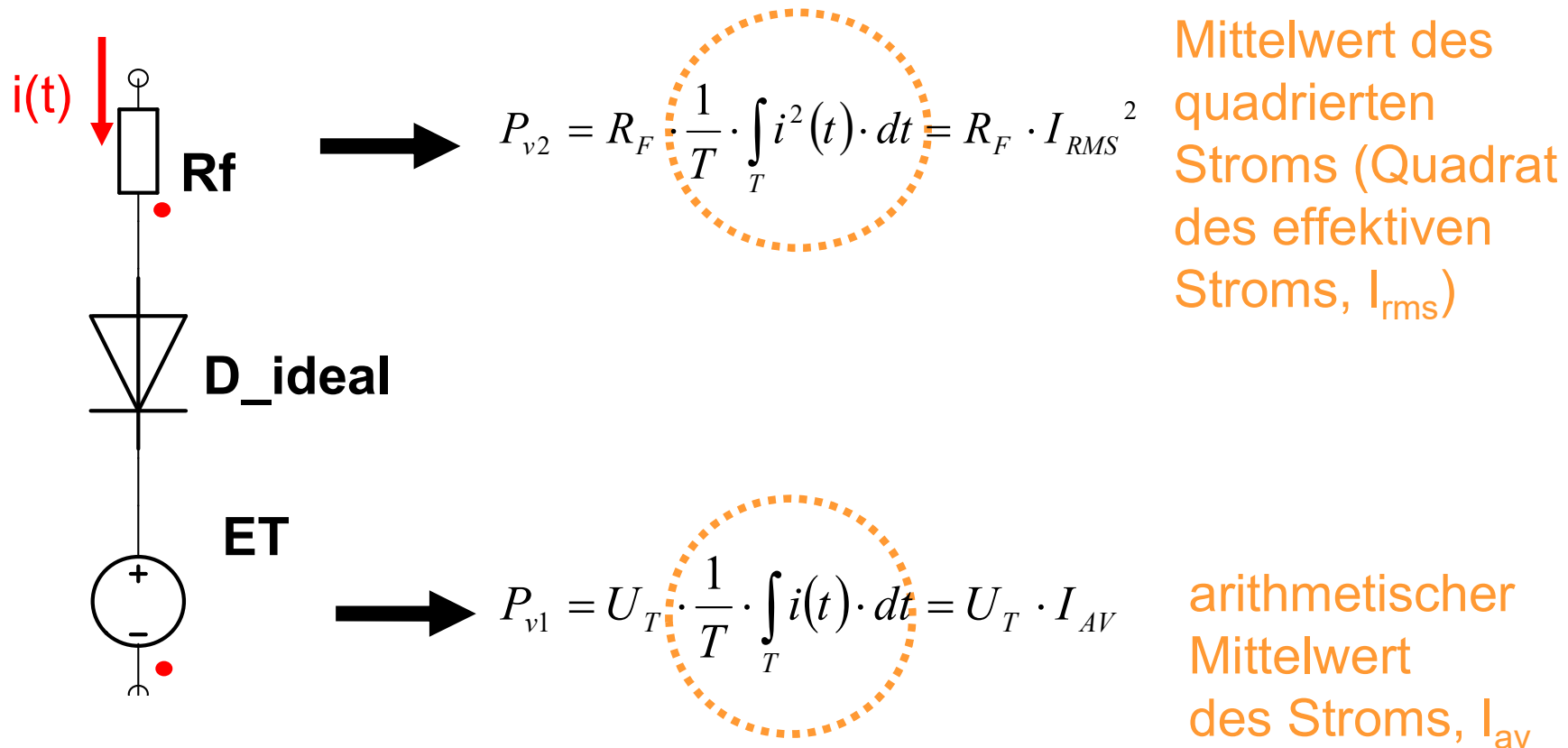


$R_1 = R_F \dots$ Bahnwiderstand

Durchlasskennlinie einer Siliziumdiode



Durchlassverluste



$$\rightarrow P_{Vges} = P_{V1} + P_{V2} = U_T \cdot I_{av} + R_f \cdot I_{rms}^2$$

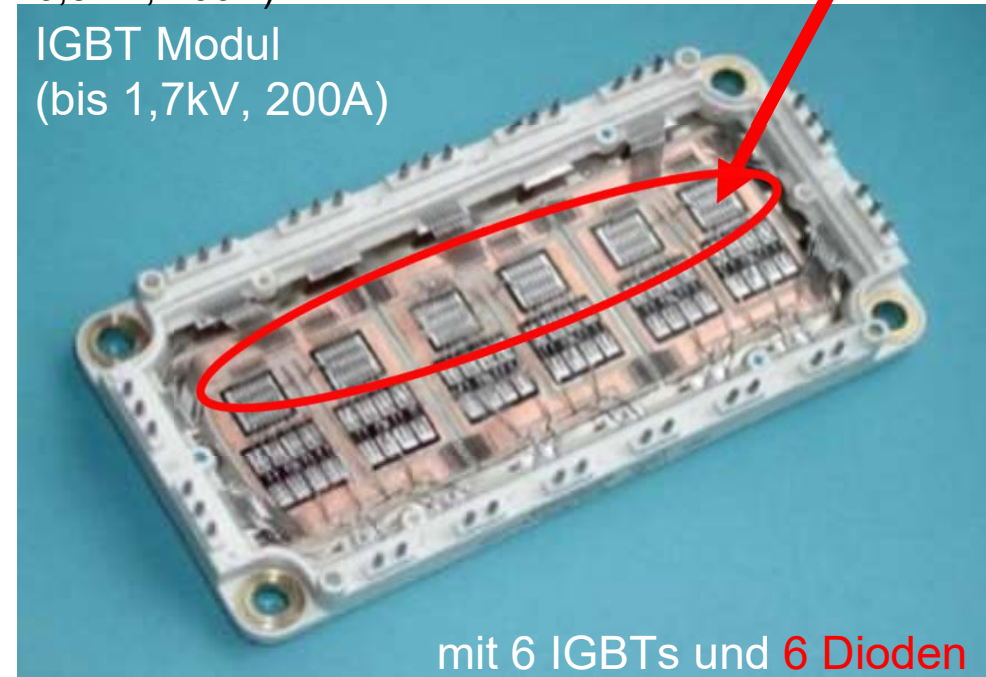
Beispiele für moderne Leistungshalbleiter (eupec/Infineon)

Silizium-Scheibe
(auch: Wafer,
max. Ø heute: 450mm)



Aus den Scheiben prozessierte viereckige Chips für
kleine Leistungen (max. bis. ca. 14 mm x 14 mm /
6,5 kV, 200A)

IGBT Modul
(bis 1,7kV, 200A)



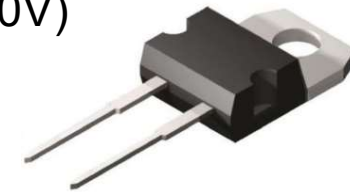
mit 6 IGBTs und 6 Dioden

Thyristor (bis 8kV, 4kA)

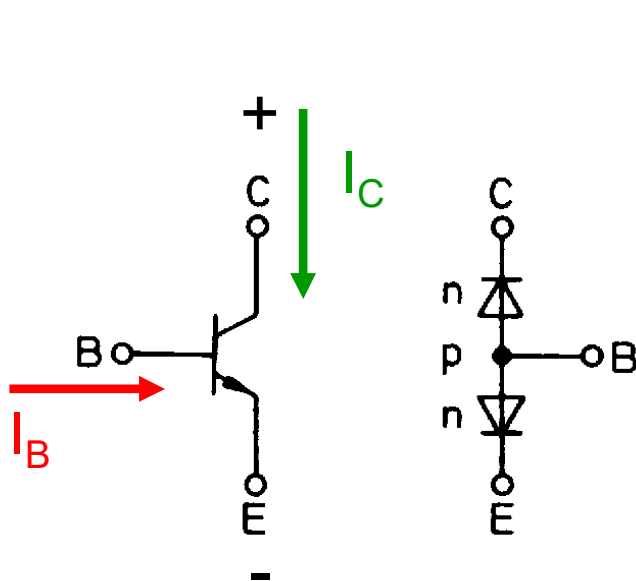


Scheibenzellen für große Leistungen
(Dioden, Thyristoren bis 9kV, 6kA)

Einzel-Diode im TO220-Gehäuse
(Beispiel: 12A, 600V)

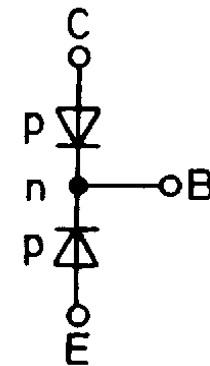
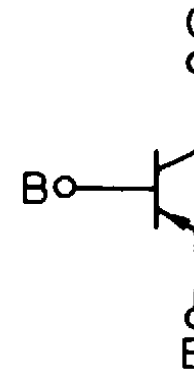
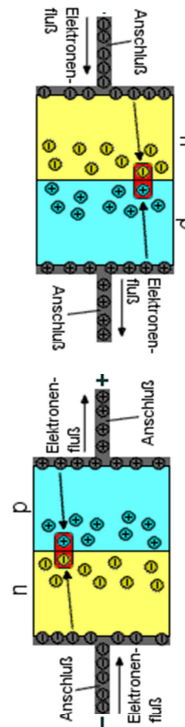


Bipolarer Transistor (BJT, bipolar junction transistor)



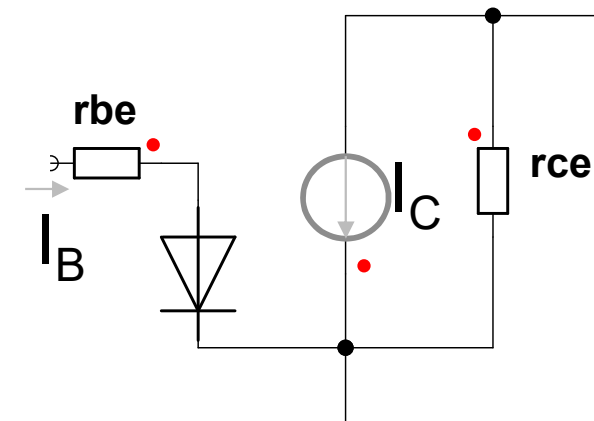
$$I_C = \beta \cdot I_B$$

Leiten

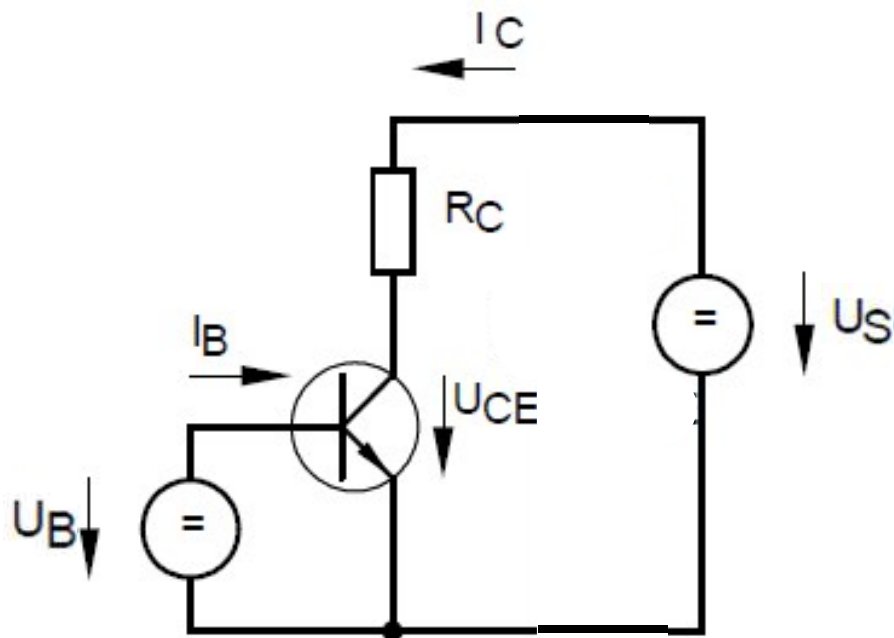


Ersatzschaltbild eines npn-Transistors:

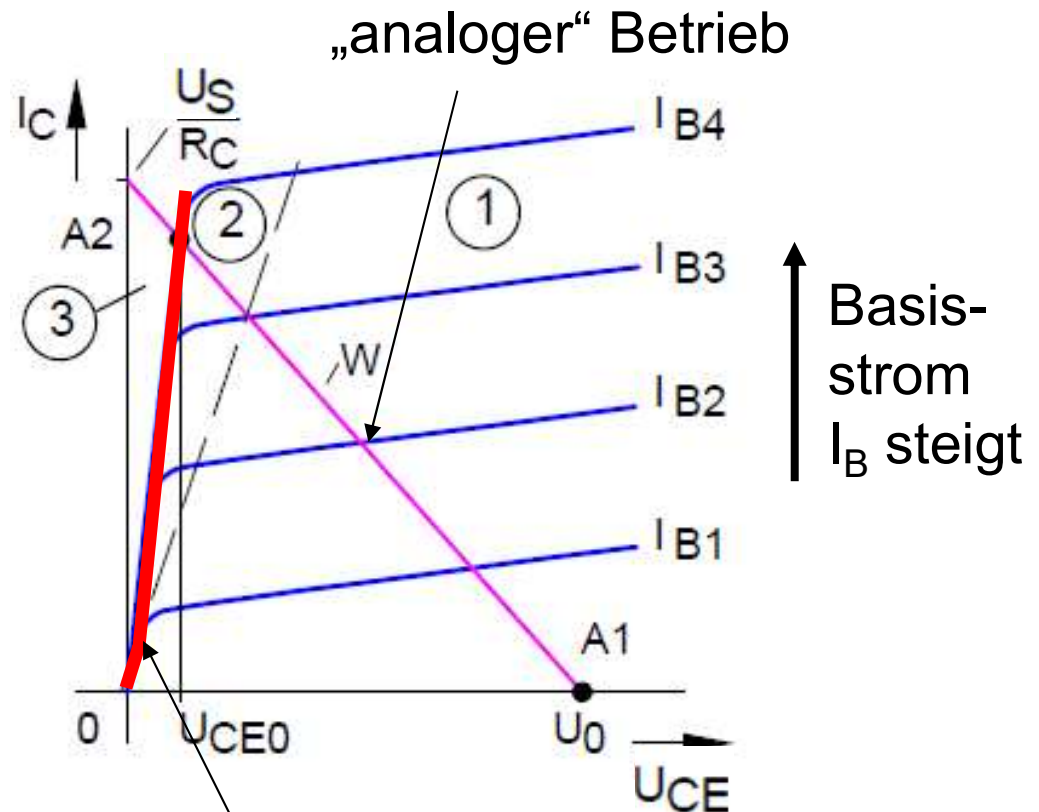
- ➔ Im Schaltbetrieb muss der Basisstrom genügend groß sein, damit der Transistor nicht strombegrenzend **mit hohen Spannungsabfällen** wirkt!



Bipolarer Transistor: Betrieb mit Last und Kennlinien



- (1) Linearer (oder „analoger“) Bereich
- (2) Quasi-Sättigung
- (3) Sättigung



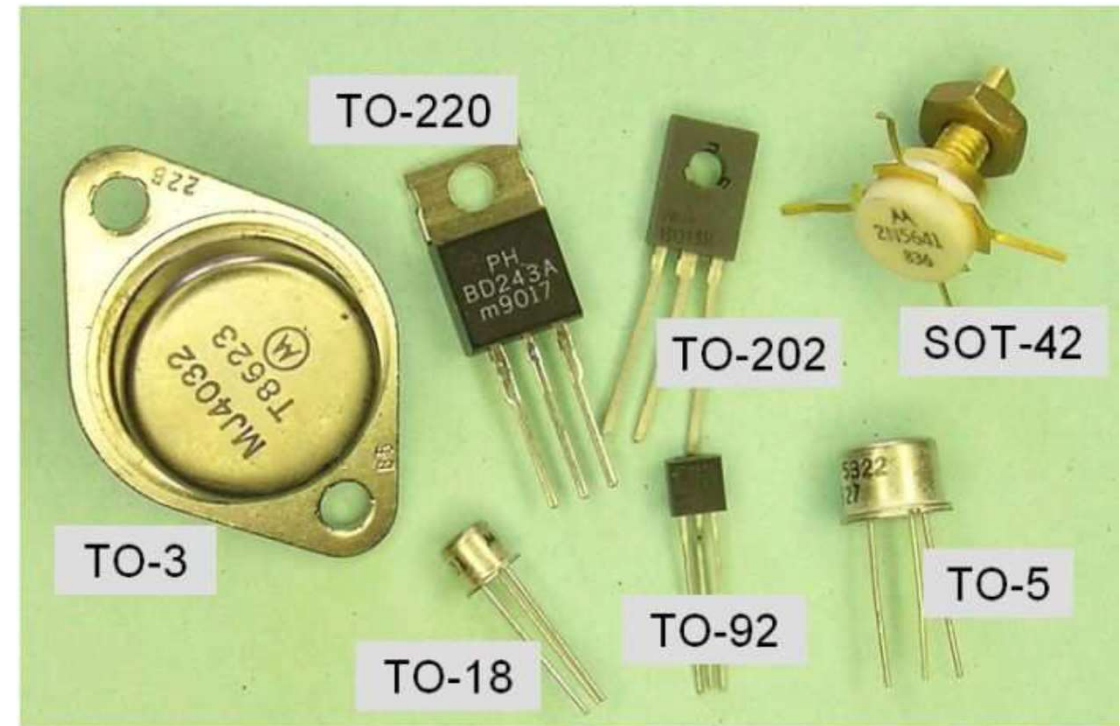
Sättigungsspannung für „Schaltbetrieb“

Stromverstärkung für Leistungstransistoren $I_{cmax} > 5A$:

B = 1...30

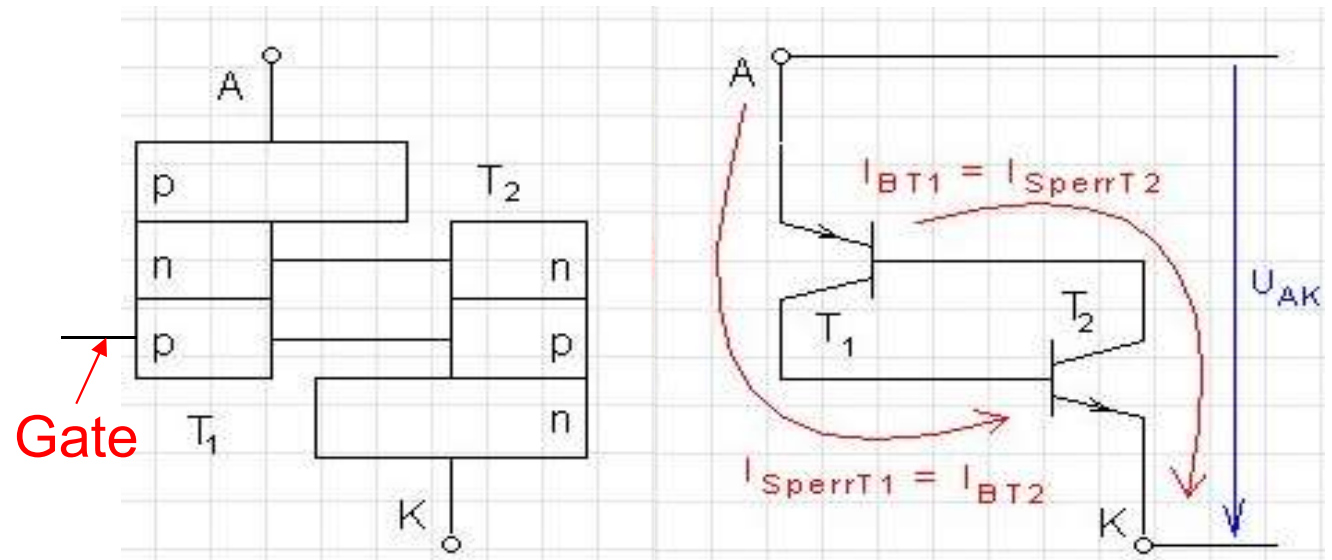
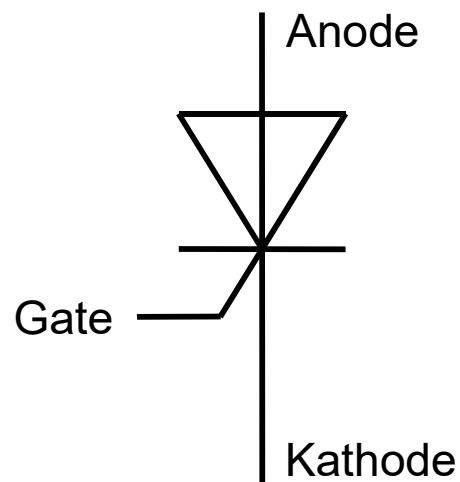
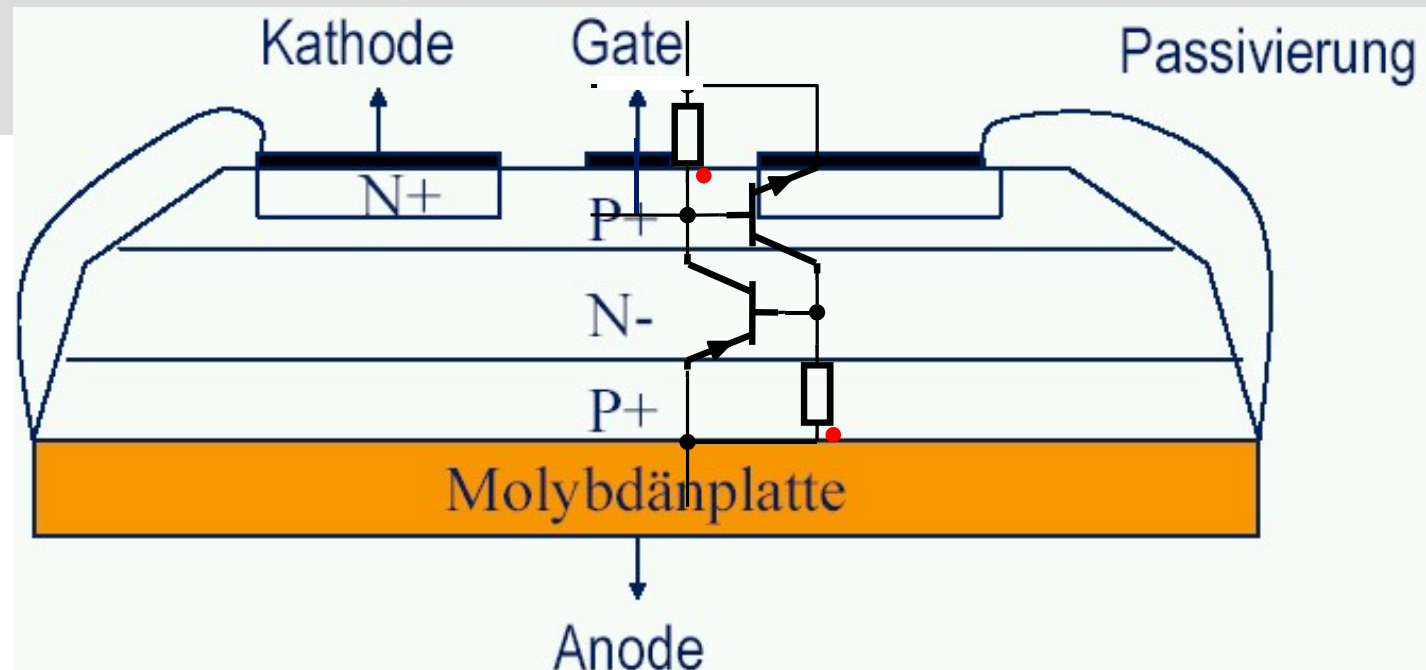
Bipolare Transistoren in der Leistungselektronik

- relativ hohe Ansteuerleistung
- hohe Speicherzeiten durch Sättigung
- geringe Sättigungsspannung (0,3...0,5V pro Transistor)
- empfindlich gegenüber Überströmen
- Einsatz nur noch bei kleineren Spannungen und kleineren Leistungen von bis zu einigen 100W mit weiter fallender Tendenz



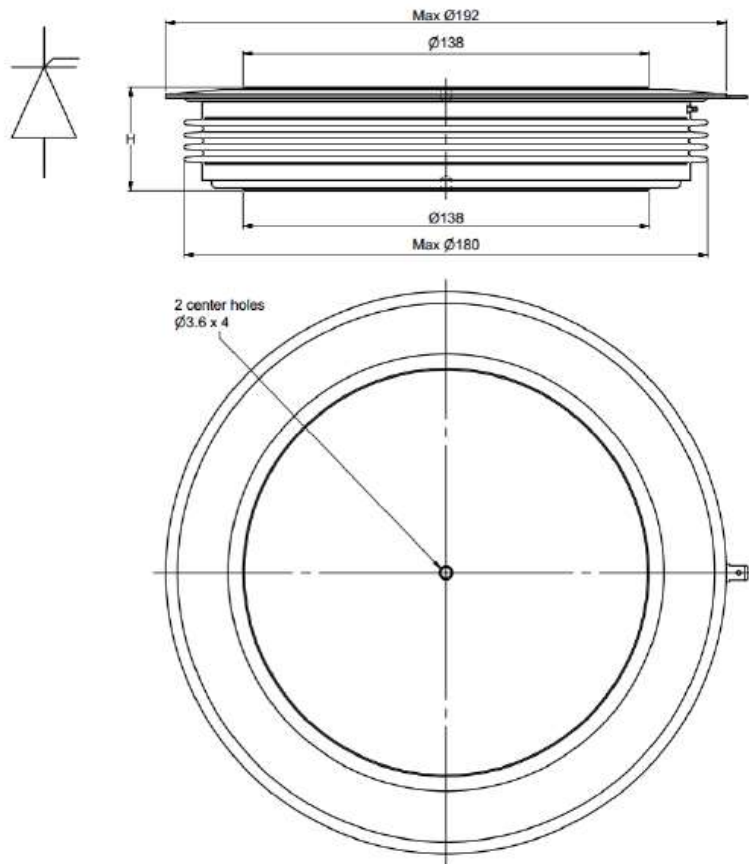
Thyristor:

Ein 4-Schicht-Bauelement



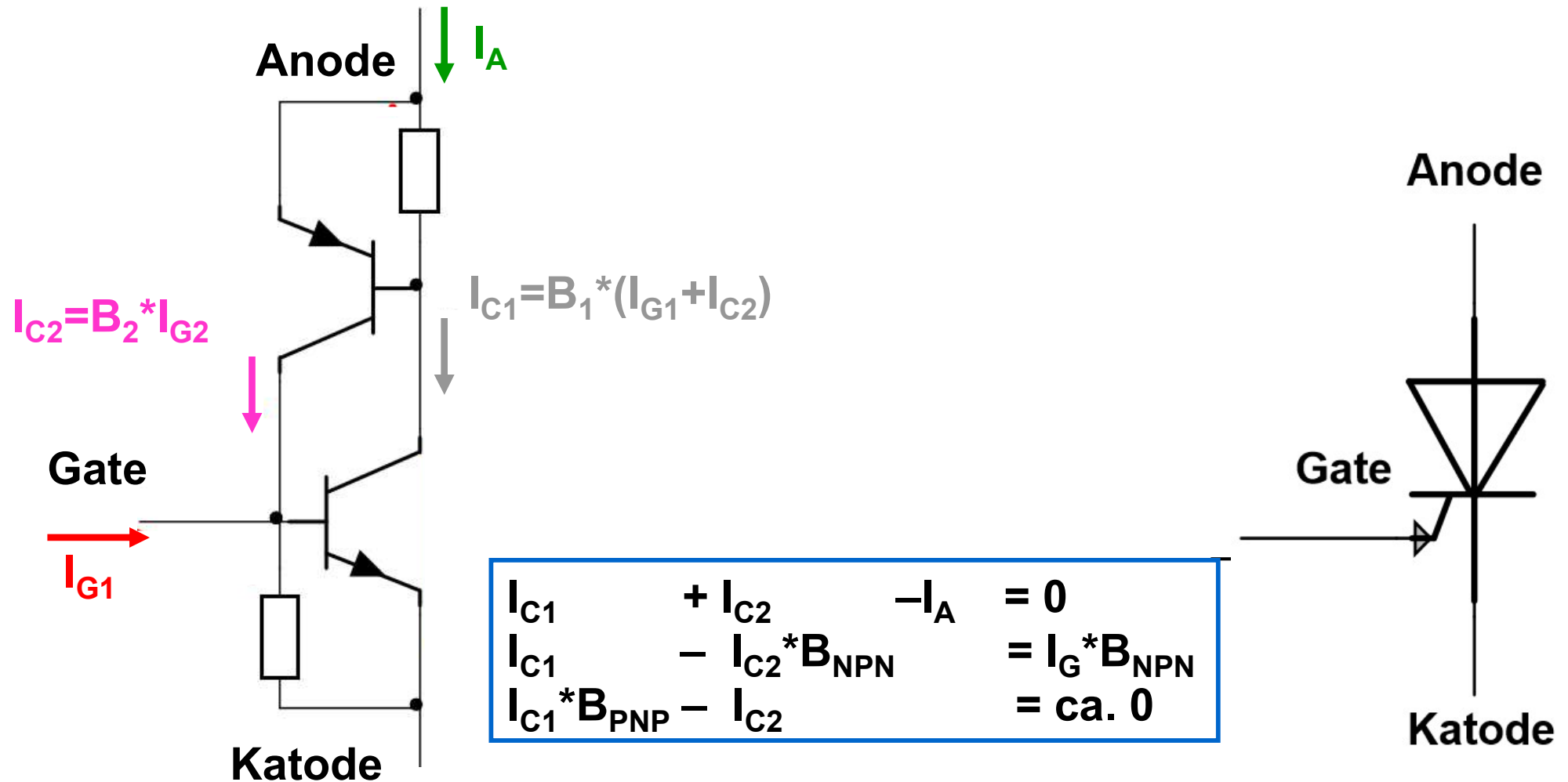
Bauform: Scheibenthyristoren

(für hohe Spannungen bis ca. 8kV und Ströme bis ca. 6kA, bis ca. 180mm Durchmesser)



Quelle: ABB

Der Thyristor

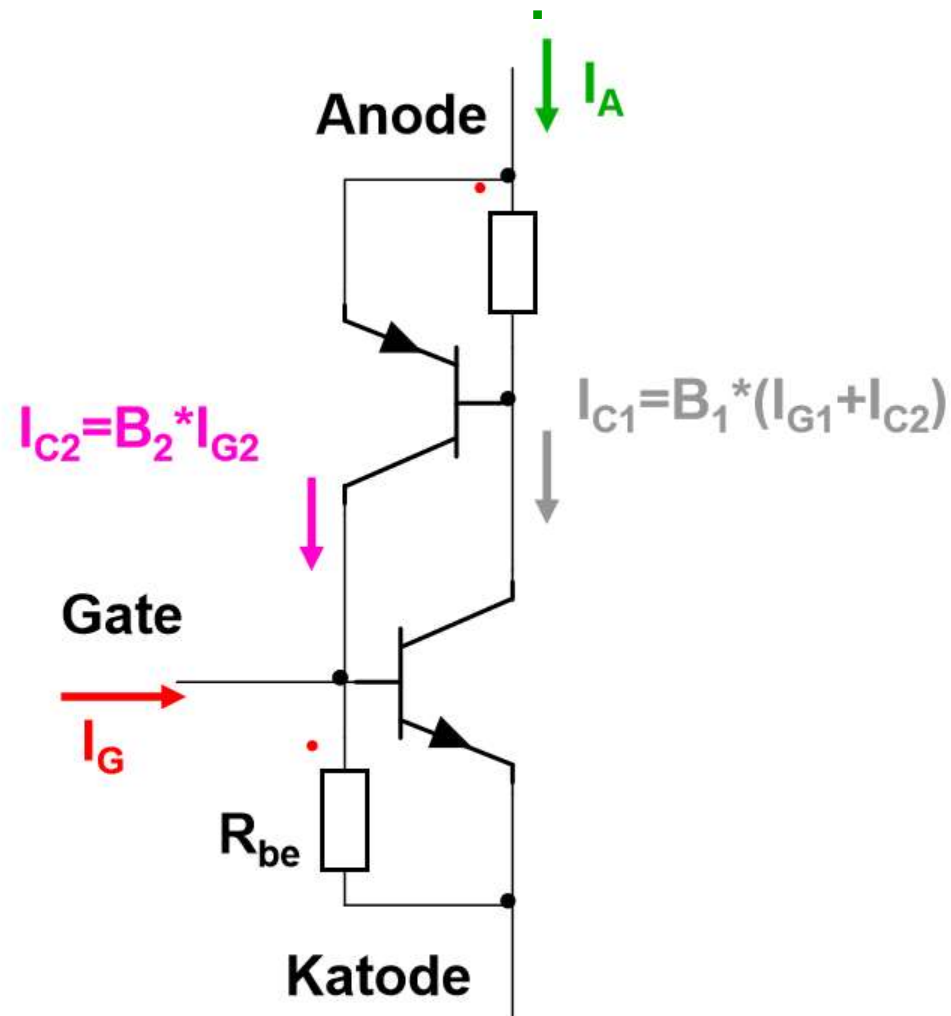


$$\begin{array}{rcl} I_{C1} & + & I_{C2} - I_A = 0 \\ I_{C1} & - & I_{C2} \cdot B_{NPN} = I_G \cdot B_{NPN} \\ I_{C1} \cdot B_{PNP} - I_{C2} & & = \text{ca. } 0 \end{array}$$

$$I_A = I_{G1} \cdot \frac{(B_{NPN} + B_{PNP} \cdot B_{NPN})}{(1 - B_{PNP} \cdot B_{NPN})}$$

→ Für $B_{NPN} \cdot B_{PNP} \geq 1$:
Mitkopplung

Thyristor: Haltestrom

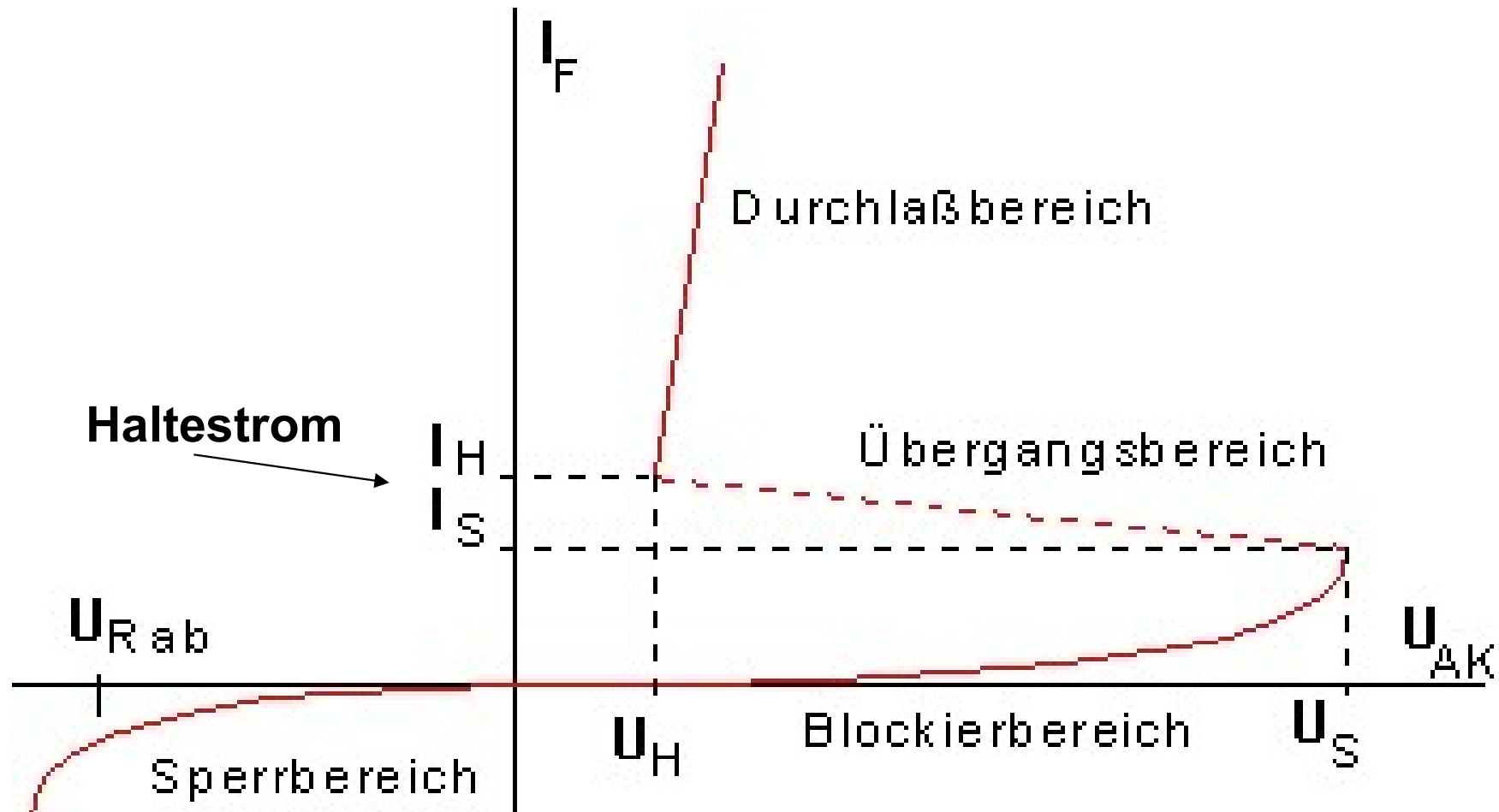


Überschlägige Erfüllung der Bedingung
 $B_{NPN} * B_{PNP} \geq 1$ bei $U_{BE} = 0,7V$

→ minimaler Strom für stabilen
eingeschalteten Zustand:

Haltestrom: $I_H = 0,7V / R_{be}$

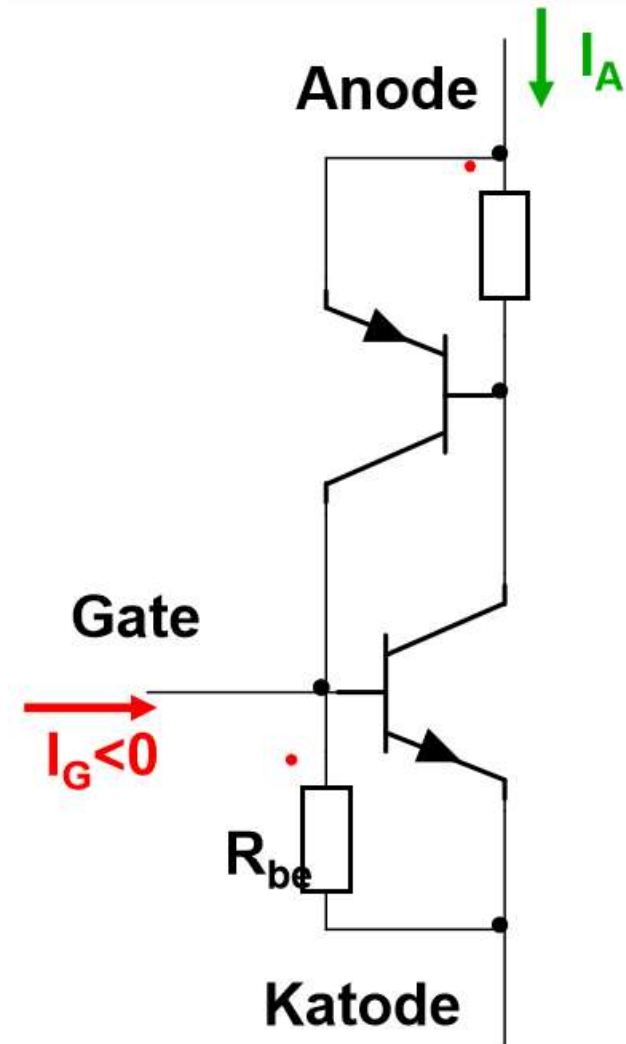
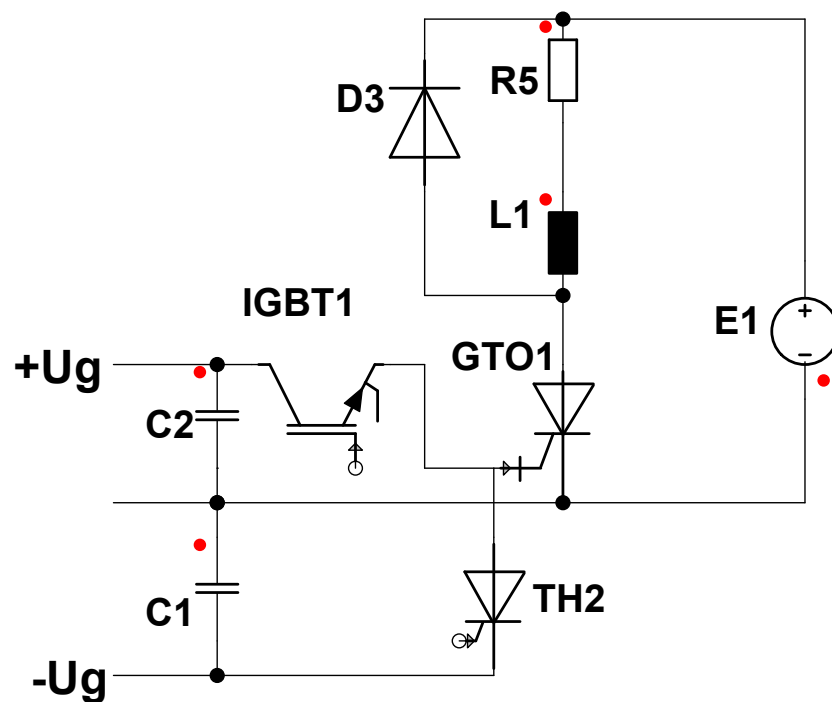
Thyristor: Kennlinie



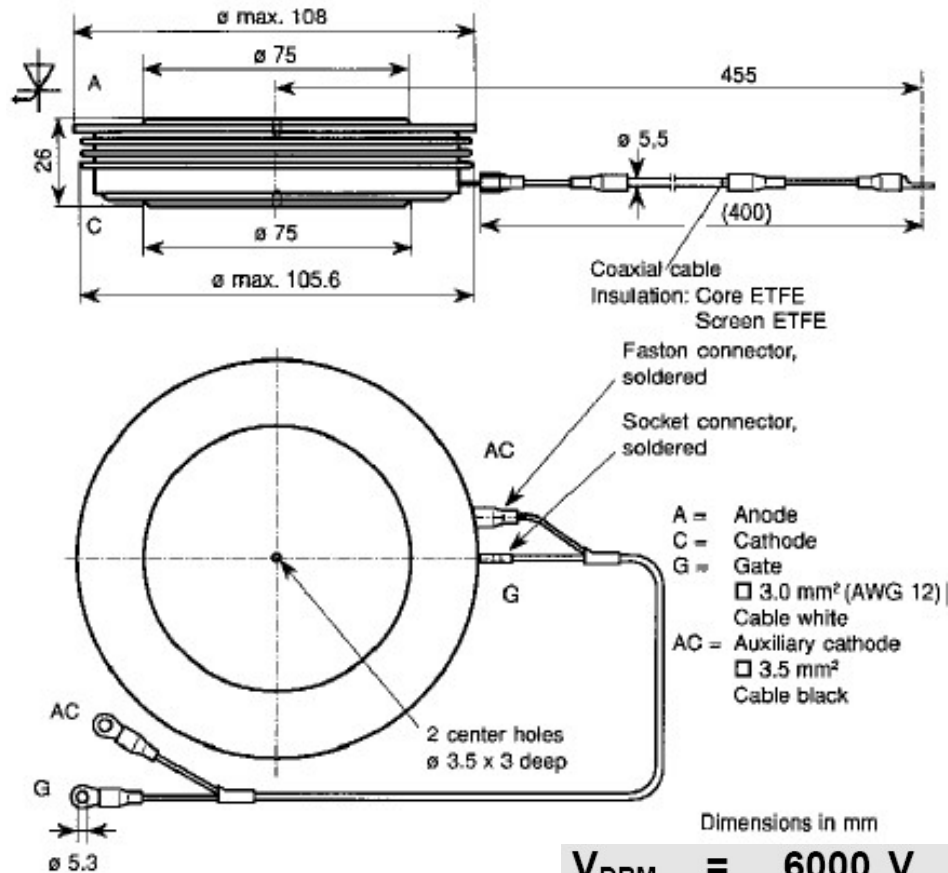
GTO – Thyristor (*Gate Turn Off*)

Aus der Ersatzschaltung ergibt sich auch die Möglichkeit des Abschaltens bei $I_G = -I_A$

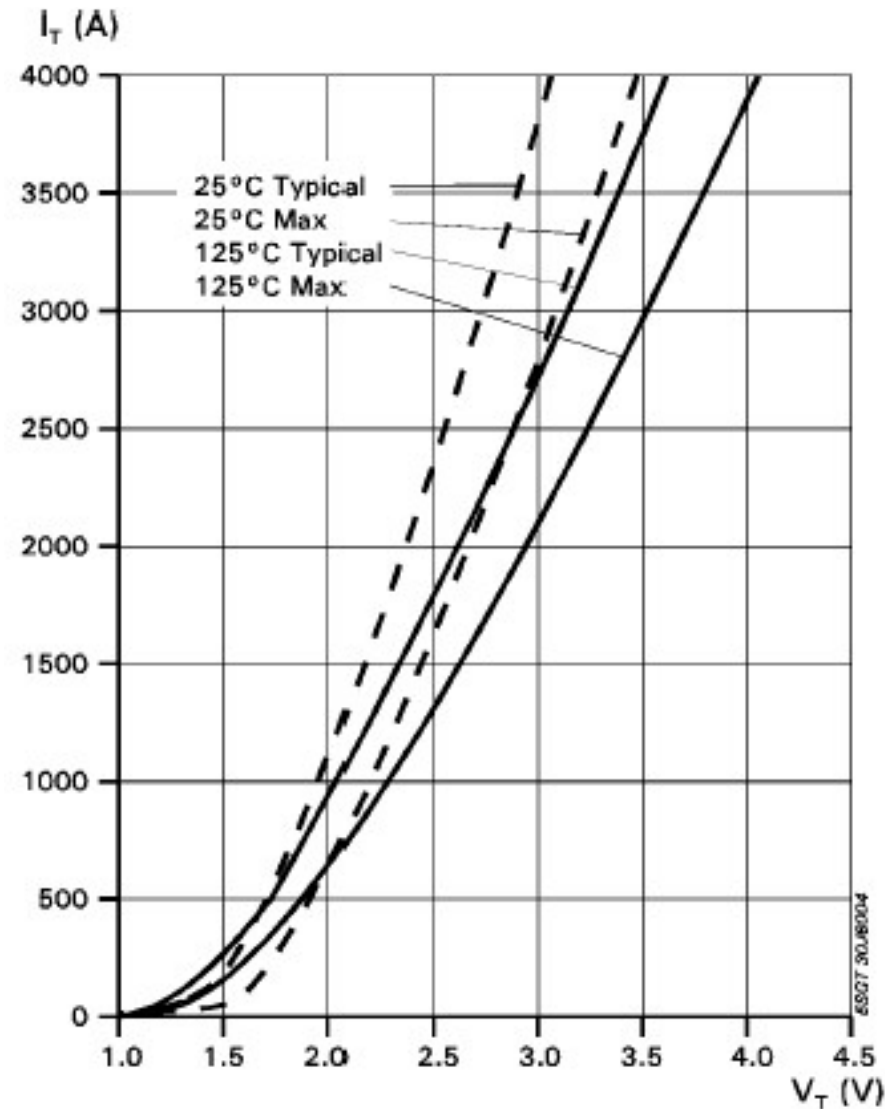
→ Erfordert eine feine Gatestruktur zum Erreichen der gesamten aktiven Fläche



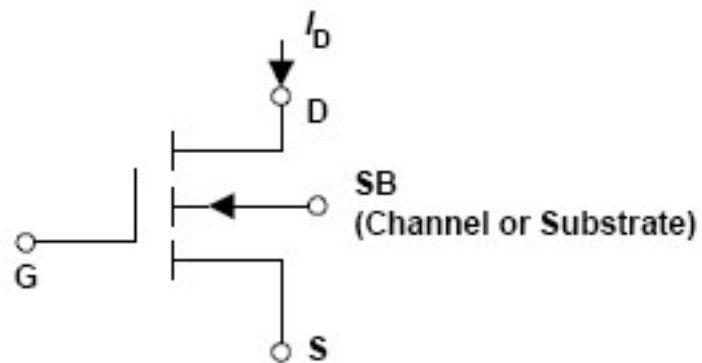
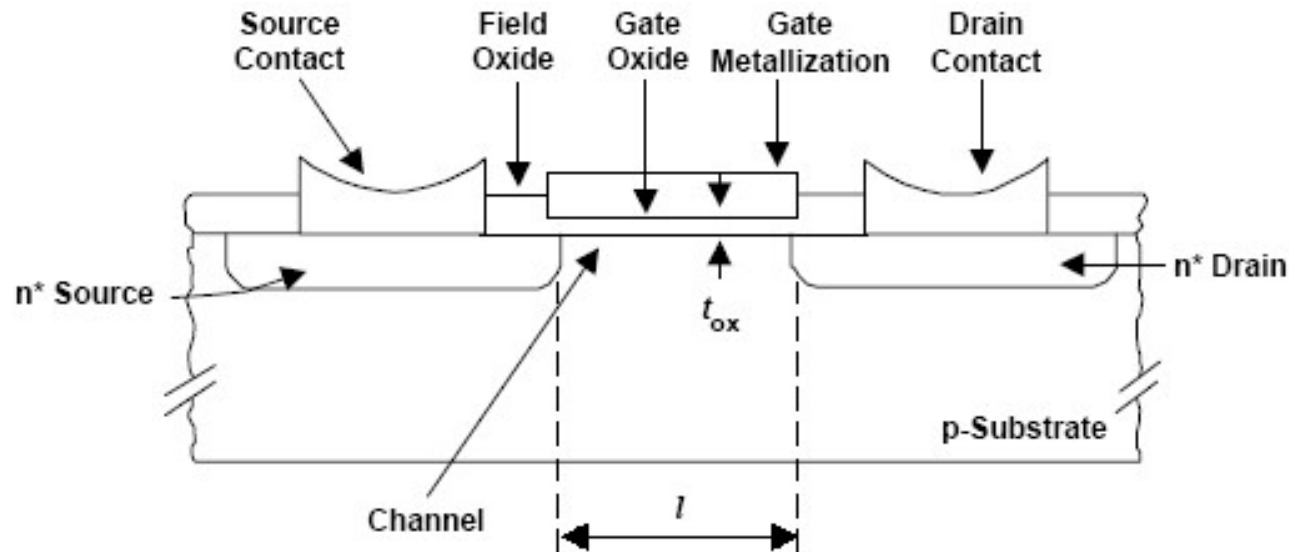
GTO – Thyristor, ABB



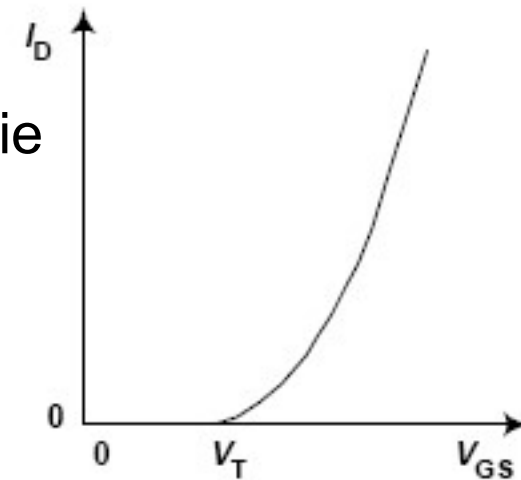
5SGT 30J6004



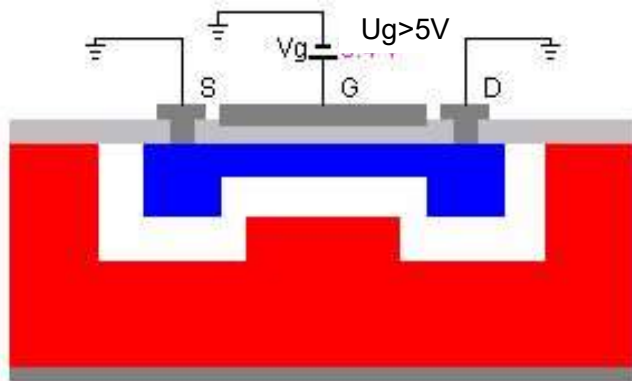
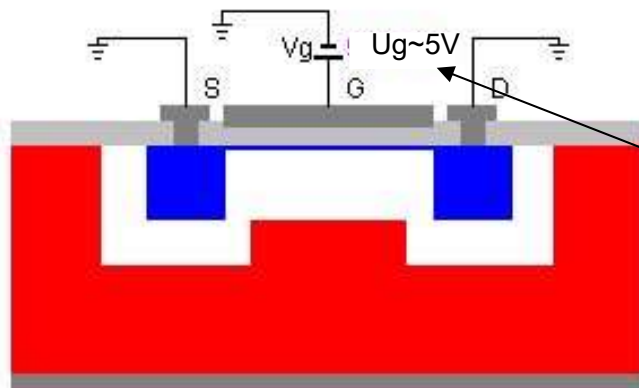
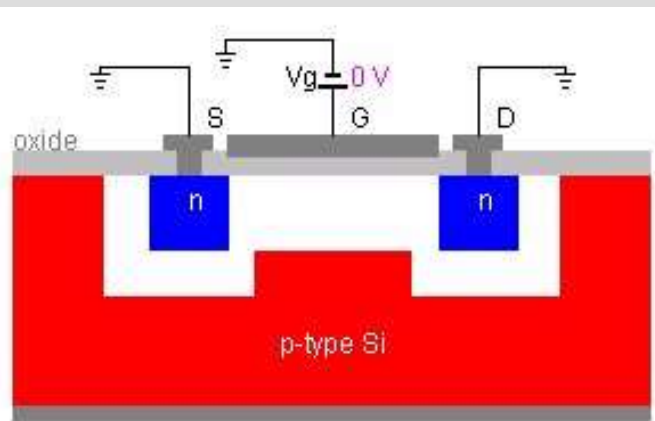
MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)



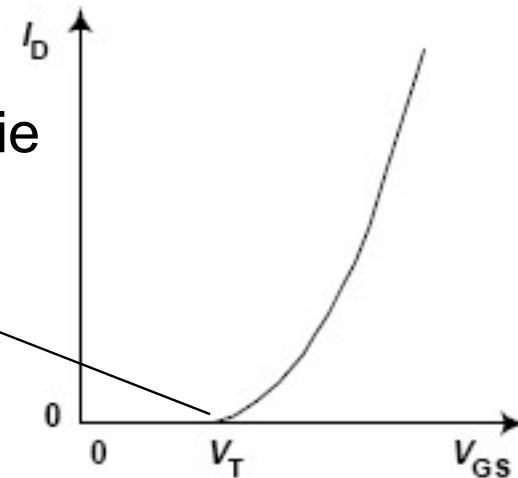
Steuerkennlinie



Ausbildung eines leitfähigen Kanals beim MOSFET



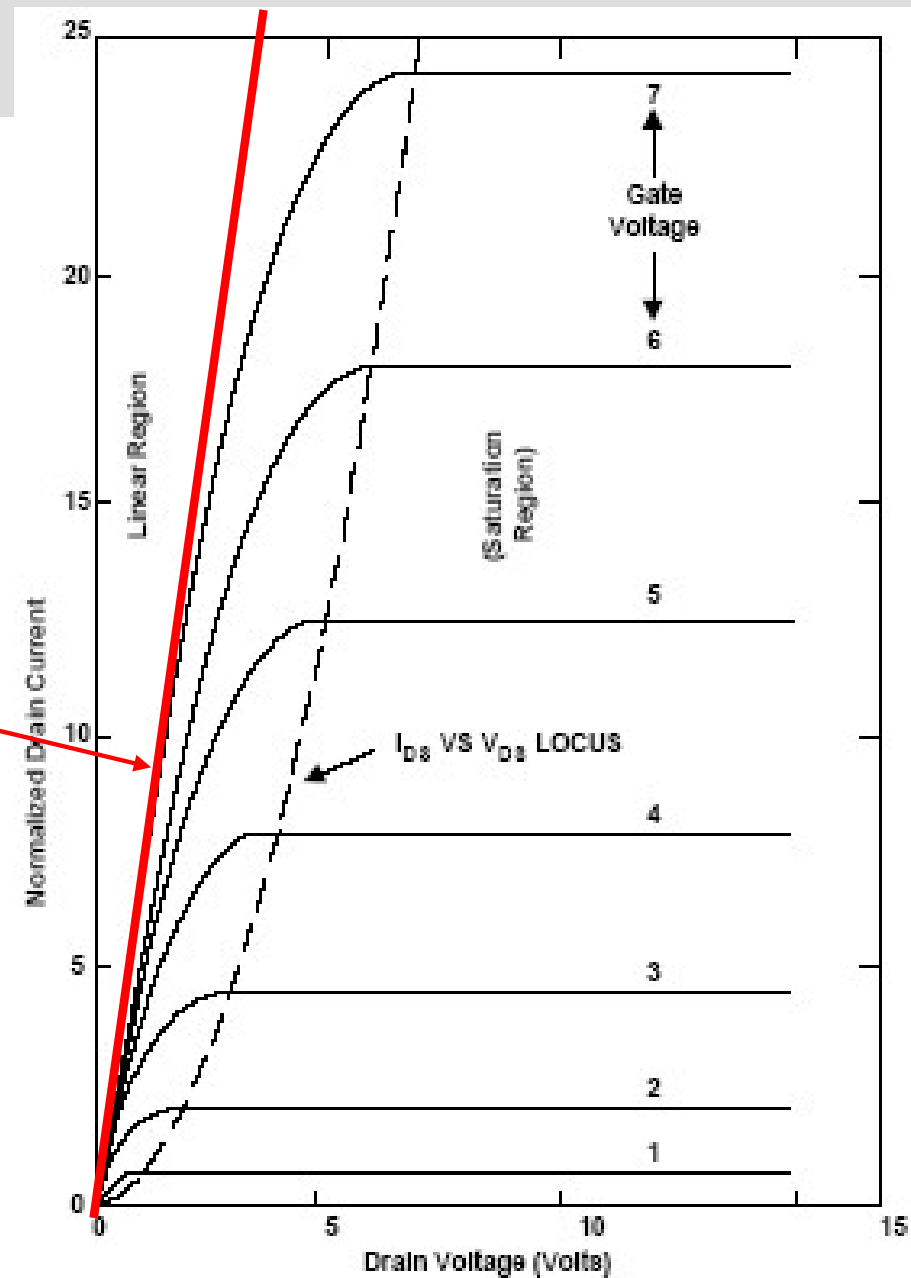
Steuerkennlinie



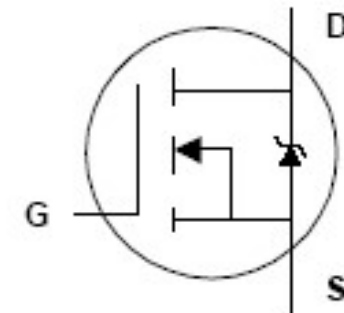
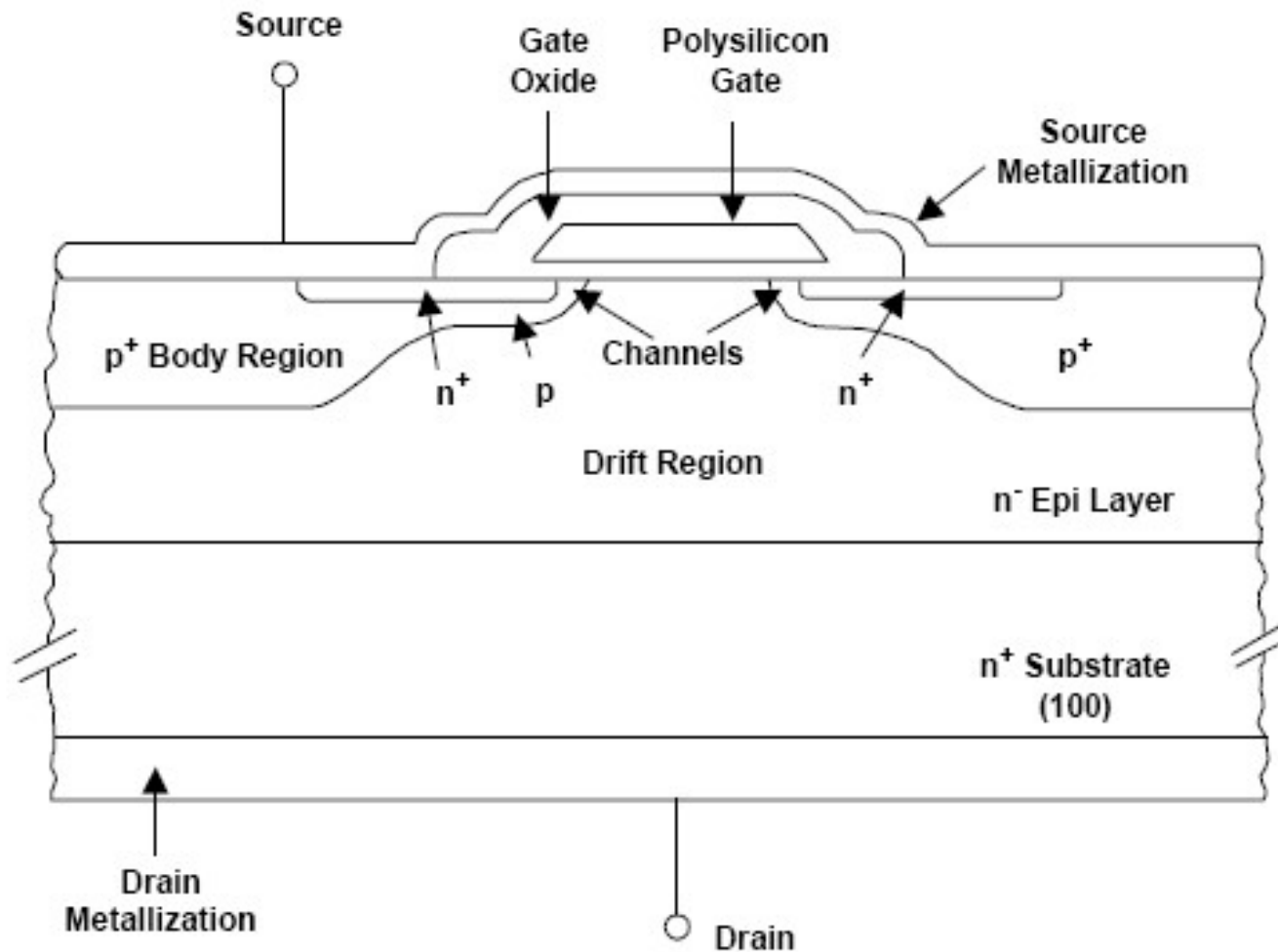
➔ der Strom durchfließt nur Bereiche eines Trägertyps

Ausgangskennlinie eines MOSFET

MOSFET's verhalten sich im eingeschalteten Zustand wie Widerstände!



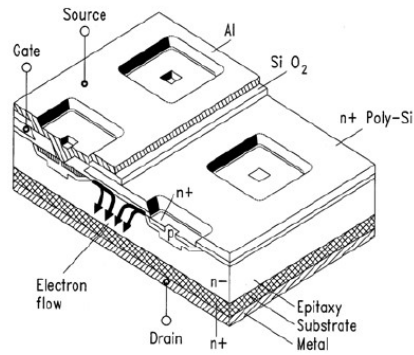
Vertikale Struktur eines n-Kanal-Leistungs-MOSFET's



Eigenschaften von MOSFETs

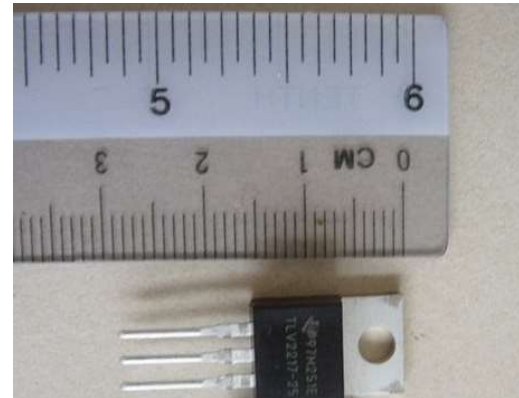
- Im **Durchlass** ist der MOSFET durch eine Widerstandscharakteristik bestimmt. Der Durchlasswiderstand R_{DSon} bestimmt den Spannungsabfall und damit die Verluste des MOSFETs.
- Die **Steuerung erfolgt stromlos**. Die Spannung U_{GE} zwischen Gate und Emitter ist im statischen Betrieb konstant und es fließt nahezu kein Strom über die Gate-Emitter-Strecke.
- Der MOSFET zeichnet sich durch - im Vergleich zu Bipolartransistoren und IGBTs - **sehr geringe Schaltzeiten** und **geringe Schaltverluste** aus.
- Der MOSFET besitzt strukturell bedingt eine **inhärente Diode**.
- (Silizium-)MOSFETs sind verfügbar für einen breiten Leistungsbereich bis zu maximalen Sperrspannungen von ca. 1.000V. Dies ist geringer als bei Bipolartransistoren und IGBTs.
- MOSFETs werden **eingesetzt** in selbstgeführten Schaltungen und sind die heute üblichen Leistungsschalter, z.B. in Schaltnetzteilen, Batterieladegeräten, Wechselrichtern bzw. Umrichter kleinerer Leistung.

Ausführungsbeispiel

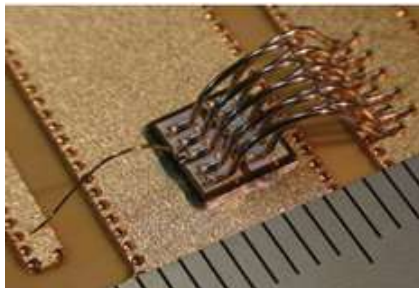


Planare, vertikale MOSFET-Struktur – Schnitt durch einen Chip

source: R. Bayerer, Infineon

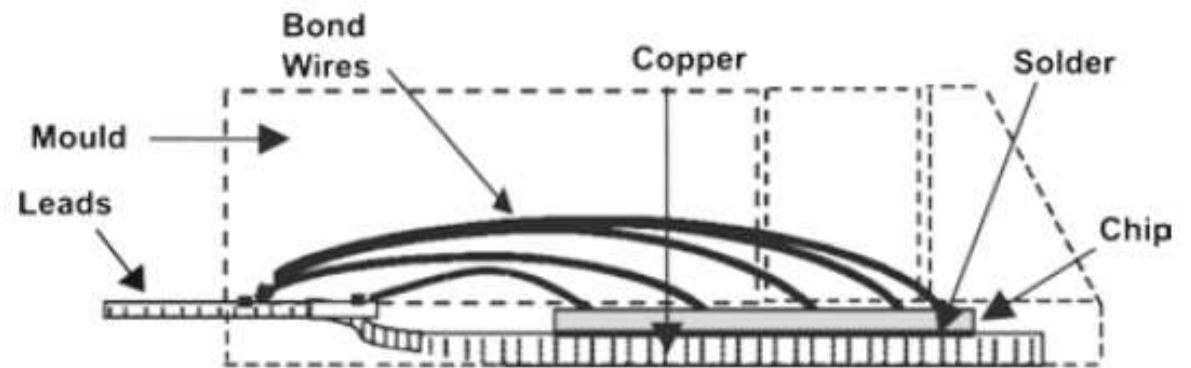


TO 220 – Gehäuse



SiC – MOSFET (Chip)

source: Rohm



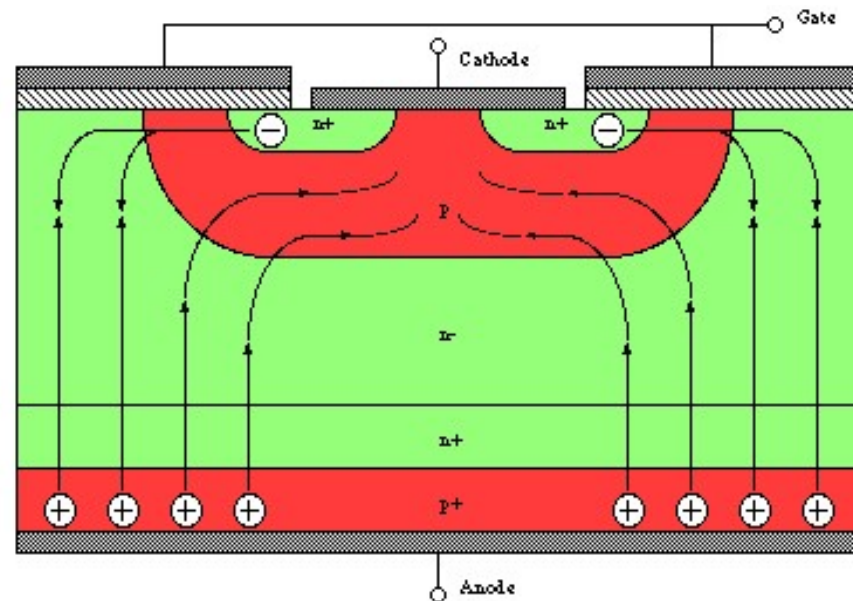
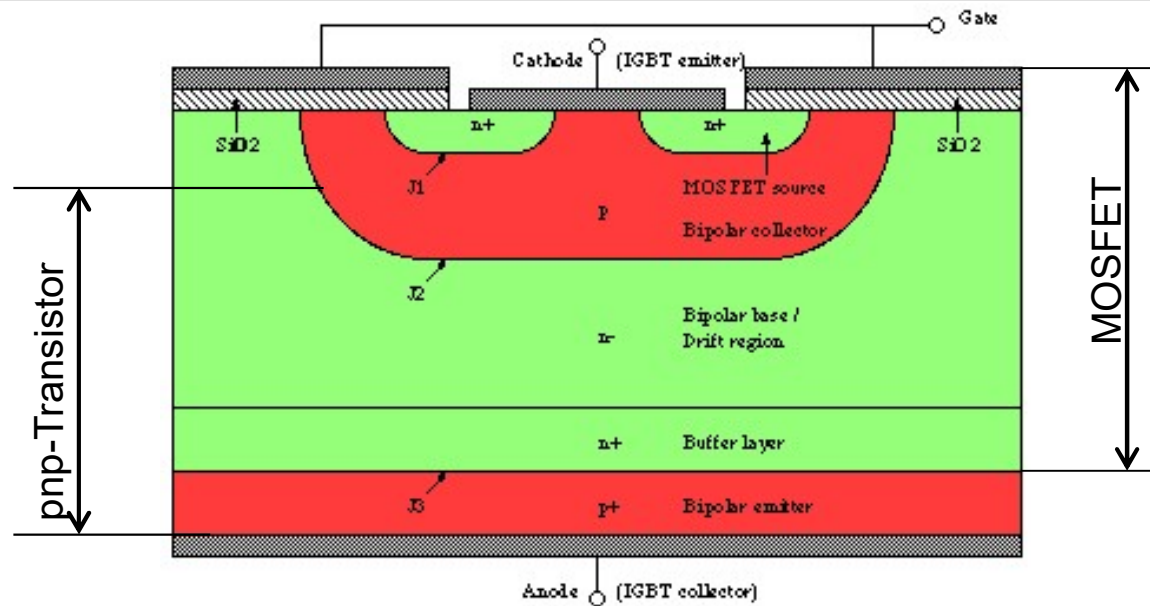
source: Josef Lutz

IGBT

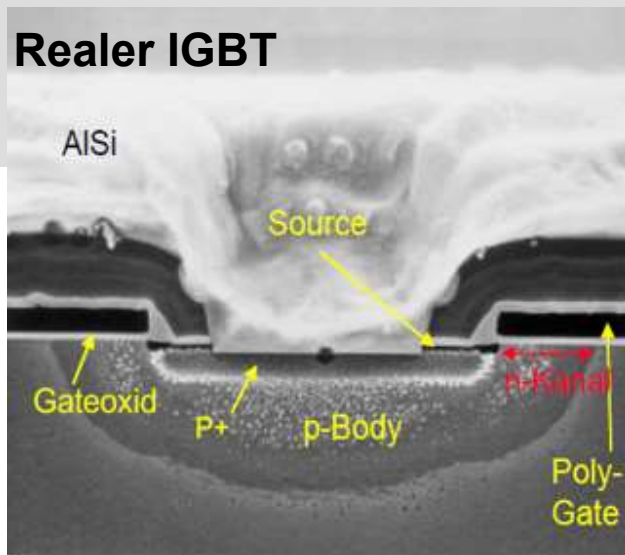
Insulated Gate Bipolar Transistor

→ Feldgesteuertes Bauelement mit bipolarer Struktur

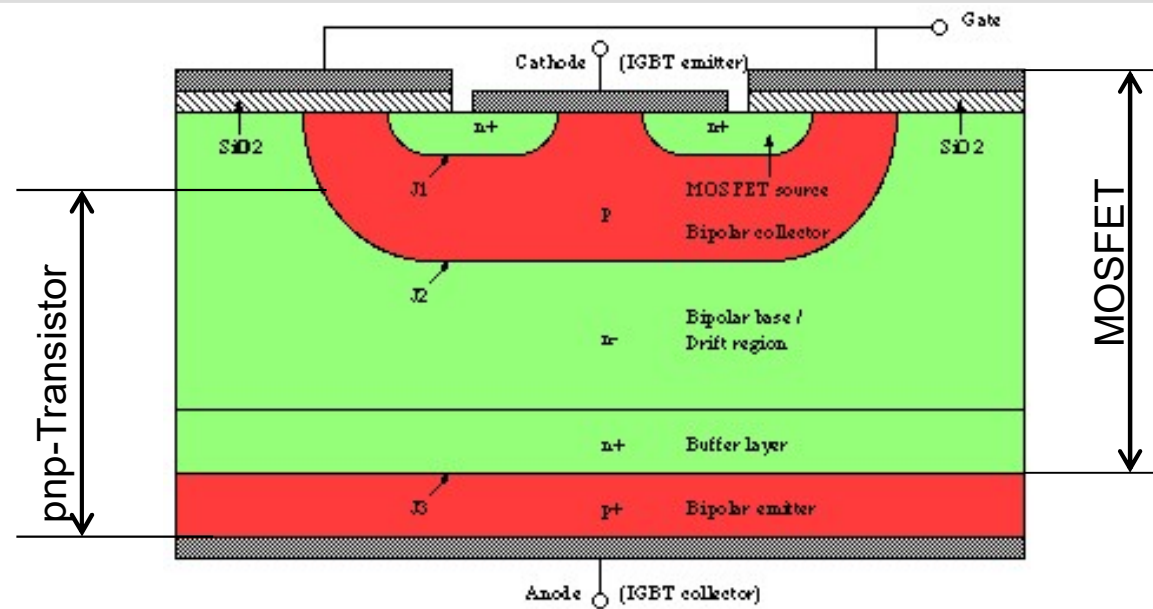
→ Strom von Elektronen und Löcher



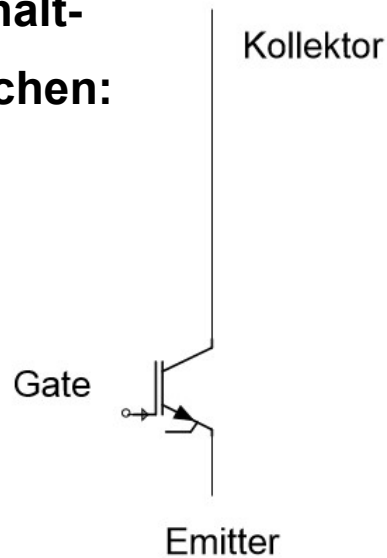
Realer IGBT



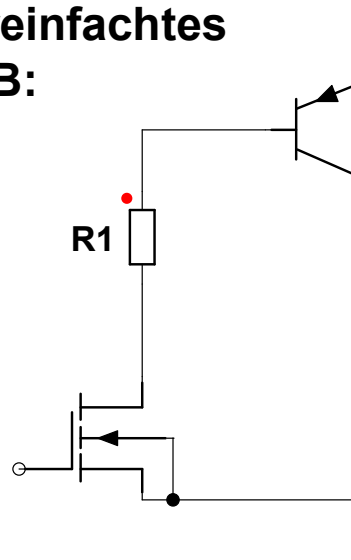
n-Source-Breite ca. 1,5 μm , p-Body-Breite ca. 7 μm



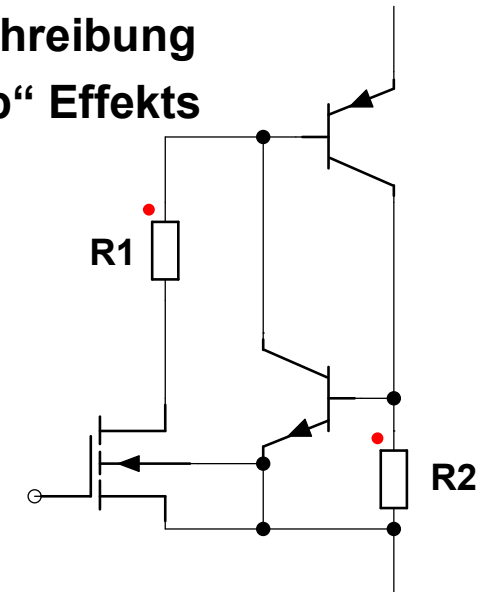
Schalt- zeichen:



Vereinfachtes ESB:



ESB zur Beschreibung des „Latch Up“ Effekts



Ausgangskennlinie eines IGBT

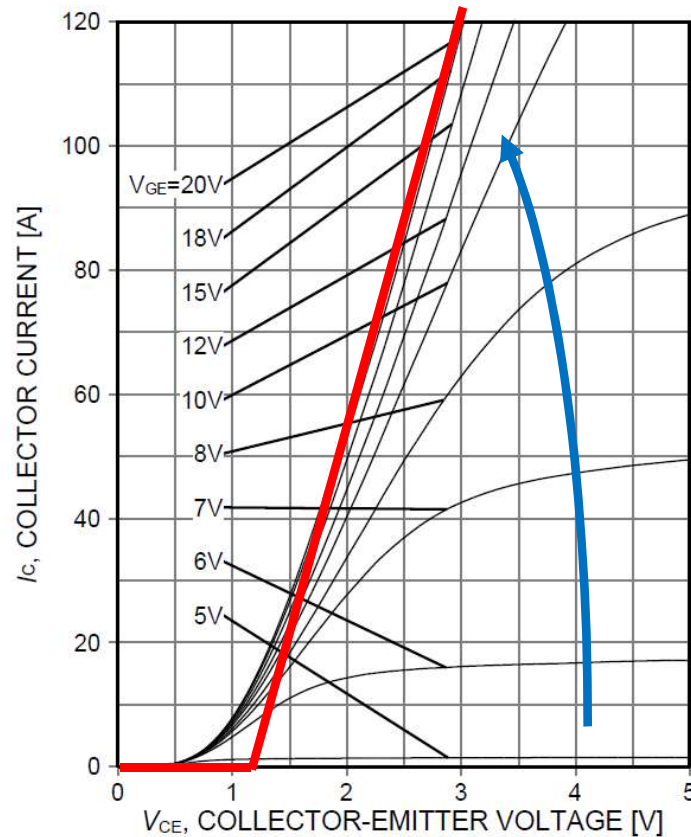
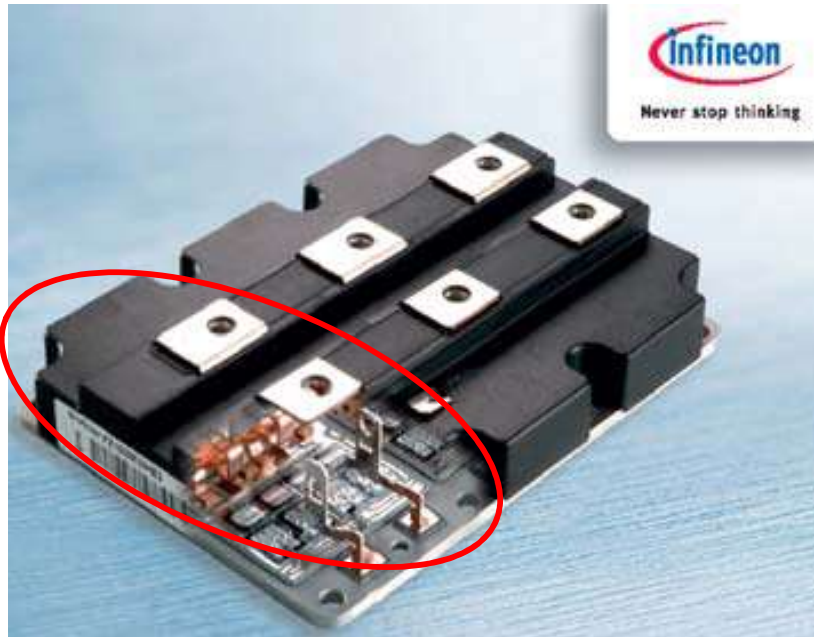


Figure 5. Typical output characteristic
($T_{vj} = 150^\circ\text{C}$)

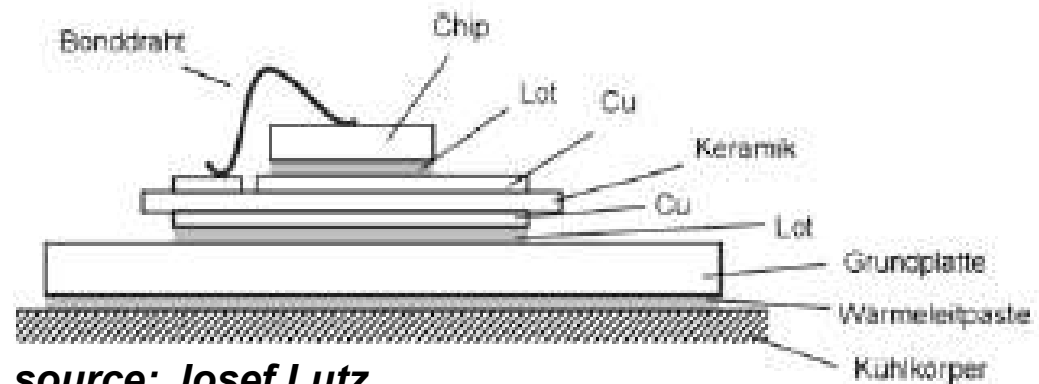
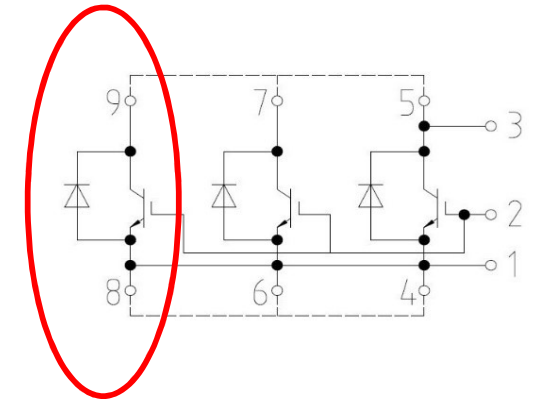
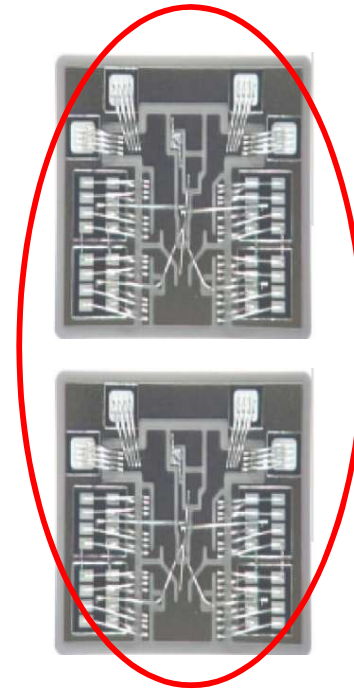
- Die Kennlinien entsprechen denen eines bipolaren Bauelements wie Diode oder Bipolartransistor.
- Der Collector-Strom wird über die Gate-Emitter-Spannung gesteuert.
- Typische Werte für die Durchlassspannung bei Nennstrom liegen bei ca. 1,5 V bis 3 V.
Im Beispiel mit dem Nennstrom 40A sind es 1,7V.
→ Diese hohen Werte machen IGBTs für niedrige Einsatzspannungen uninteressant.

Beispiel: Aufbau eines Hochstrom-IGBT-Moduls



source: Infineon AG

- Leistungsmodule zur Erhöhung der Stromtragfähigkeit (bis ca. 3kA)



source: Josef Lutz

Eigenschaften von IGBTs

- **Durchlassverhalten wie ein Bipolartransistors**

Die Durchlassverluste sind bei hohen Strömen kleiner gegenüber vergleichbaren MOSFETs mit hohen Sperrspannungen.

- **Im Vergleich zum MOSFET treten höhere Schaltverluste auf.**

Zwei Arten von Ladungsträgern führen den Strom, was beim Abschalten zu einem Tailstrom führt.

- **Geringe Ansteuerverluste:**

Der IGBT wird wie ein (MOS)FET spannungsgesteuert.

- **Hohe Spannungs- und Stromgrenzen:**

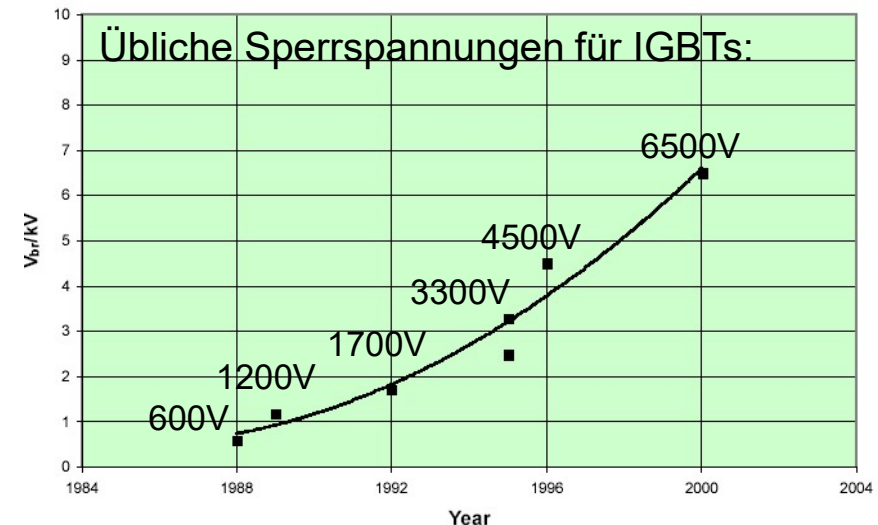
Sperrspannungen 600V bis 6500 V

Ströme bis 200A (Einzelchip) / 4.000A (Modul)

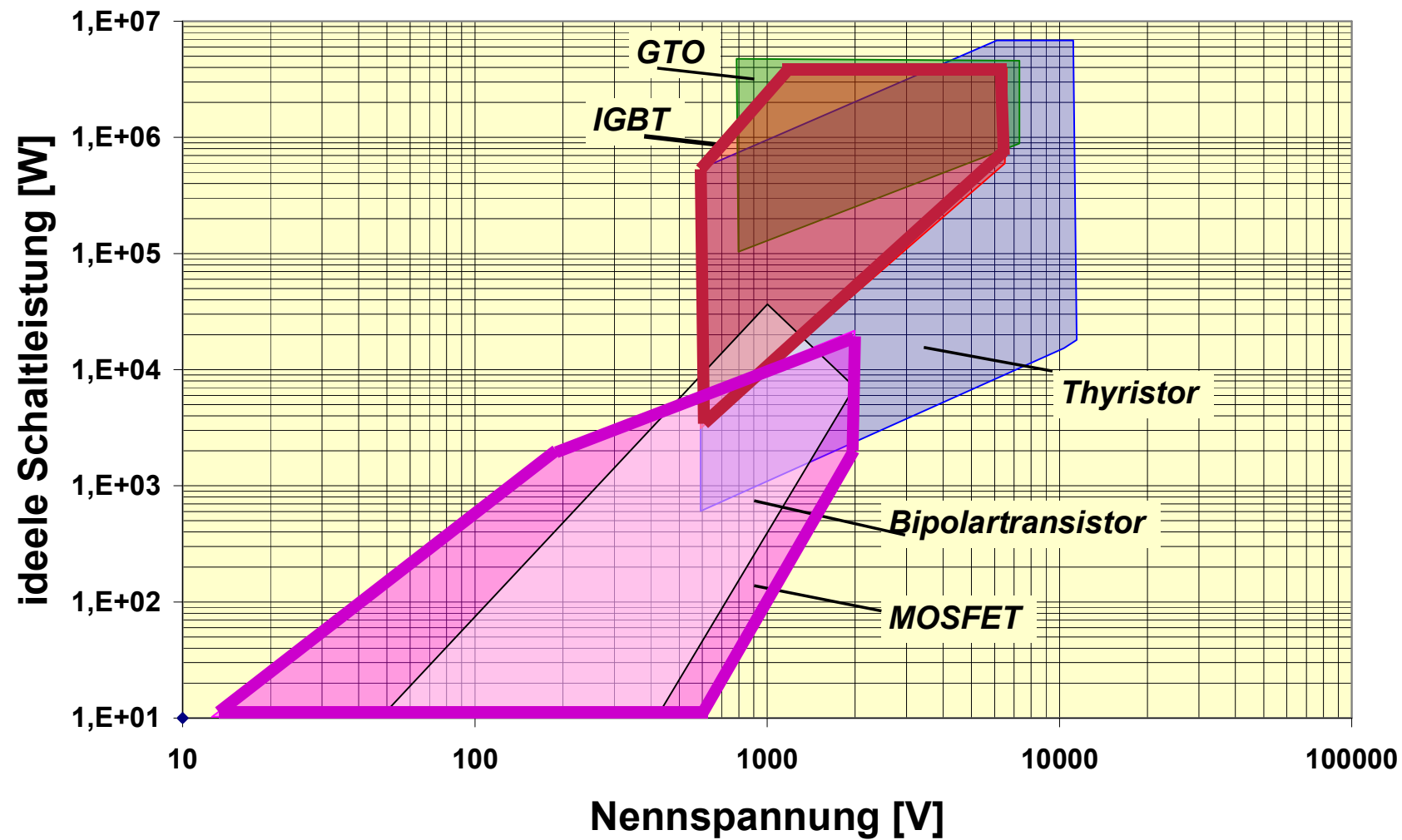
- **Rückwärts-Sperrfähigkeit nur begrenzt gegeben**

Verwendung einer (zusätzlichen) Freilaufdiode mit kurzen Schaltzeiten zwischen Emitter und Kollektor, die in Rückwärtsrichtung leitet, notwendig.

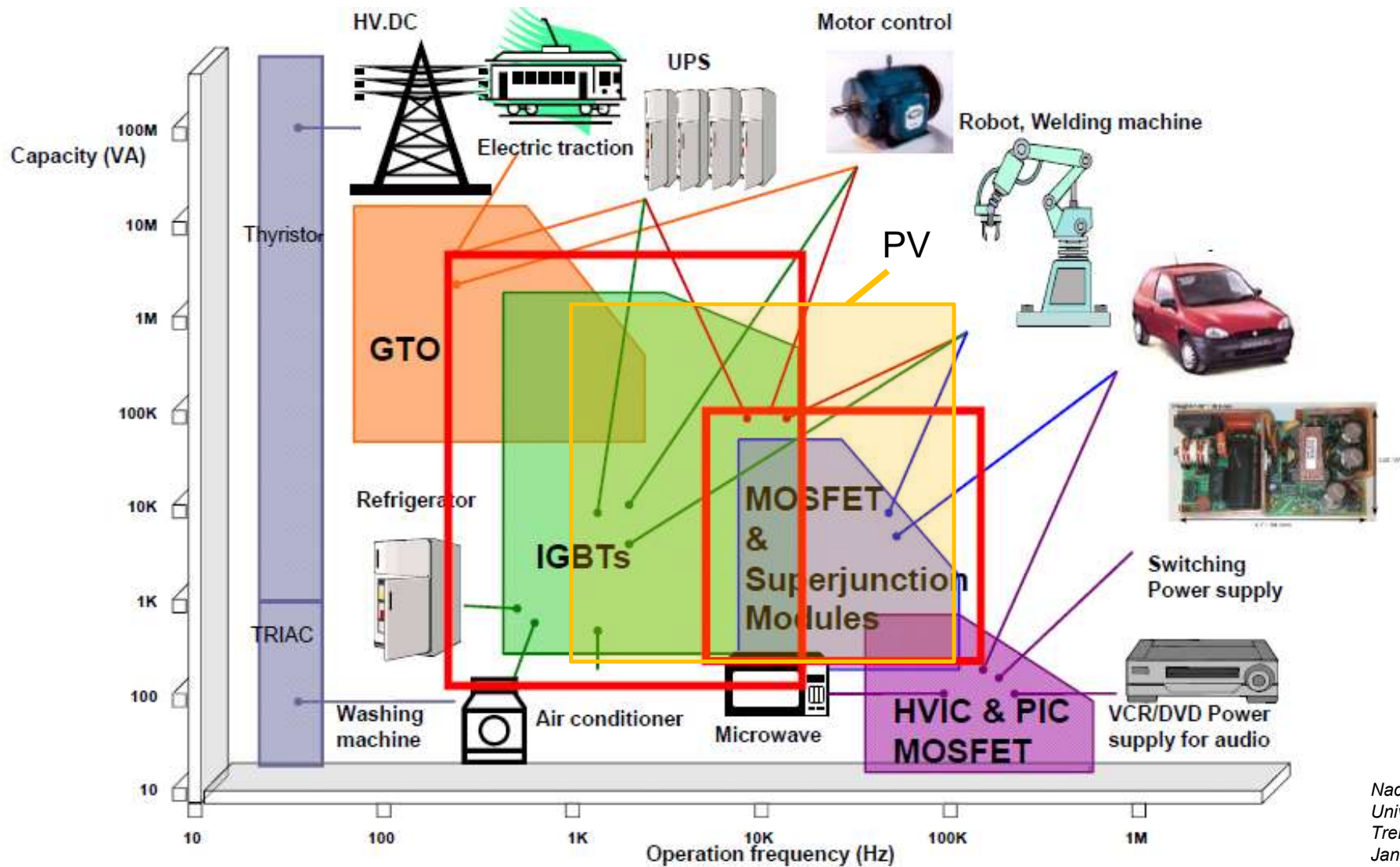
- **Einsatz:** IGBTs werden wie MOSFETs **eingesetzt** in selbstgeführten Schaltungen. Sie sind die heute üblichen Leistungsschalter, z.B. in Antriebs- und Wechselrichtern größerer Leistungen, Back-to-Back-Konvertern in Windenergieanlagen und der Hochspannungsgleichstromübertragung, ...



Grenzen leistungselektronischer Schalter



Einsatzbereiche von Leistungshalbleitern



Nach Quelle: Udrea, Cambridge University, ECPE Workshop Future Trends of Power Semiconductors January 2011.

Was haben wir heute gemacht ?

- **Leistungshalbleiter**
 - Bipolare Leistungshalbleiter: Diode, Bipolartransistor, Thyristor, GTO
 - Feldgesteuerte Leistungshalbleiter: MOSFET, IGBT

Was kommt in der nächsten Vorlesung?

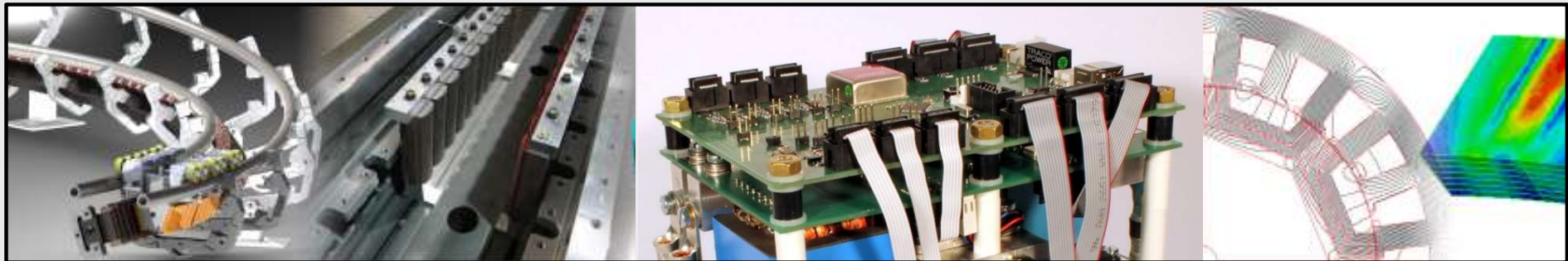
- **Gesteuerte Gleichrichter**
 - M1C, M2C und M3C



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. Cengiz Uzlu

M: c.uzlu@tu-braunschweig.de

T.: + 49 (0)531 3913917

M.Sc. Robert Rohn

M: r.rohn@tu-braunschweig.de

T.: + 49 (0)531 3918165

www.imab.de