



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,

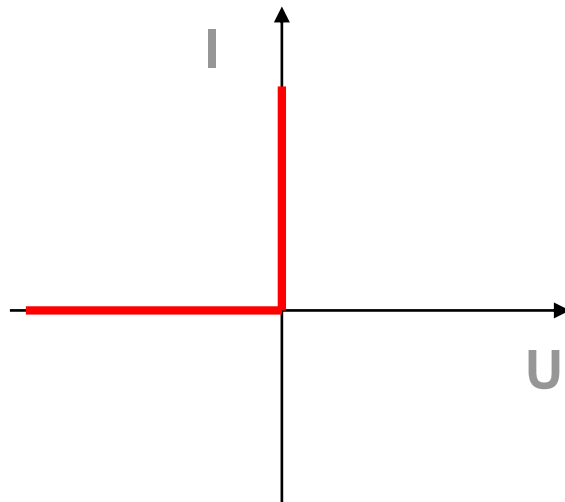
► **Bipolartransistor**, ► **GTO-Thyristor** (gate turn off), ► IGCT (integrated gate commutated thyristor),

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

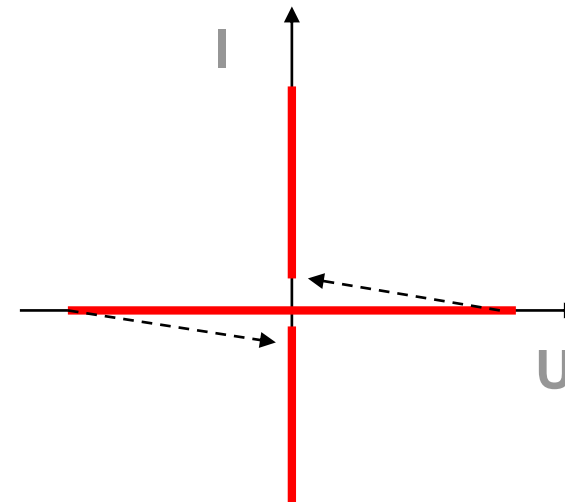
Leistungshalbleiter lassen sich nach Art der Ansteuerung (Spannung, Strom) einteilen:

➔ gesteuert durch angelegte Spannung oder eingepprägten Strom:

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

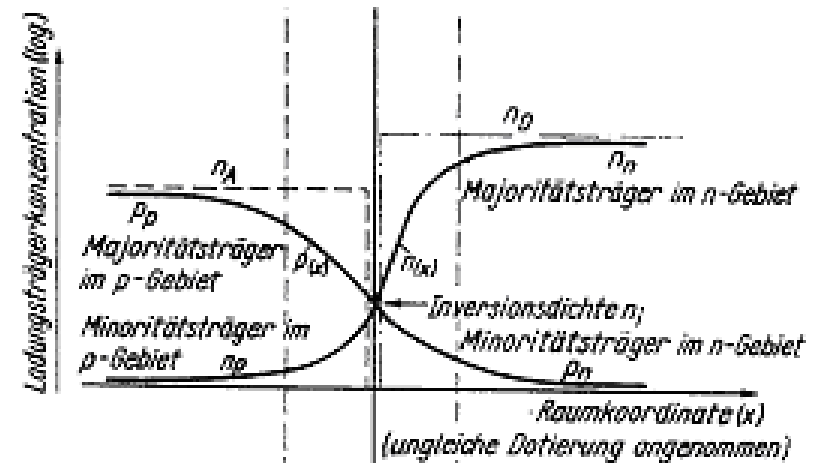
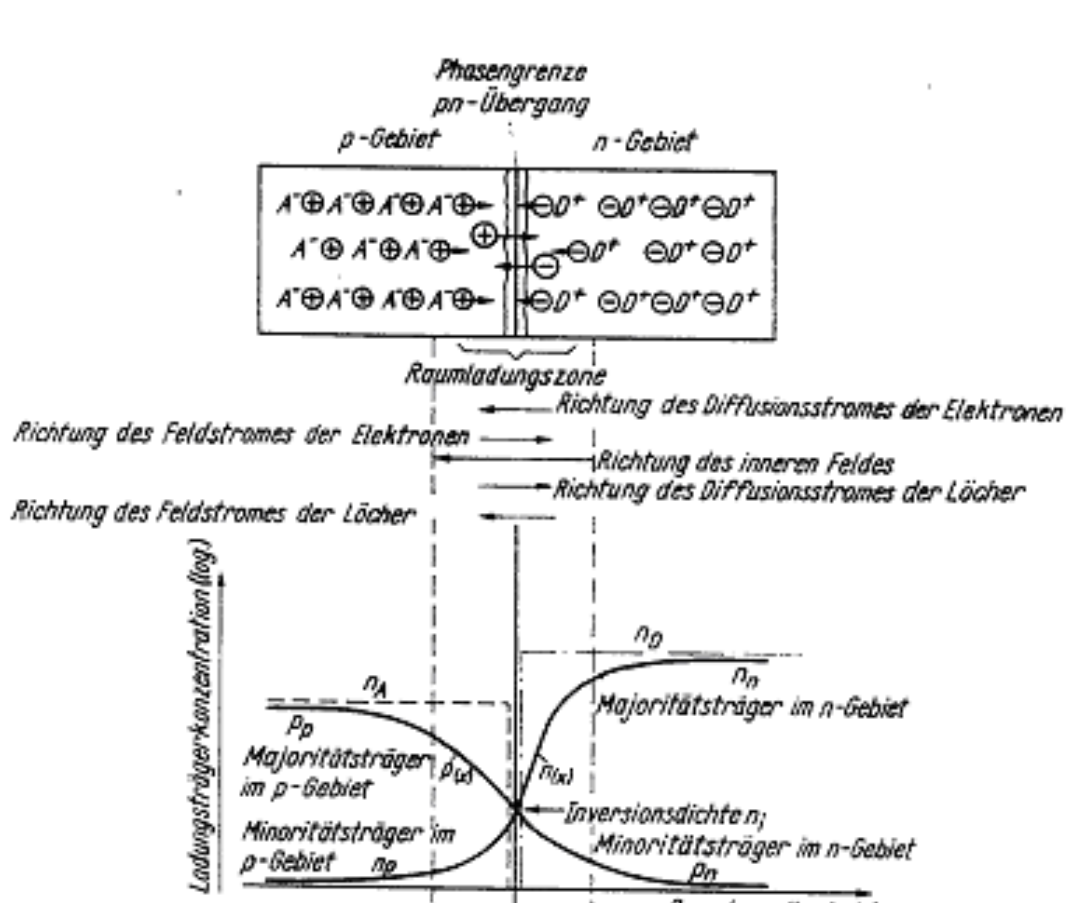


„stromgesteuert“



„spannungsgesteuert“

pn – Übergang ohne angelegte äußere Spannung

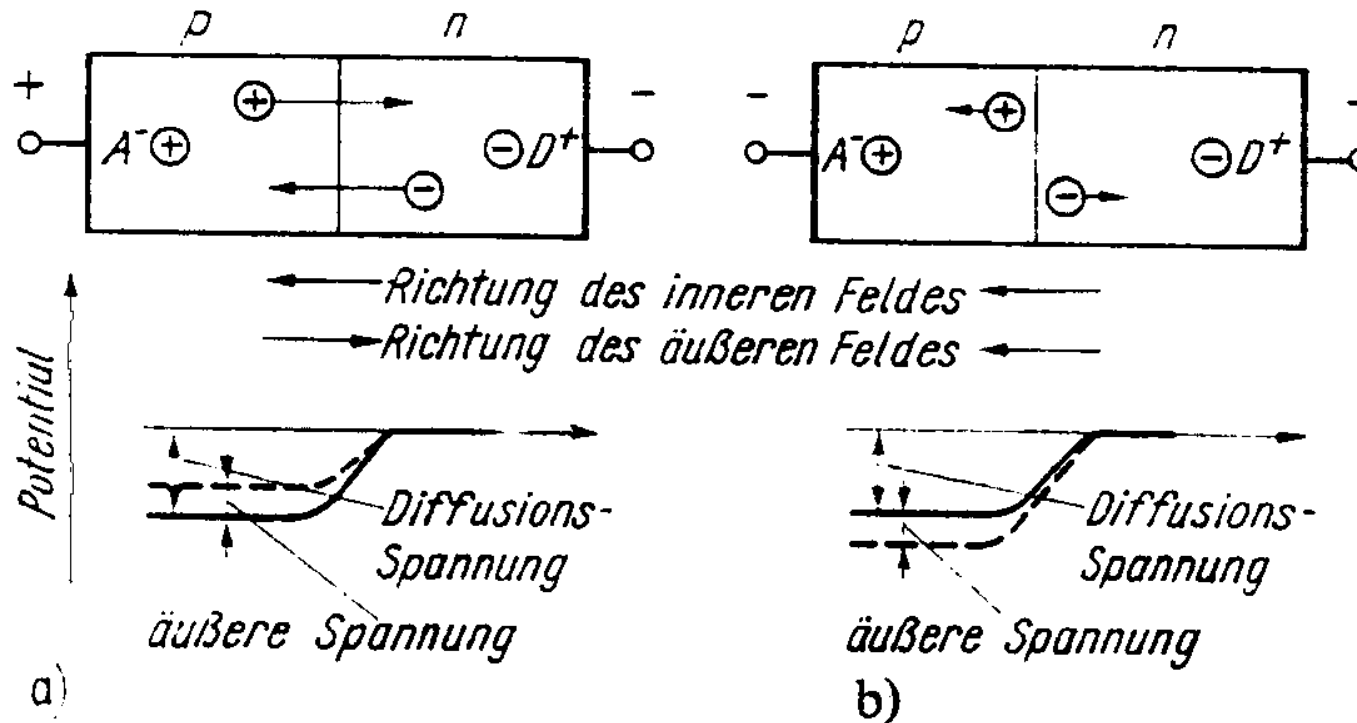


→ beim Ladungstransport, muss eine Potenzialbarriere überwunden werden!

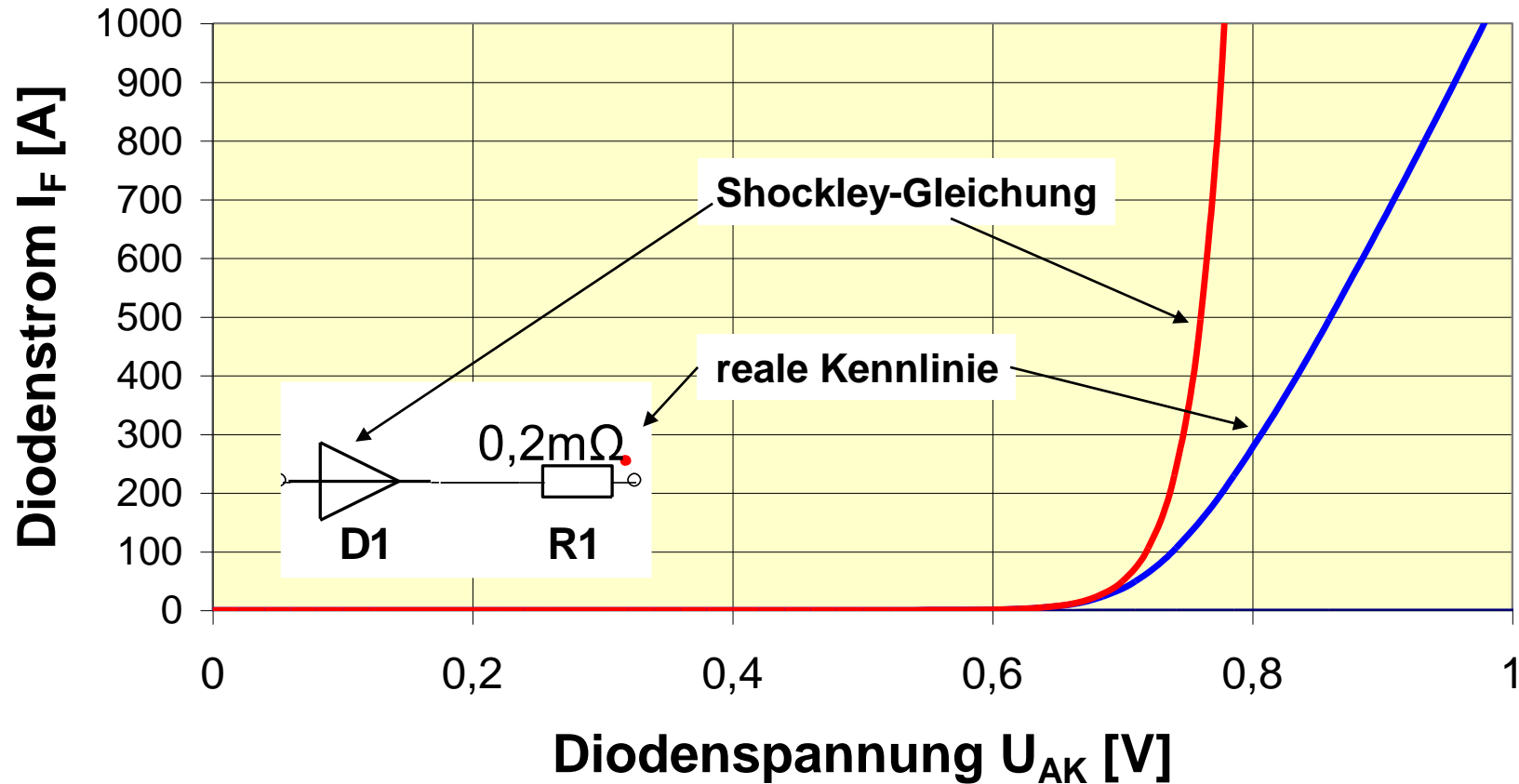
pn – Übergang mit äußerem Feld

(a) Durchlassrichtung

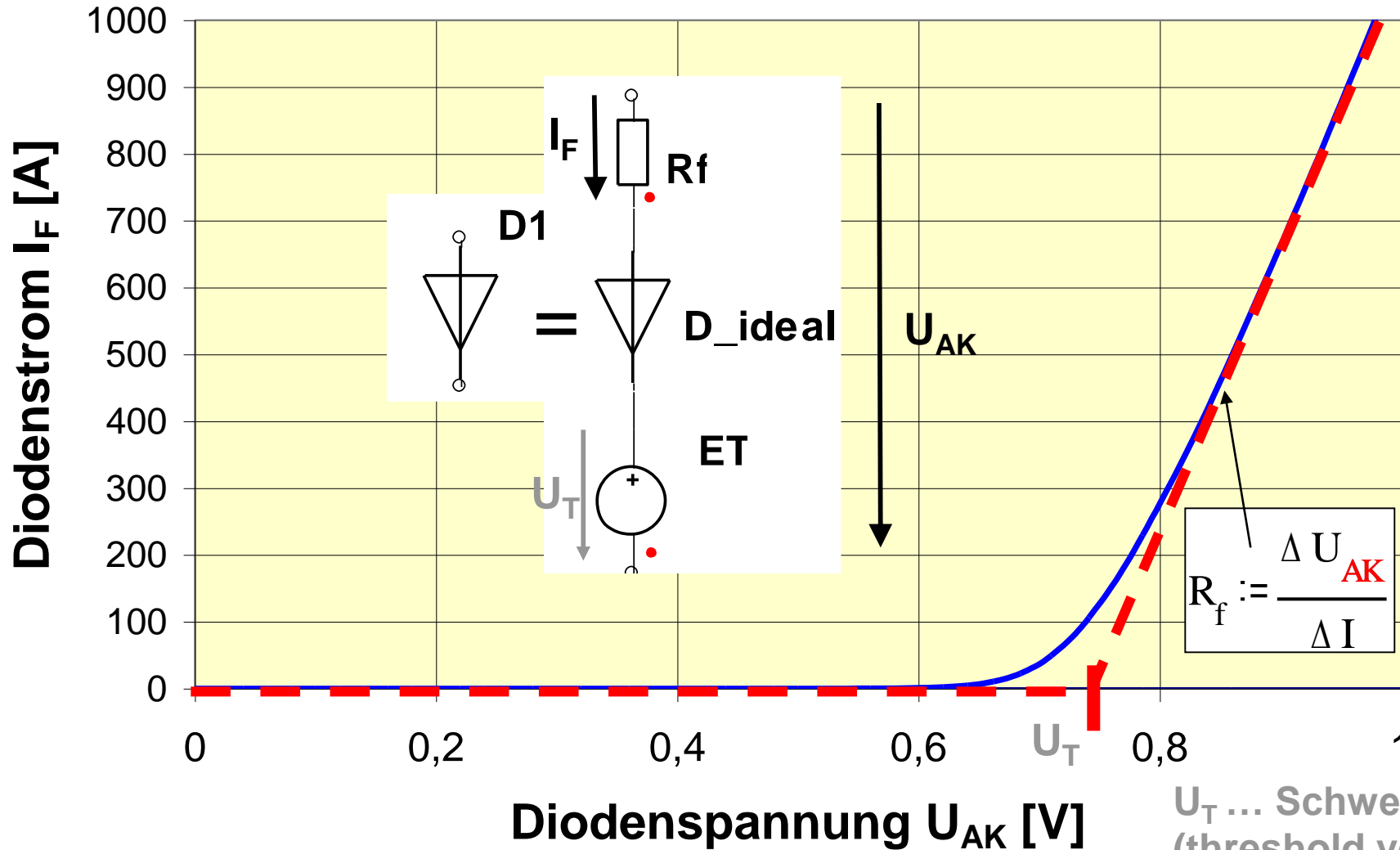
(b) Sperrrichtung



Durchlasskennlinie einer Siliziumdiode

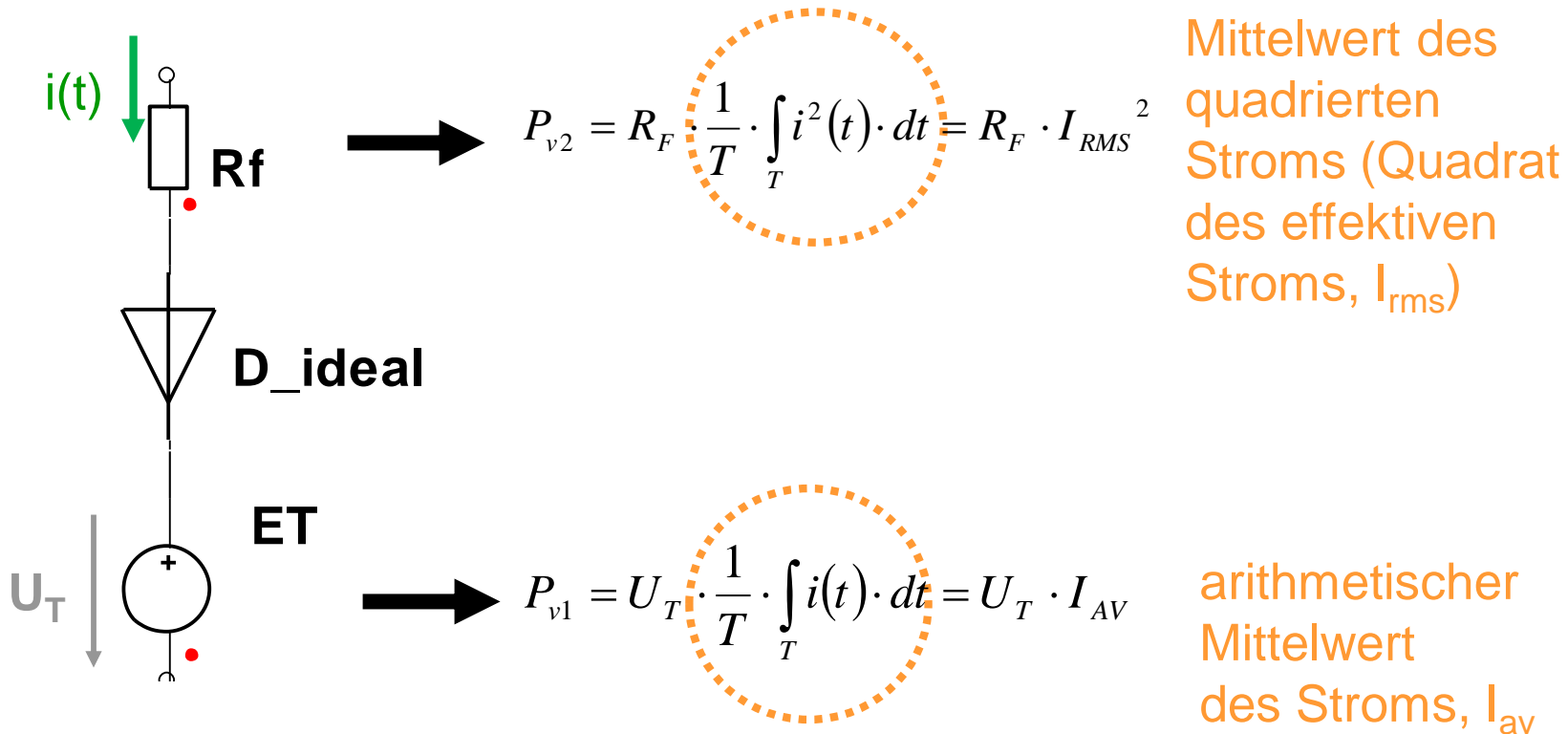


Durchlasskennlinie einer Siliziumdiode



U_T ... Schwellenspannung
(threshold voltage)

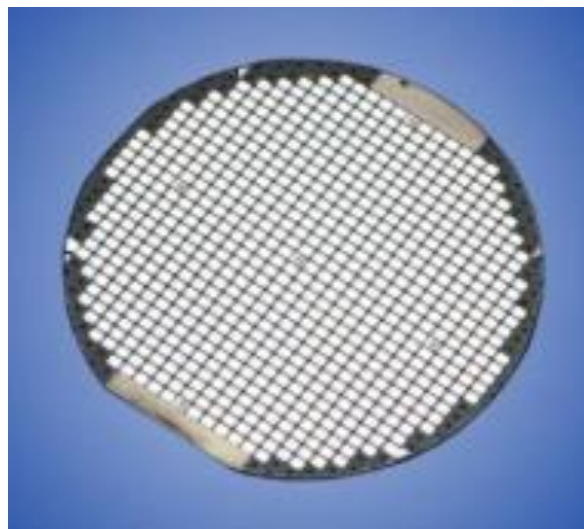
Durchlassverluste



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

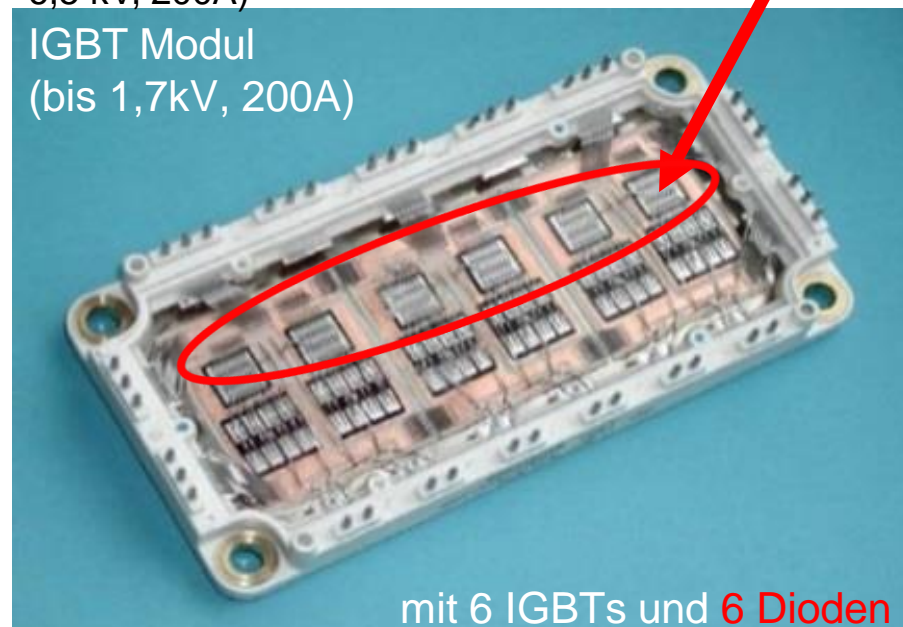
Beispiele für moderne Leistungshalbleiter (eupec/Infineon)

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

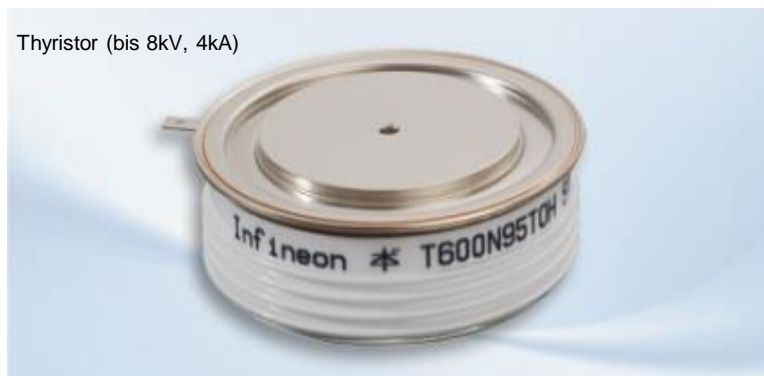


Aus den Scheiben prozessierte viereckige Chips für
kleine Leistungen (max. bis. ca. 14 mm x 14 mm /
6,5 kV, 200A)

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

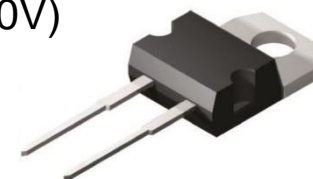


Thyristor (bis 8kV, 4kA)

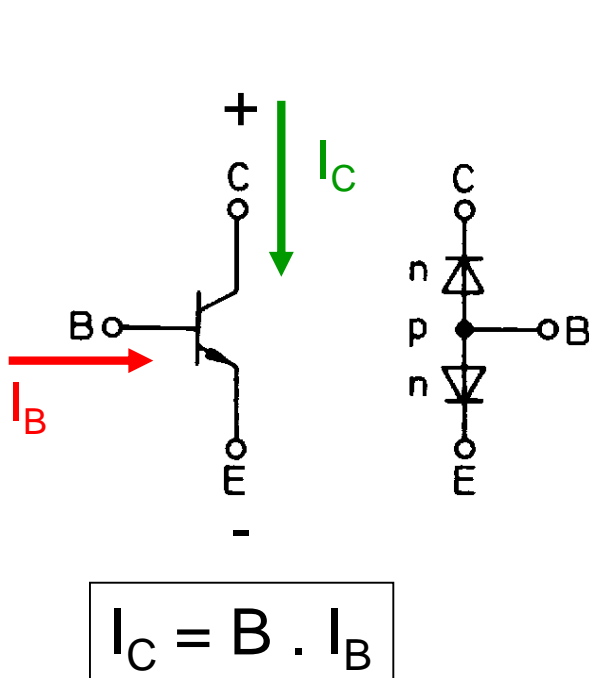


Scheibenzellen für große Leistungen
(Dioden, Thyristoren bis 9kV, 6kA)

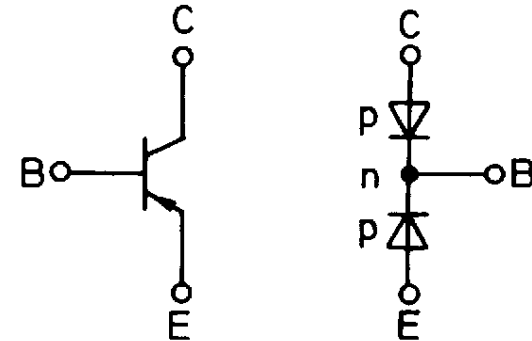
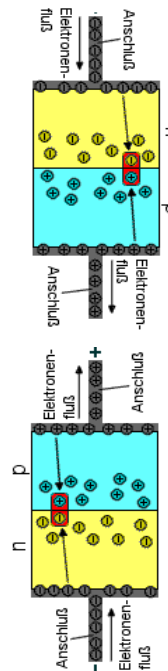
Einzel-Diode im TO220-Gehäuse
(Beispiel: 12A, 600V)



Bipolarer Transistor (BJT, bipolar junction transistor)

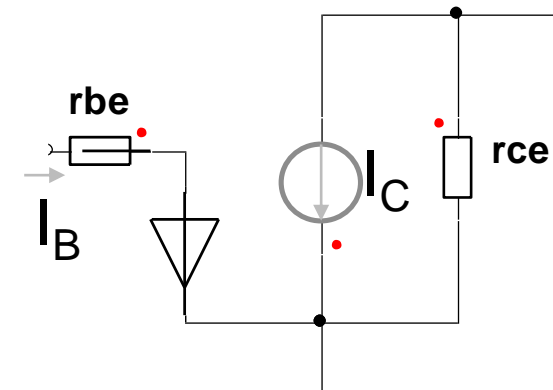


Leiten

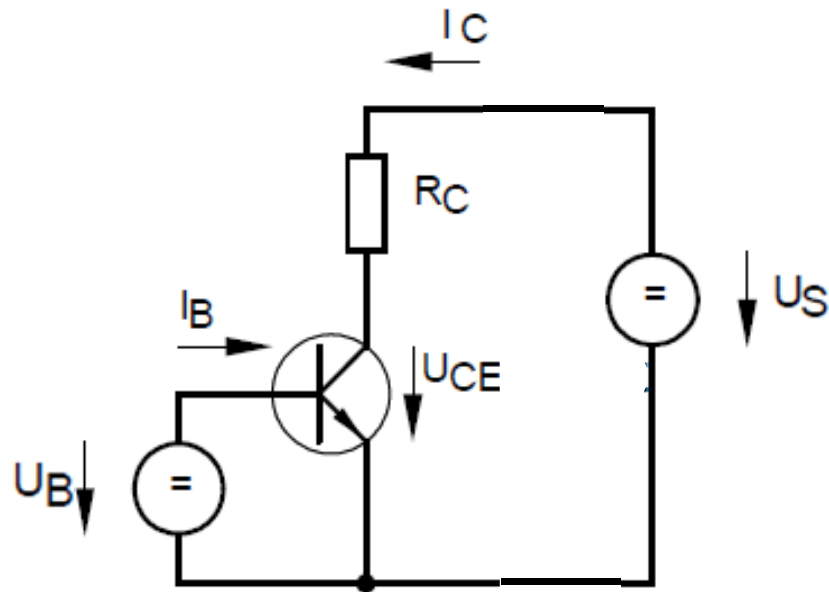


Ersatzschaltbild eines npn-Transistors:

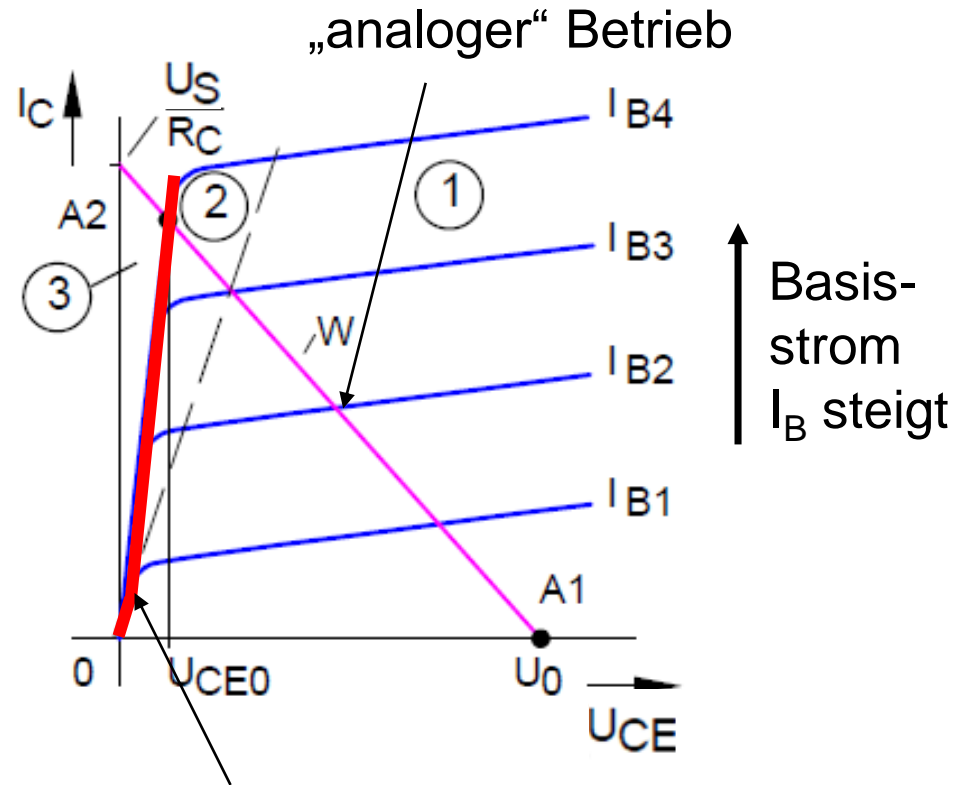
- ➔ Im Schaltbetrieb muss der Basisstrom genügend groß sein, damit der Transistor nicht strombegrenzend **mit hohen Spannungsabfällen** wirkt!



Bipolarer Transistor: Betrieb mit Last und Kennlinien



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



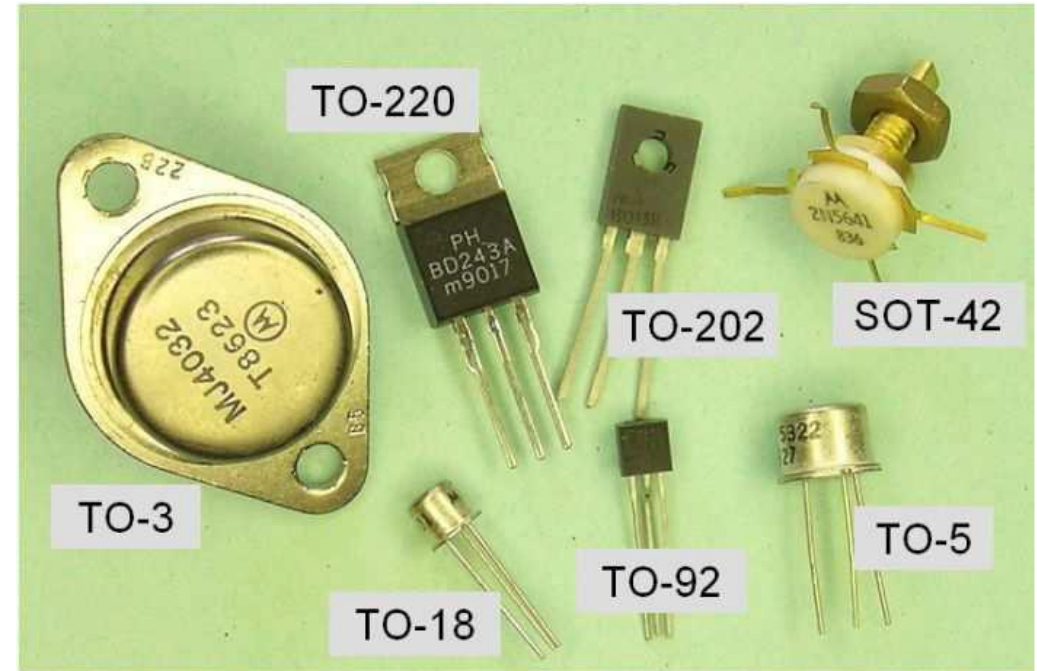
Sättigungsspannung für „Schaltbetrieb“

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

$B = 1 \dots 30$

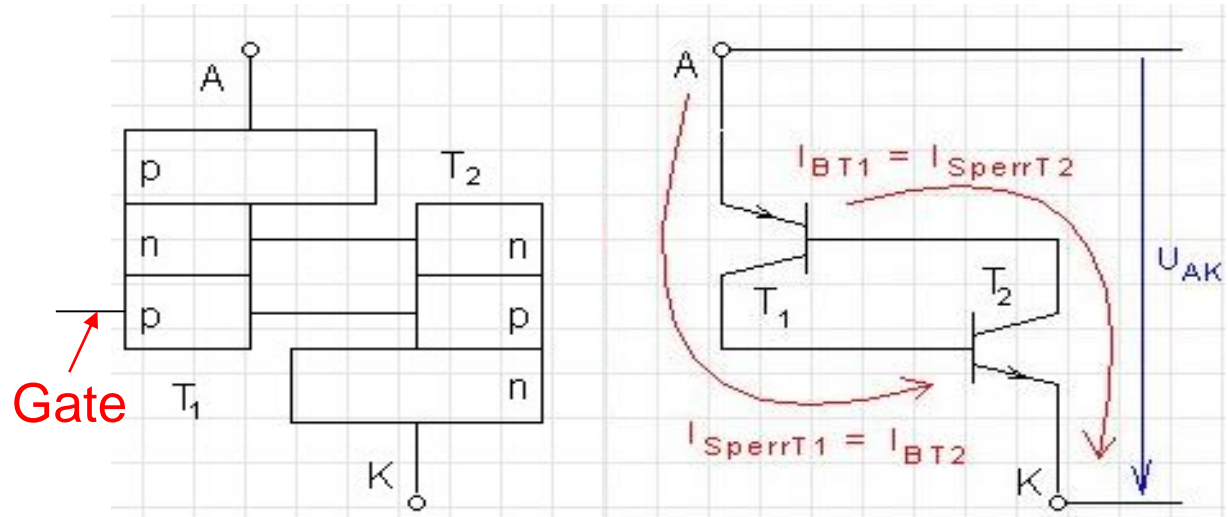
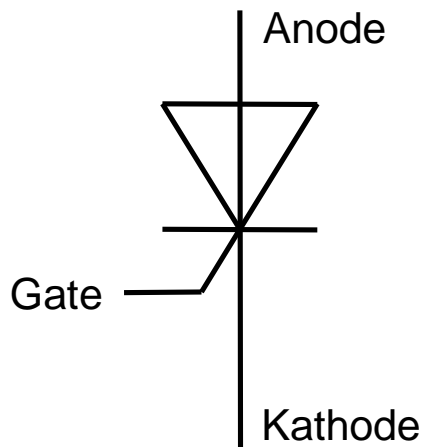
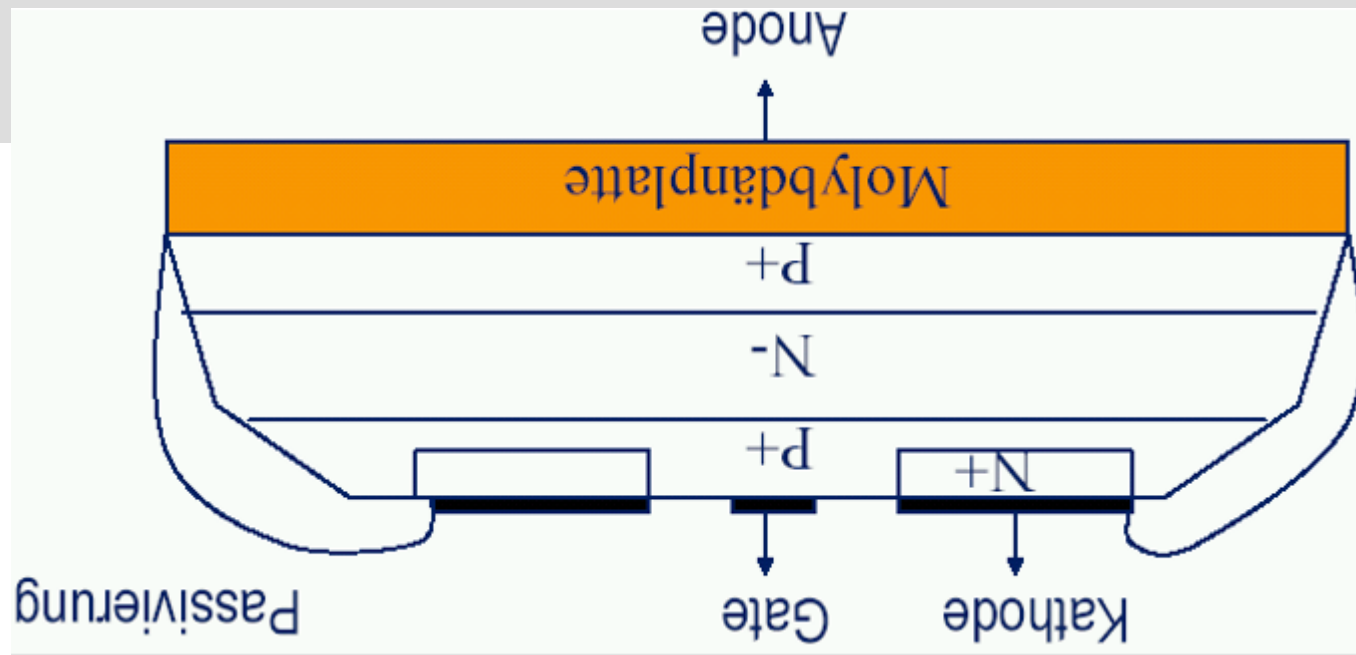
Bipolare Transistoren in der Leistungselektronik

- 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



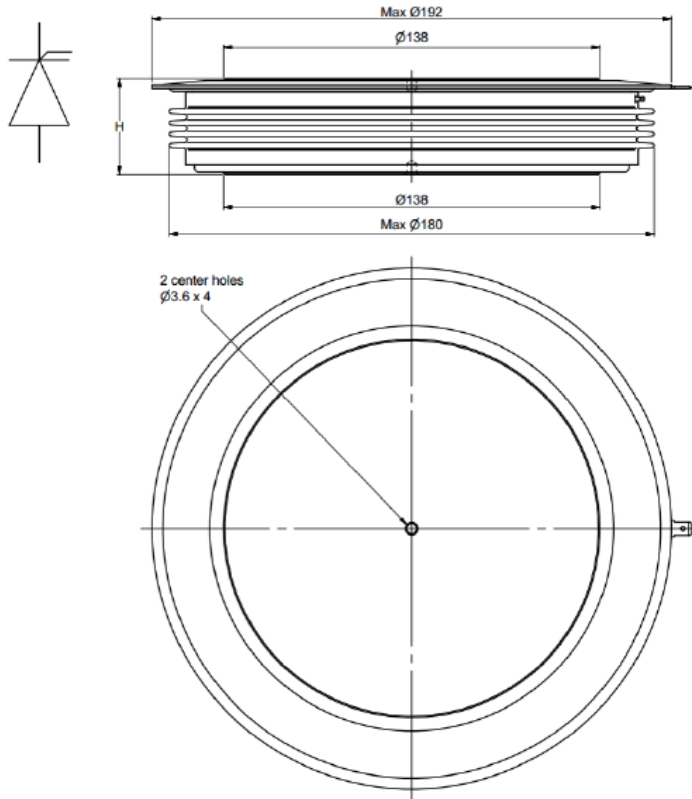
Thyristor:

Ein 4-Schicht-Bauelement



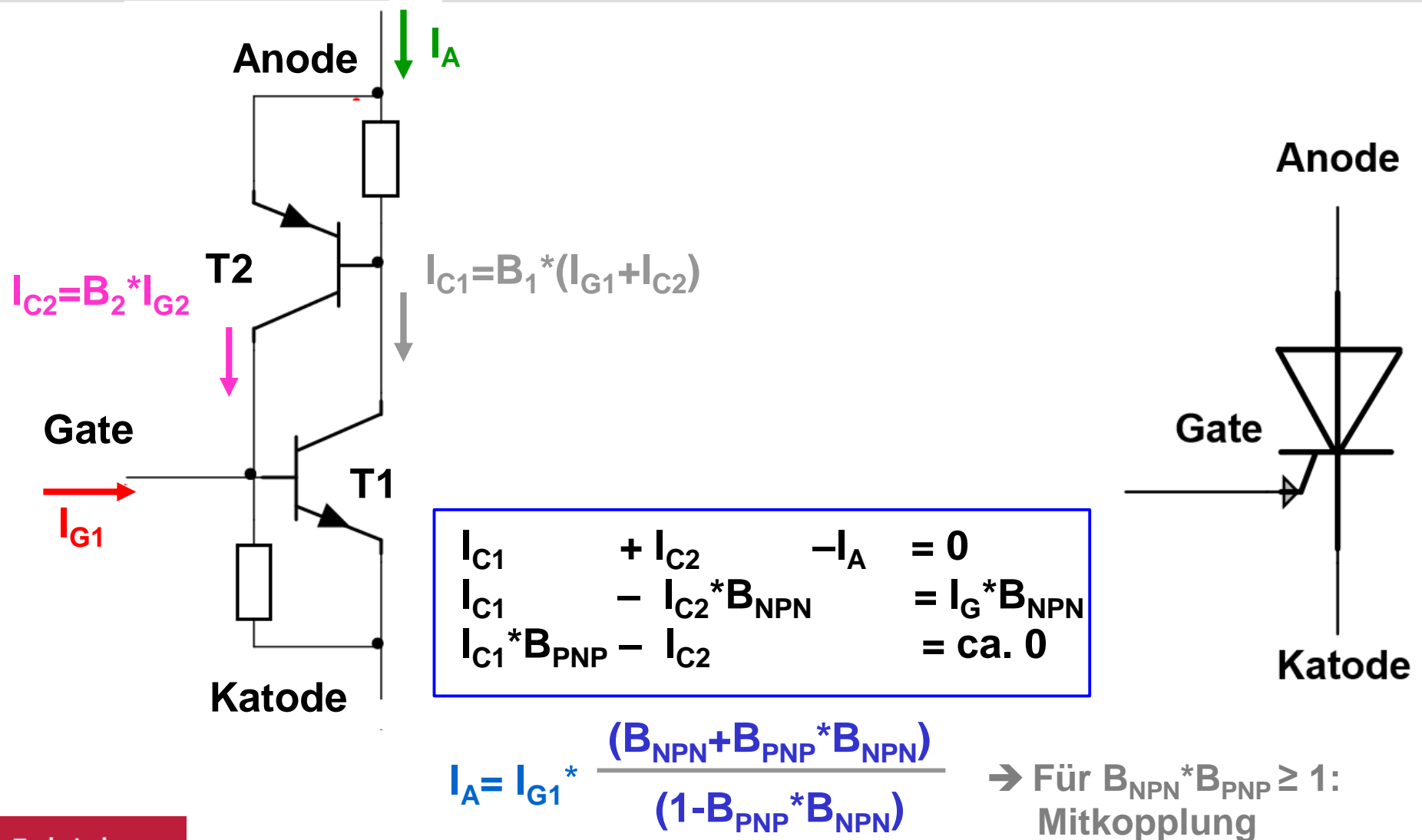
Bauform: Scheibenthyristoren

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

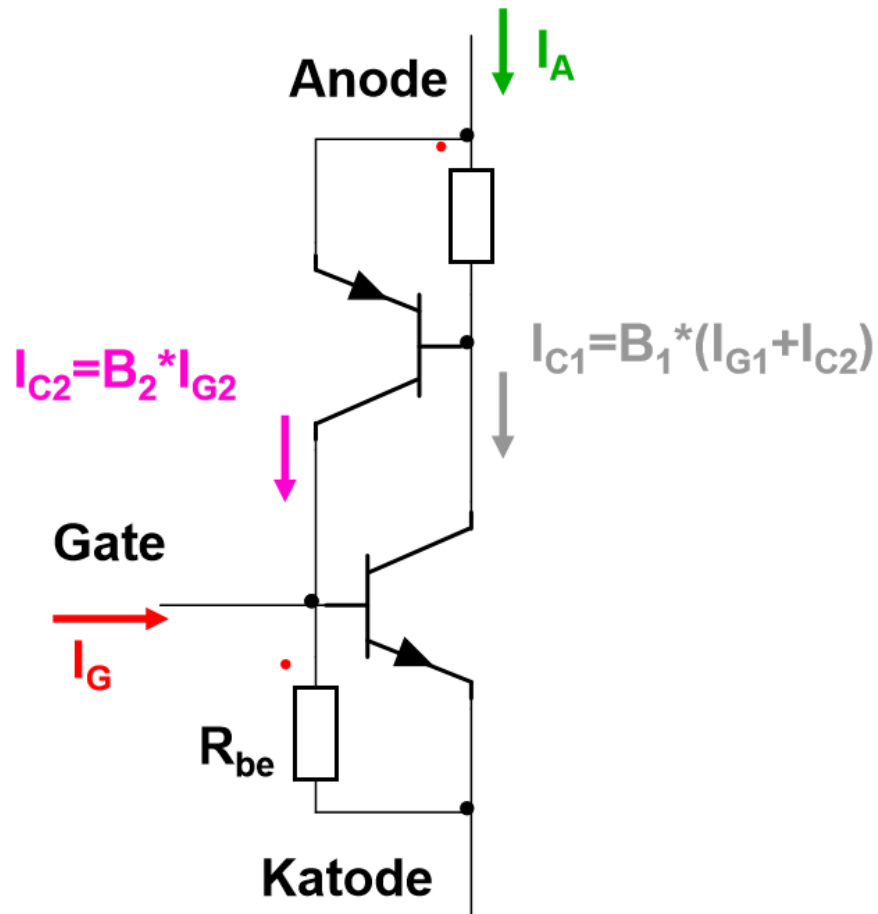


Quelle: ABB

Der Thyristor



Thyristor: Haltestrom

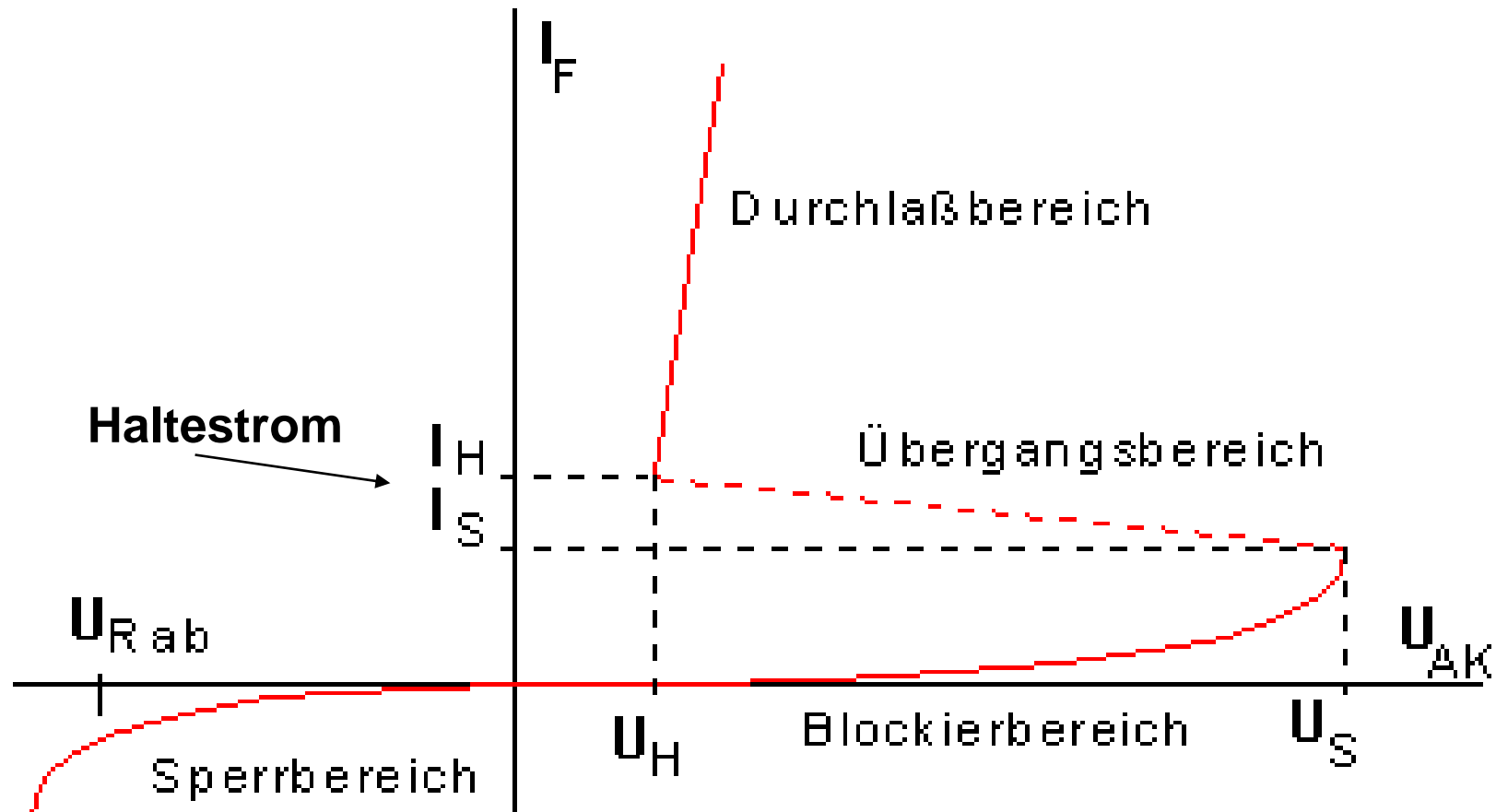


Überschlägige Erfüllung der Bedingung
 $B_{NPN} * B_{PNP} \geq 1$ bei $U_{BE} = 0,7V$

➔ minimaler Strom für stabilen
eingeschalteten Zustand:

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

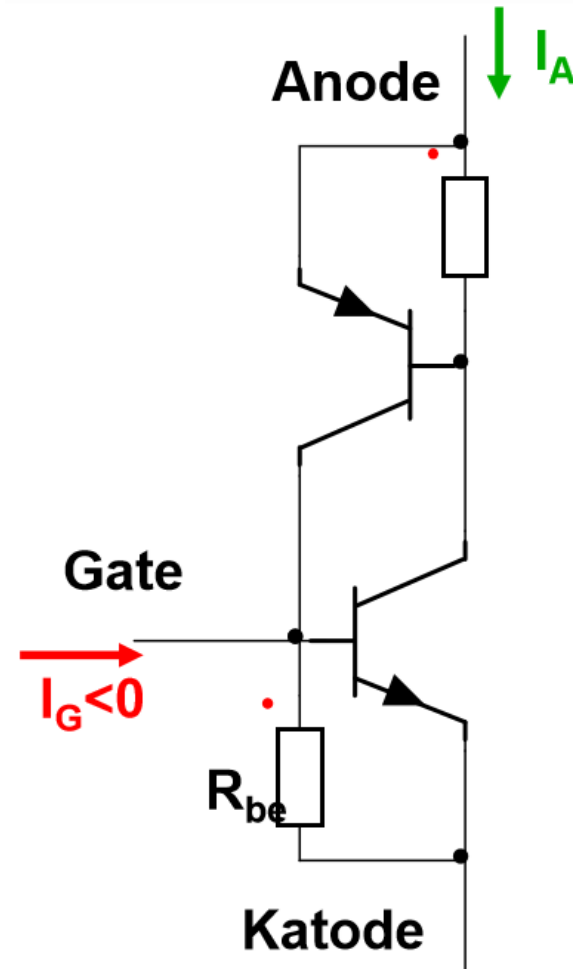
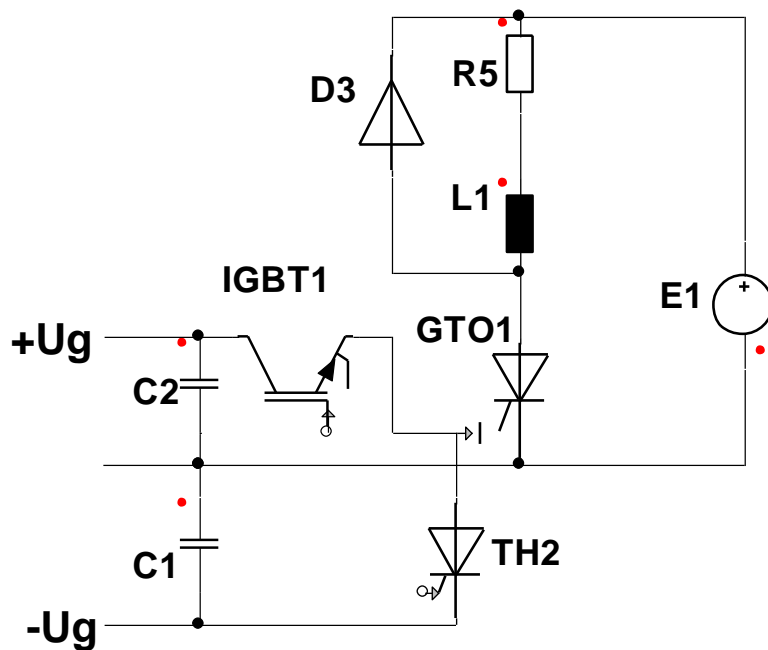
Thyristor: Kennlinie



GTO – Thyristor (*Gate Turn Off*)

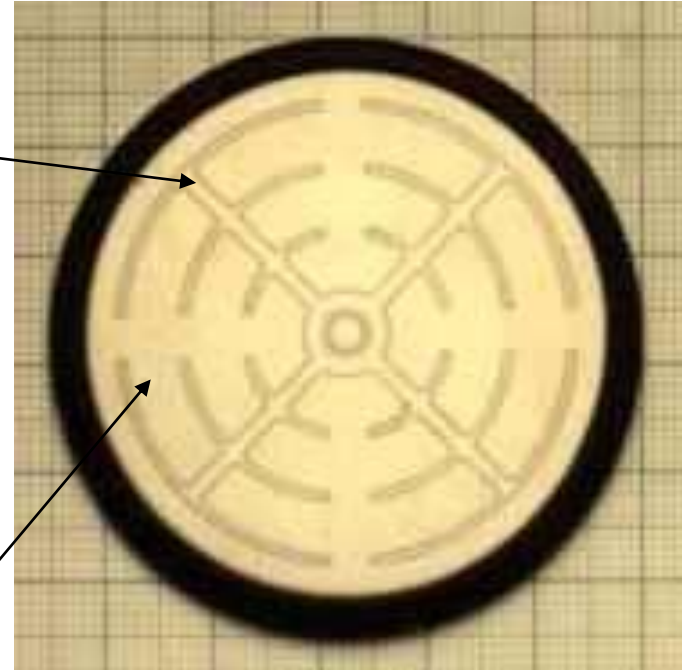
Aus der Ersatzschaltung ergibt sich auch die Möglichkeit des Abschaltens bei $I_G = -I_A$

→ Erfordert eine feine Gatestruktur zum Erreichen der gesamten aktiven Fläche



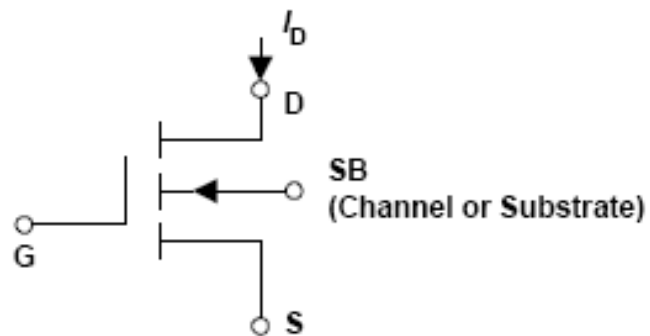
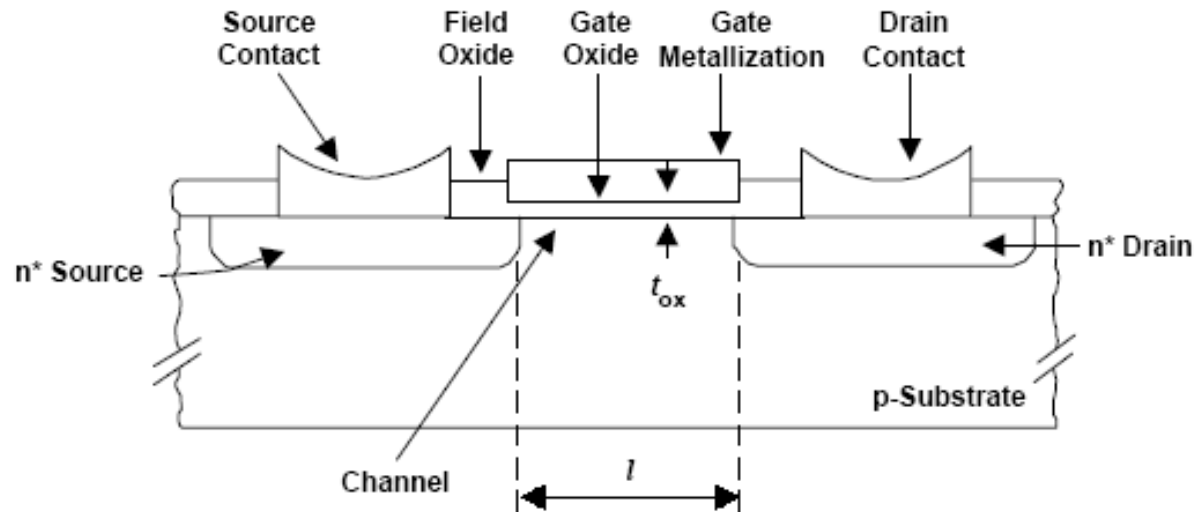
Die Driftgeschwindigkeit von Ladungsträgern in Festkörpern ist gering:

Daher ist das Gate
fein und verzweigt strukturiert.

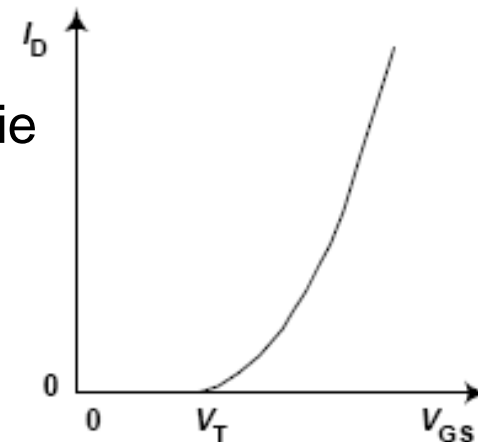


Kathode

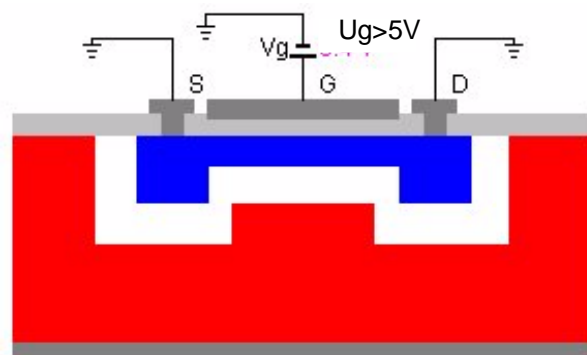
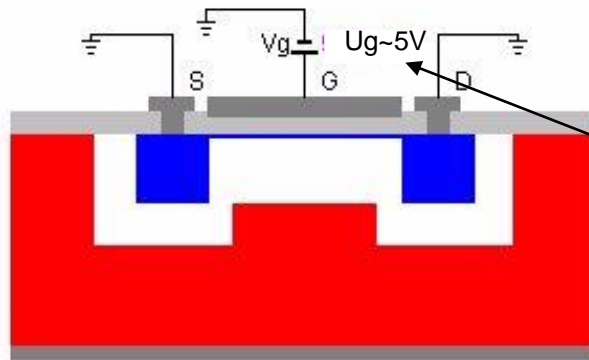
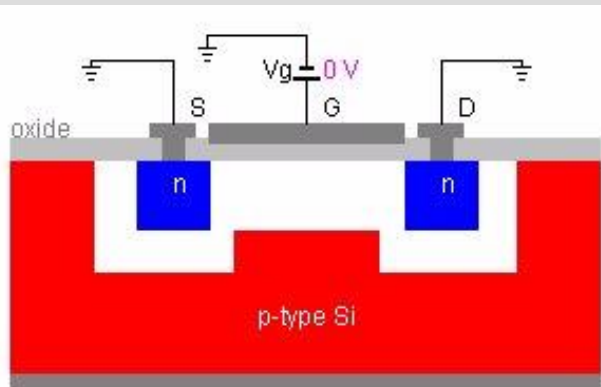
MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)



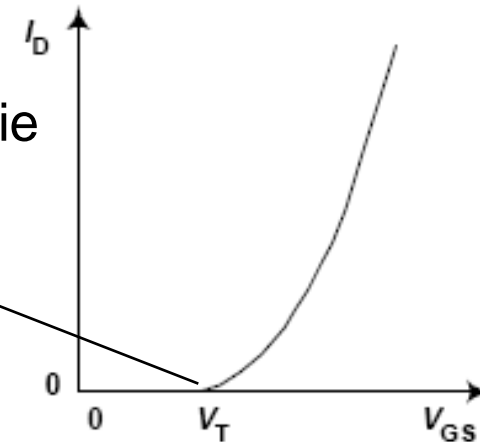
Steuerkennlinie



Ausbildung eines leitfähigen Kanals beim MOSFET



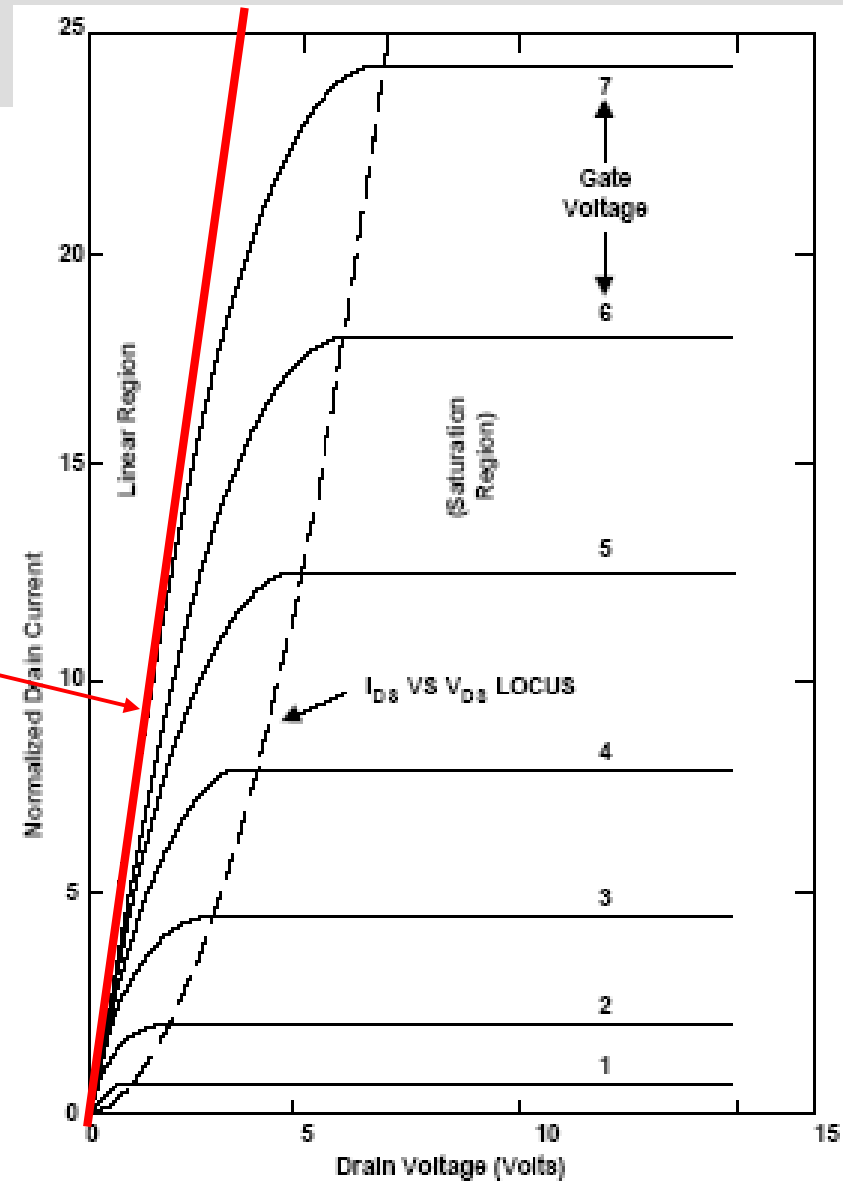
Steuerkennlinie



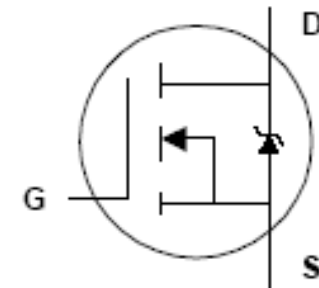
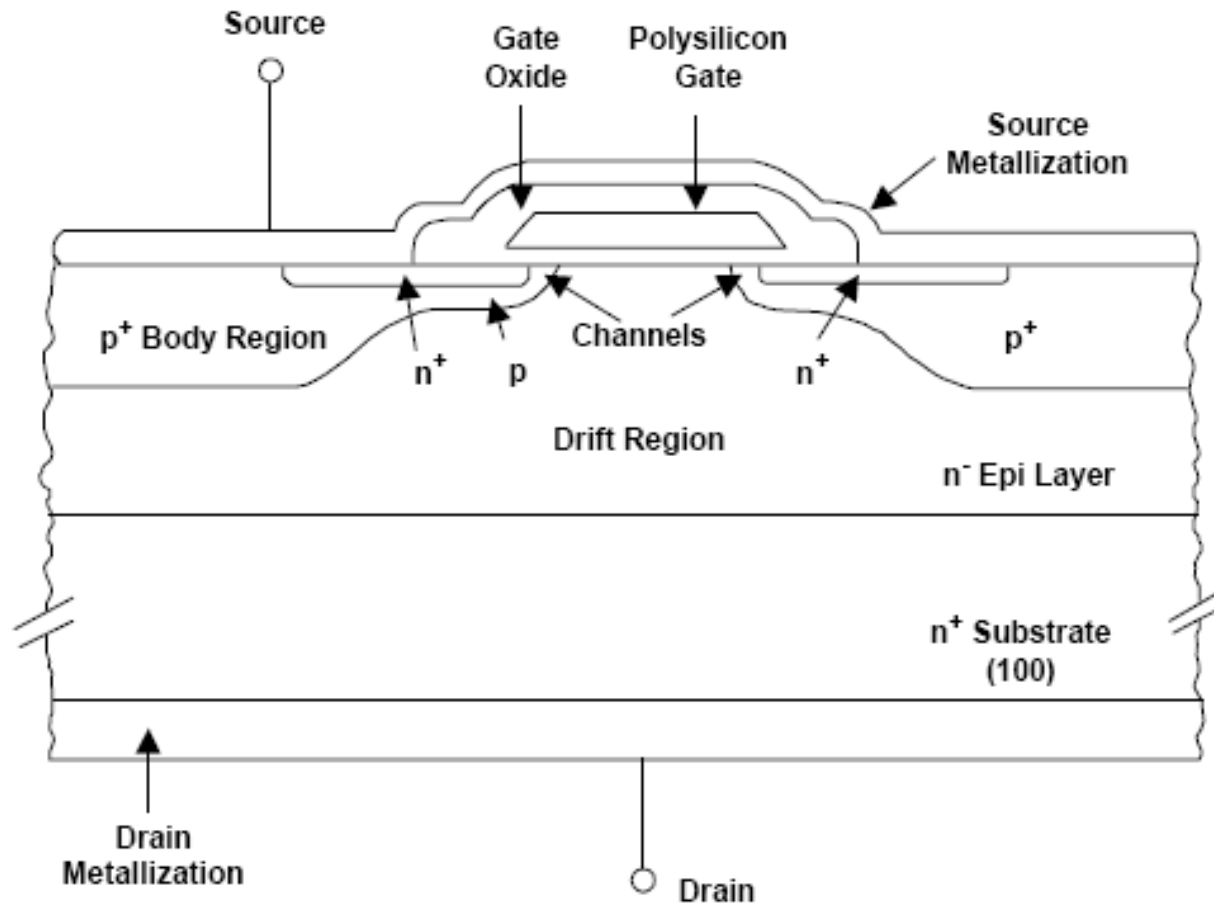
→ der Strom durchfließt nur Bereiche eines Trägertyps

Ausgangskennlinie eines MOSFET

MOSFET's verhalten sich im eingeschalteten Zustand wie Widerstände!



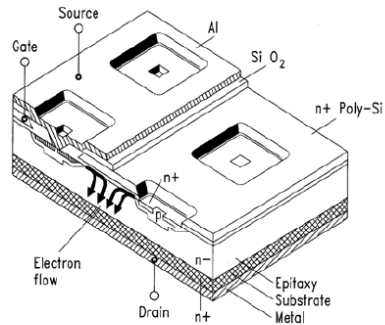
Vertikale Struktur eines n-Kanal-Leistungs-MOSFET's



Eigenschaften von MOSFETs

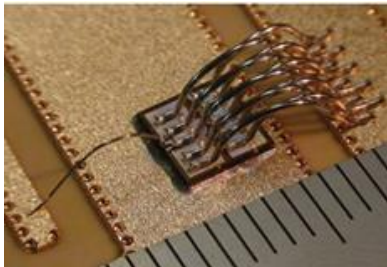
- Im **Durchlass** ist der MOSFET durch eine Widerstandscharakteristik bestimmt. Der Durchlasswiderstand R_{DSon} bestimmt den Spannungsabfall und damit die Verluste des MOSFETs.
- Die **Steuerung erfolgt stromlos**. Die Spannung U_{GE} zwischen Gate und Source ist im statischen Betrieb konstant und es fließt nahezu kein Strom über die Gate-Source-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 bis mittlerer Leistung.

Ausführungsbeispiel



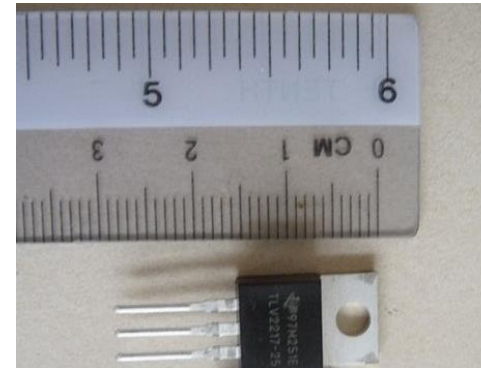
Planare, vertikale MOSFET-Struktur – Schnitt durch einen Chip

source: R. Bayerer, Infineon

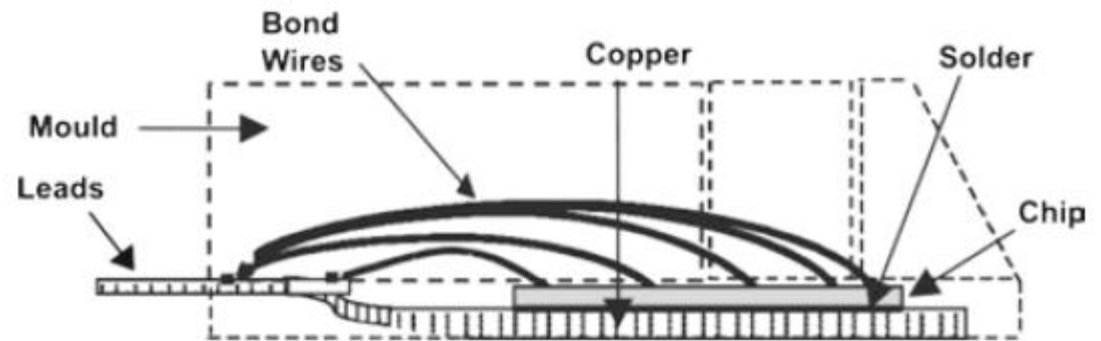


SiC – MOSFET (Chip)

source: Rohm



TO 220 – Gehäuse

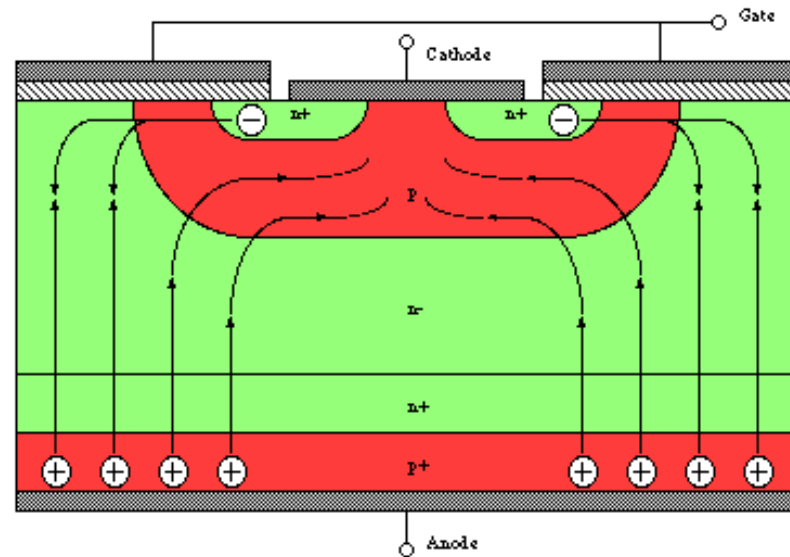
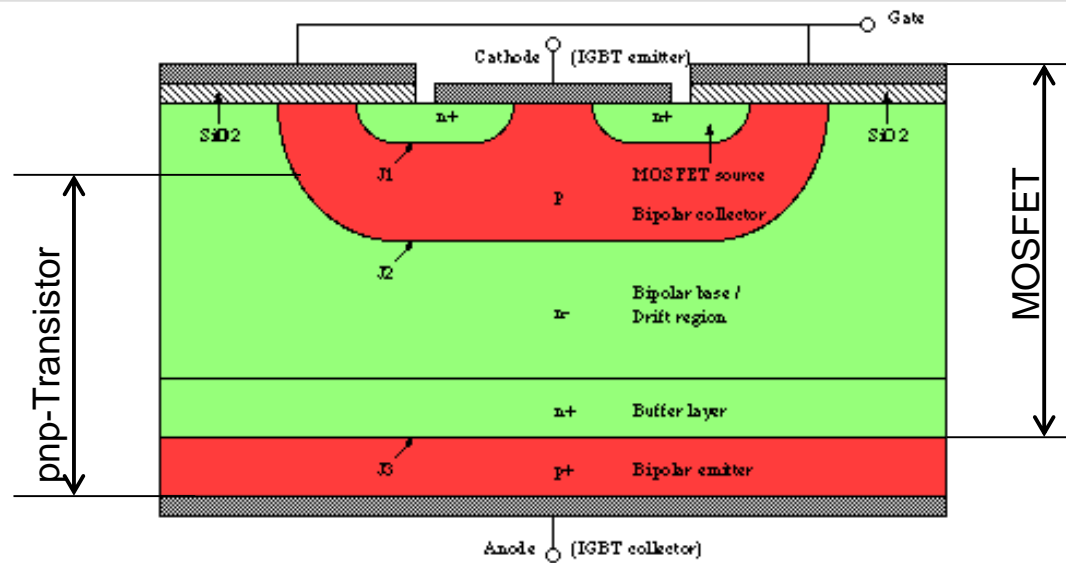


source: Josef Lutz

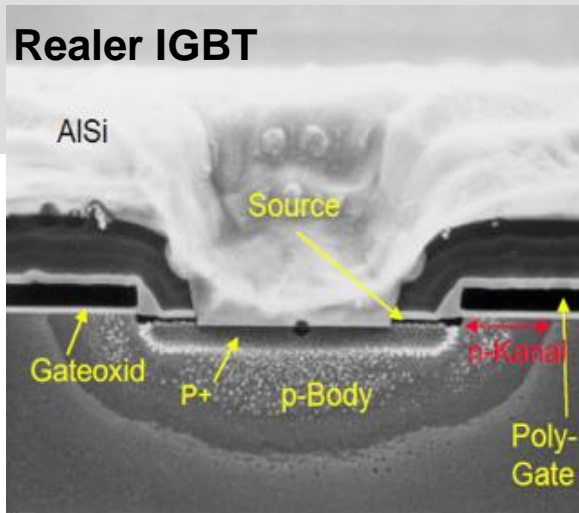
Insulated Gate Bipolar Transistor

➔ Feldgesteuertes Bauelement mit bipolarer Struktur

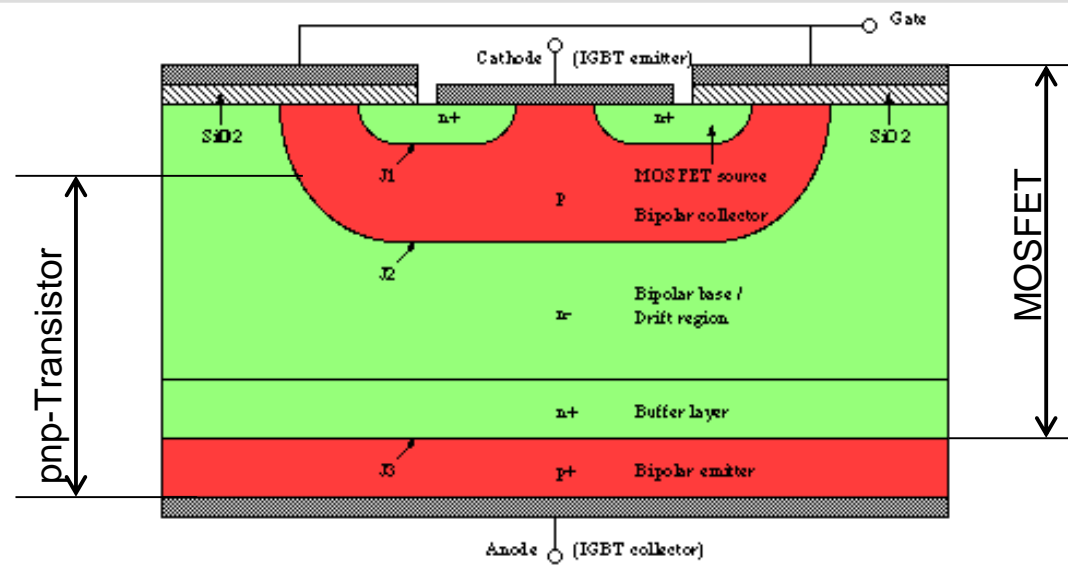
➔ Strom von Elektronen und Löcher



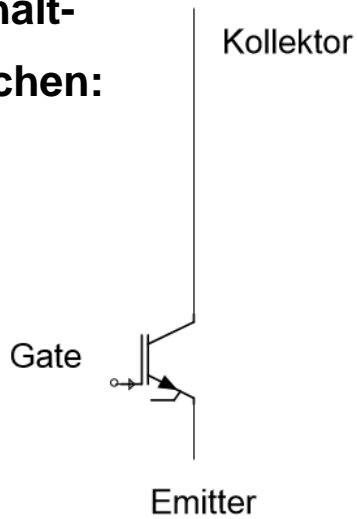
Realer IGBT



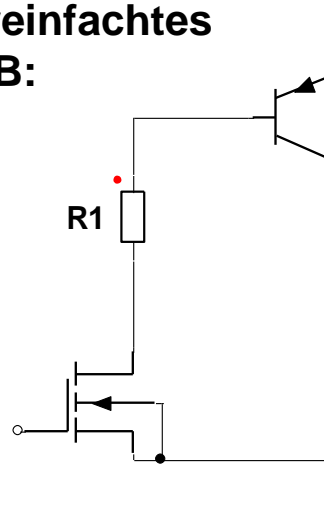
n-Source-Breite ca. 1,5µm, p-Body-Breite ca. 7 µm



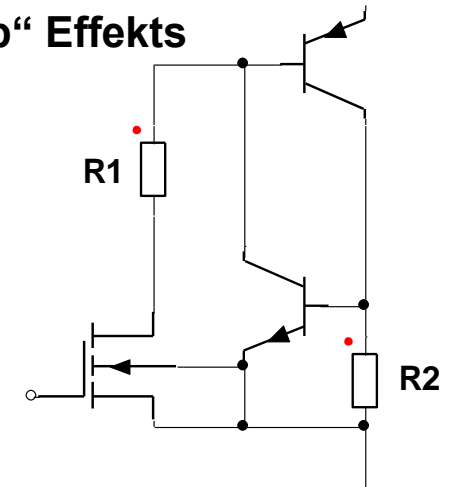
Schalt- zeichen:



Vereinfachtes ESB:



ESB zur Beschreibung des „Latch Up“ Effekts



Ausgangskennlinie eines IGBT

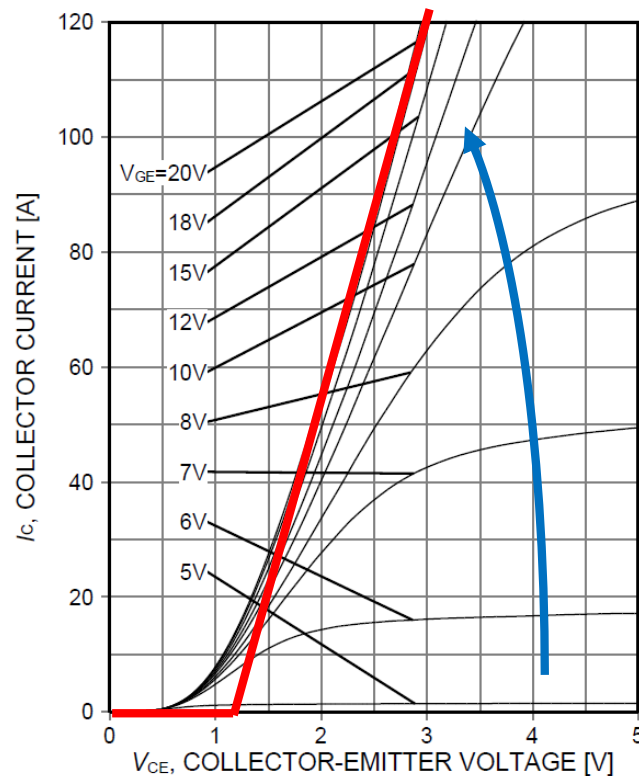
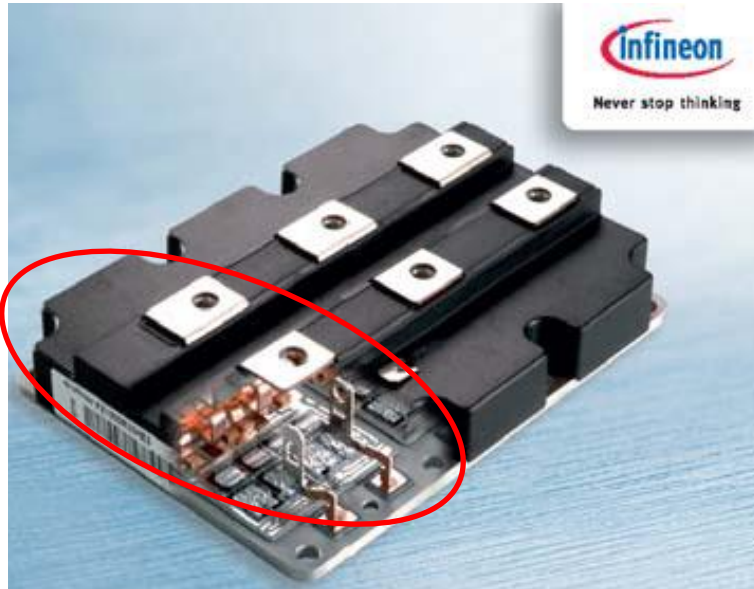


Figure 5. Typical output characteristic
($T_v=150^\circ\text{C}$)

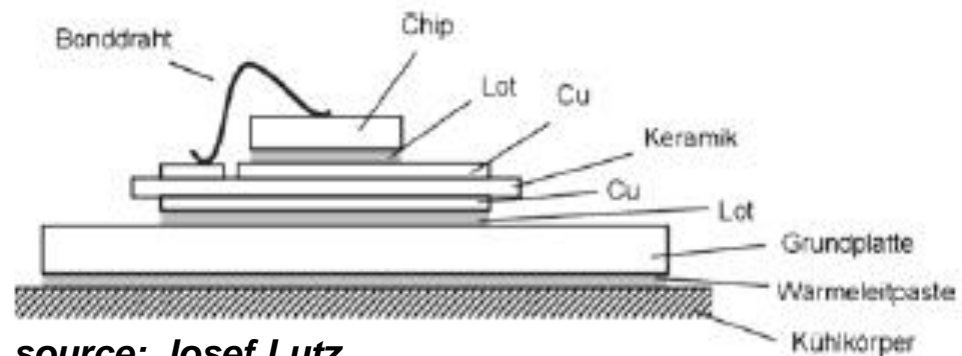
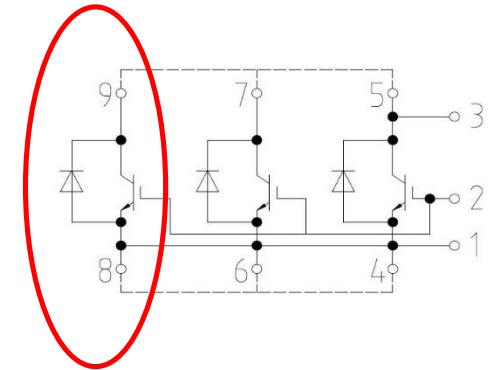
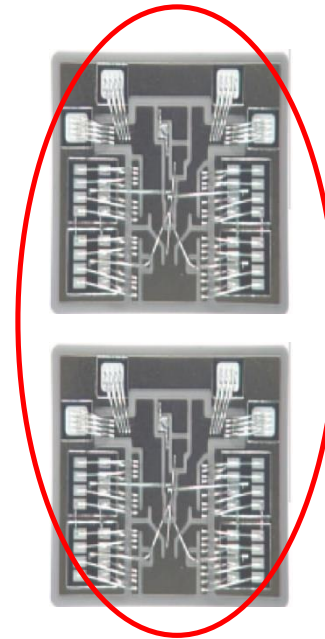
- Die Kennlinien entsprechen denen eines bipolaren Bauelements wie Diode oder Bipolartransistor.
- Der Collector-Strom wird über die Gate-Emitter-Spannung gesteuert.
- Typische Werte für die Durchlassspannung bei Nennstrom liegen bei ca. 1,5 V bis 3 V.
Im Beispiel mit dem Nennstrom 40A sind es 1,7V.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

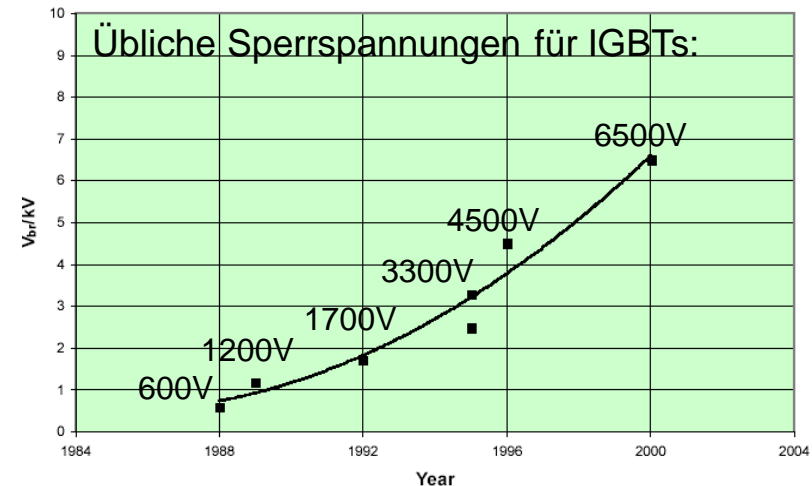
Sperrspannungen 600V bis 6500 V

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

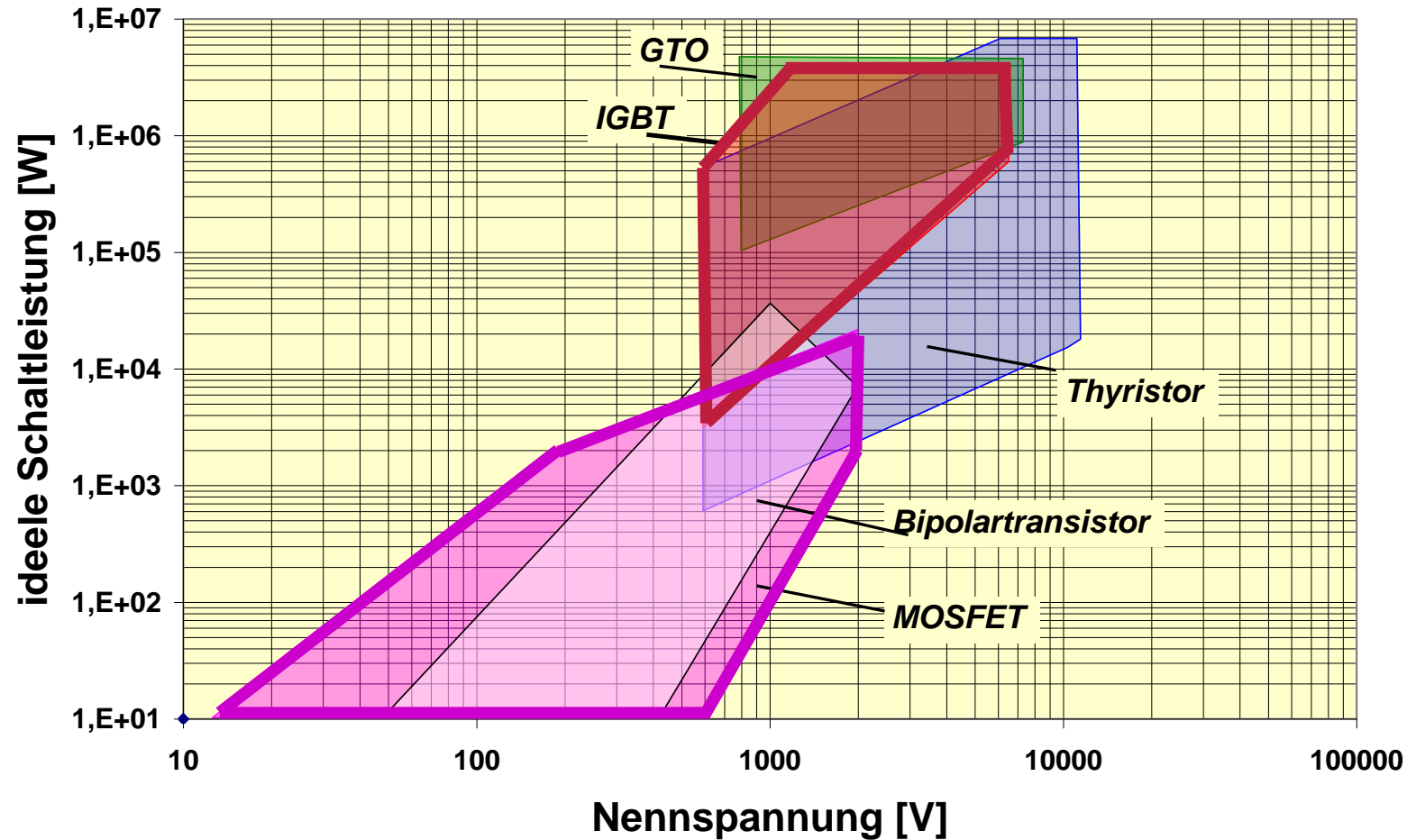
- **Rückwärts-Sperrfähigkeit nur begrenzt gegeben**

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

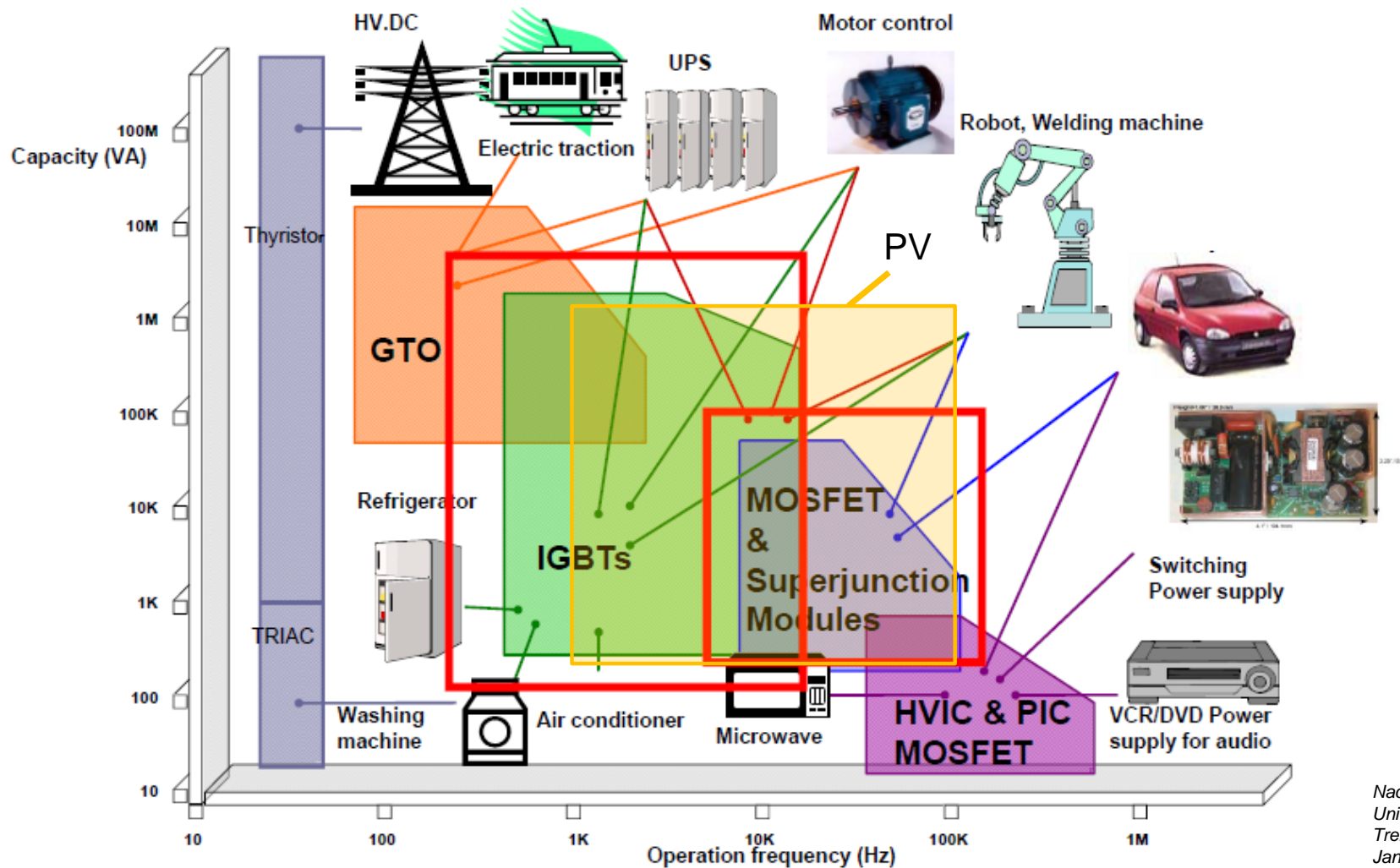
- **Einsatz:** IGBTs werden wie MOSFETs **eingesetzt** in selbstgeführten Schaltungen. Sie sind die heute üblichen Leistungsschalter, z.B. in Antriebs- und Wechselrichtern größerer Leistungen, Back-to-Back-Konvertern in Windenergieanlagen und der Hochspannungsgleichstromübertragung, ...



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?

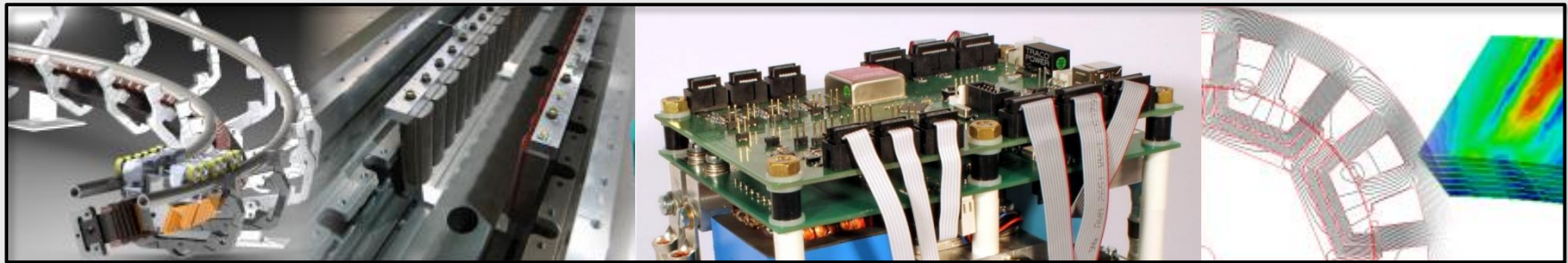
- **Gesteuerte Gleichrichter**
 - M1C, M2C und M3C



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. Robert Keilmann

M: r.keilmann@tu-braunschweig.de

T.: + 49 (0)531 3917910

www.imab.de



NIEDERSÄCHSISCHES
FORSCHUNGSZENTRUM
FAHRZEUGTECHNIK