

5. Leistungselektronik

5.1. Leistungselektronische Bauteile

5.1.1. Allgemeines

Leistungselektronik ist ein Teilgebiet der Elektrotechnik, das sich mit dem Schalten, der Umformung und der Steuerung elektrischer Größen (Strom / Spannung) unter Einsatz von elektronischen Bauelementen befasst.

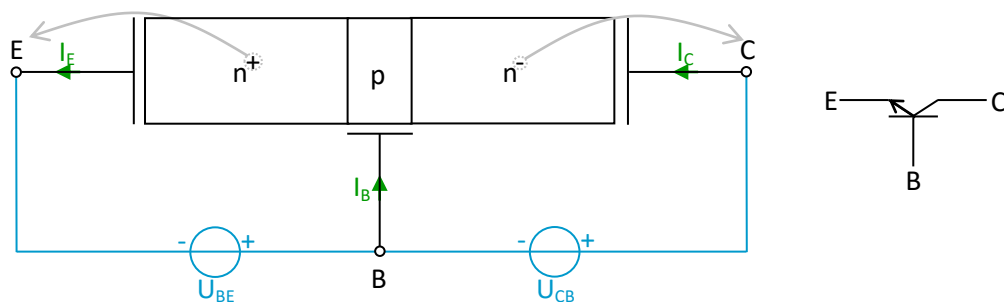
Leistungselektronische Bauteile arbeiten als elektronische Schalter oder Stromrichterventile (Schließen und Öffnen Stromkreise, nur eine Stromrichtung)

Leistungselektronische Bauteile sind z.B. Dioden, Transistoren und Thyristoren.

5.1.2. Bipolarer Leistungstransistor

- **Aufbau & Wirkungsweise**

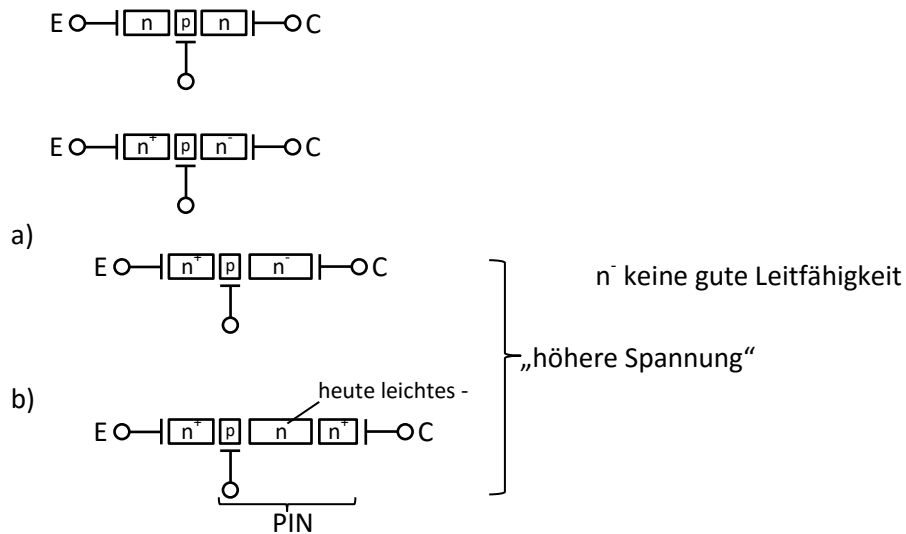
Bei Bipolare Leistungstransistoren wird fast ausschließlich Silizium verwendet, auf dem meist NPN-Leistungstransistoren ausgeführt werden.



Aufbau: Der Emitter ist eine stark dotierte n-Schicht (n^+), die Basis ist eine dünne p-dotierte Schicht und der Kollektor ist eine schwach dotierte n-Schicht (n^-).

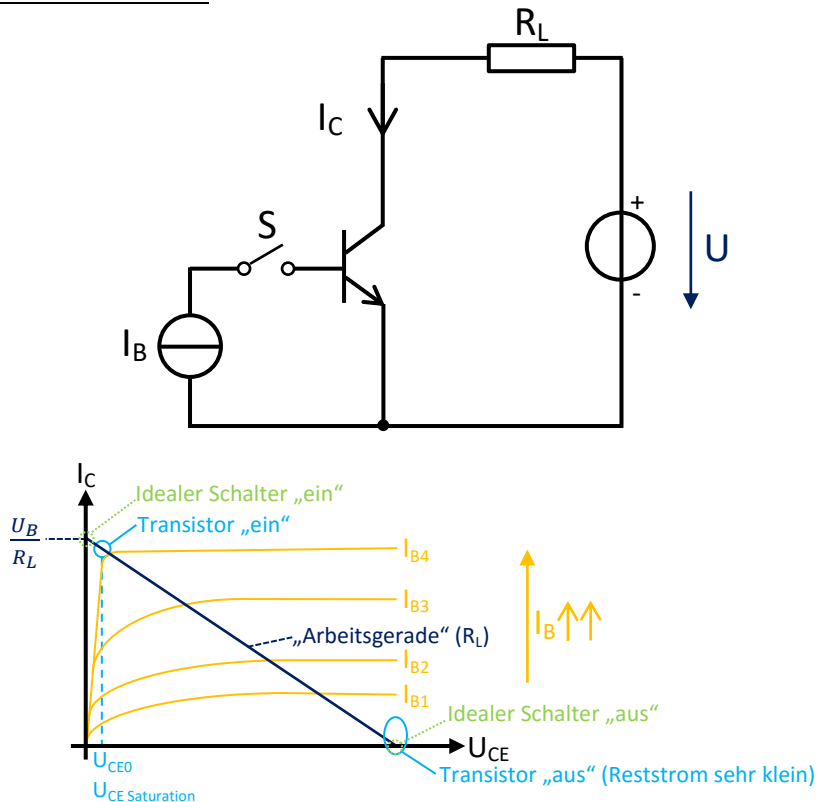
Wirkungsweise: Schließt man an den Halbleiter die beiden Spannungsquellen U_{CB} und U_{BE} an, so ist der Basis-Emitter pn-Übergang in Durchlassrichtung gepolt und es werden Elektronen vom Emitter in die Basis injiziert. Gleichzeitig wandern Löcher (e^+) aus der Basis in den Emitter. Die Überlagerung des Elektronen- und Löcherstroms ergibt den resultierenden Strom I_E . Dadurch, dass der Emitter stärker dotiert ist als die Basis, überwiegt der Elektronenstrom. Die vom Emitter in die Basis injizierten Elektronen rekombinieren nur zu einem geringen Teil in der Basisschicht (dünn und schwach dotiert), die meisten erreichen den Kollektor und bilden gemeinsam mit dem Sperrstrom des Basis-Kollektor pn-Überganges den Kollektorstrom I_C .

Der Bipolartransistor ist eine stromgesteuerte Stromquelle mit der Gleichstromverstärkung $B = \frac{I_C}{I_B}$ []. Die Bezeichnung Bipolartransistor ergibt sich aus der Tatsache dass der Stromfluss auf der Bewegung von Elektronen und Löchern beruht.



Zur Erzielung hoher Sperrspannungen muss die Kollektorschicht n⁻ breit ausgeführt werden und schwach dotiert sein. (Variante a). Dies führt zur Erhöhung des Widerstandes in dieser Schicht, verbesserte Eigenschaften erhält man durch den sogenannten PIN Aufbau (höhere Sperrspannungen bei geringerem Durchlasswiderstand).

- **Transistor als Schalter**



Arbeitspunkte des Transistors:

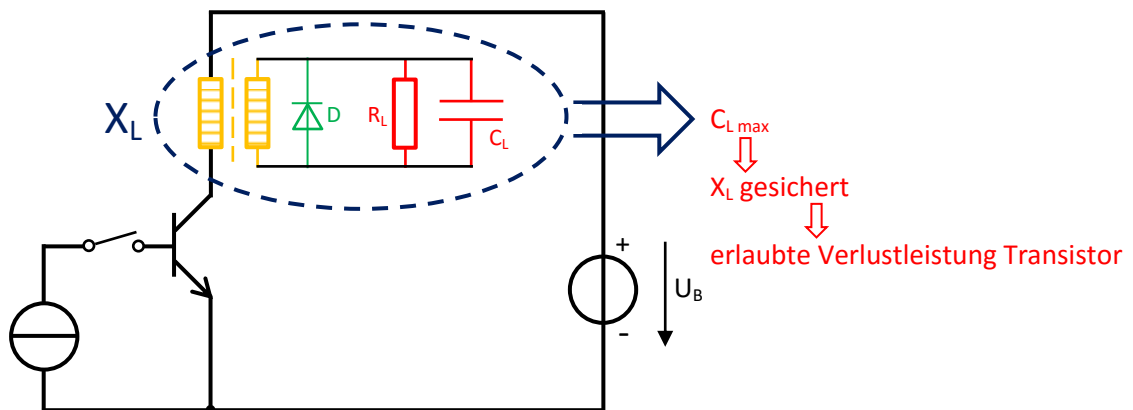
Transistor aus: Es wird kein Basisstrom eingespeist, es fließt ein „kleiner“ Kollektorstrom (Kollektor-Emitter-Reststrom)

Transistor ein: Es wird ein Basisstrom eingespeist, damit der Transistor voll leitet (gesättigt), fast die gesamte Betriebsspannung fällt am Lastwiderstand ab, am Transistor selbst liegt U_{CE0} , die gemeinsam mit dem Kollektorstrom die sogenannte Durchlassverlustleistung bildet.

- **Einschaltvorgang**

Beim Übergang von „Transistor aus“ auf „Transistor ein“ entlang der Widerstandsgerade ist das Produkt $U_{CE} * I_C$ vorübergehend sehr groß. Das bedeutet, dass kurzzeitig eine erhöhte Durchlassverlustleistung auftritt. Um diese Verlustleistung gering zu halten, ist ein steiler Anstieg des Basisstroms bzw. eine hohe Stromverstärkung des Transistors nötig.

Eine weitere Maßnahme zur Verringerung der Verlustleistung ist beispielsweise das Schalten einer Induktivität.



D ist eine Freilaufdiode, die das Auftreten von Überspannungen beim Abschalten des Transistors verhindern soll.

Wichtig ist, dass Leistungstransistoren zu jedem Zeitpunkt innerhalb der vom Hersteller angegebenen Grenzen betrieben wird (SOAR [Safe Operating Area]).

4 Verlustleistungen:

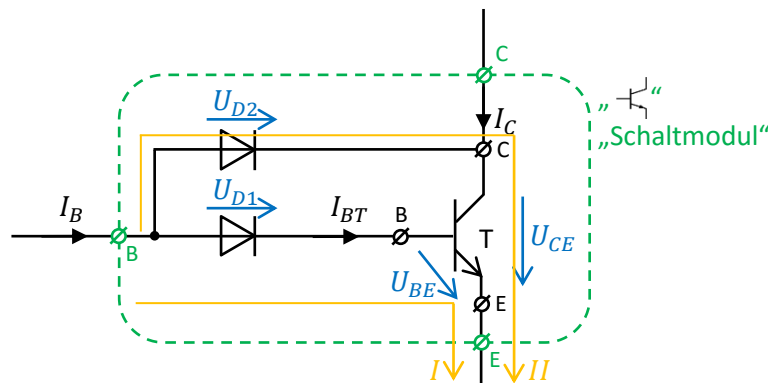
- statisch „Ein“
- statisch „Aus“
- Übergangsverlustleistung „Ein“ auf „Aus“
- Übergangsverlustleistung „Aus“ auf „Ein“

- **Ausschaltvorgang**

Das Ausschalten eines Transistors bedeutet den Wechsel von Transistor „Ein“ auf Transistor „Aus“ entlang der Widerstandsgerade.

Ebenso wie beim Einschaltvorgang ist auch beim Ausschalten die Verlustleistung kurzzeitig erhöht. Um die Ausschaltverlustleistung gering zu halten, muss der Ausschaltvorgang kurz sein.

- Quasisättigung



$$I: \quad U_{D1} + U_{BE} = 0,7 \text{ V} + 0,7 \text{ V}$$

$$II: \quad U_{D2} + U_{CE} = 0,7 \text{ V} + 0,7 \text{ V}$$

$$U_{BE} = U_{CE} = 0,7 \text{ V}$$

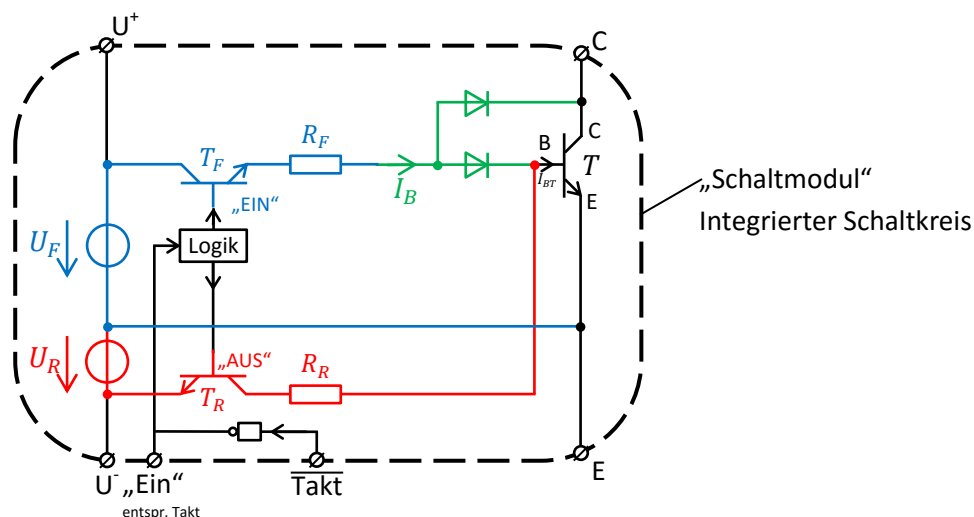
$I_b = 0, I_{BT} = 0$: Transistor sperrt, Diode D2 sperrt ebenso

$0 < I_B < I_{BT_SAT}$: Erhöht man den Basisstrom bis zum Basisstrom des Sättigungspunktes, so fließt I_B gesamt durch den Transistor, $I_C = B * I_B$

$I_B > I_{BT_SAT}$: Erhöht man den Basisstrom weiter, so fließt in den Transistor weiterhin I_{BT_SAT} und der überschüssige Basisstrom fließt über die Diode D2 als zusätzlicher Kollektorstrom ab.

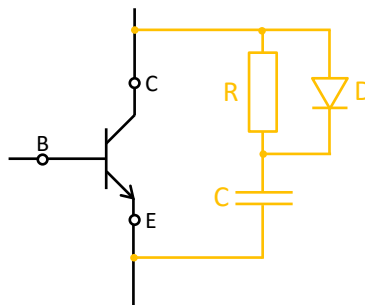
Eine weitere Möglichkeit, den Transistor in Quasisättigungszustand zu halten, ist der Entwurf einer Ansteuerschaltung, die stets einen dem Kollektorstrom angepassten Basisstrom einspeist.

Eine weitere Methodik, den Übergang in den Sperrzustand zu beschleunigen, ist ein kurzzeitiger, negativer Basisstrom beim Ausschalten.



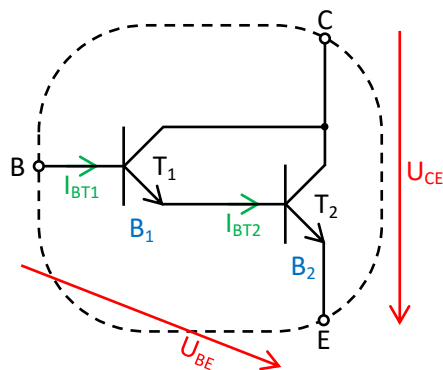
Basis ist ein Bipolarer Leistungstransistor T mit einer Antisättigungsschaltung (D1, D2 [in Schaltung beschriftet]). Durch den Hilfstransistor TF wird ein Vorwärtsbasisstrom in den Transistor T eingespeist und dieser wird leitend. Zum Ausschalten von T wird TF gesperrt und danach der Hilfstransistor TR angesteuert. Dadurch fließt ein „Rückwärtsbasisstrom“, welcher die Ladungsträger aus der Basis-Emitter-Zone entfernt und dadurch den Ausschaltvorgang beschleunigt.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der Ausschaltverluste kann durch die sogenannte RCD-Beschaltung erreicht werden.



Der Kondensator C und die Diode D begrenzen den Anstieg der Kollektor-Emitter-Spannung beim Ausschalten. Während dieser Zeit wird ein Teil des fließenden Kollektorstroms zum Nachladen des Kondensators verwendet und dadurch der Anteil des Kollektorstromes durch den Transistor verringert. Beim nachfolgenden Wiedereinschalten wird über den Widerstand R der Kondensator-Entladestrom über den Transistor auf eine zulässige Belastung begrenzt. Die RCD-Schaltung reduziert die Ausschaltverlustleistung und schützt den Transistor zusätzlich vor Überspannungen.

- **Transistor in Darlington Schaltung**



$$B_{ges} = B_1 * B_2$$

Leistungstransistoren haben eine vergleichsweise geringe Gleichstromverstärkung und benötigen daher für hohe Kollektorströme auch entsprechend hohe Basisströme. Daher kommt in einigen Fällen die so genannte Darlington Schaltung zum Einsatz, wobei diese Anordnung auf einem Kristall untergebracht wird und sich damit in einem Gehäuse befindet.

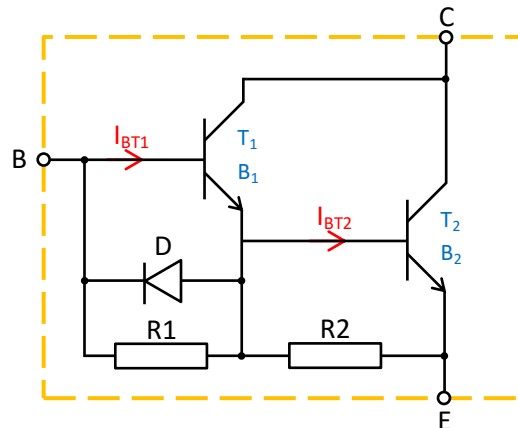
Zweistufige Darlingtonschaltung: Durch diese Anordnung ergibt sich $B_{ges} = B_1 * B_2$ und damit ein geringer Basisstrom für die Ansteuerung von großen Kollektorströmen im Haupttransistor T2.

Nachteile: U_{BE} größer als bei Einzeltransistor, U_{CE_SAT} größer als bei Einzeltransistor

Größter Nachteil im abgeschalteten Zustand des Transistors:

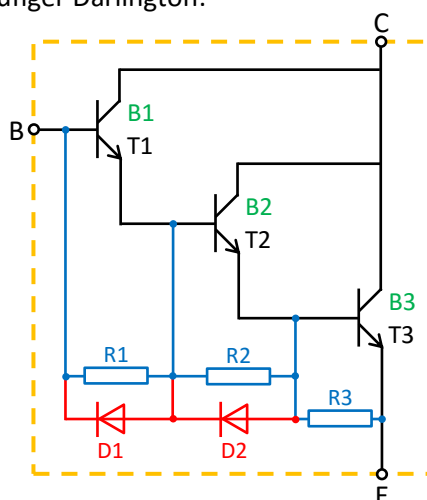
$U_{BE} = 0$, $I_{BT1} = 0$, durch den Transistor T1 fließt ein Kollektor Emitter Reststrom, dieser entspricht dem I_{BT2} des Haupttransistors und wird mit B_2 verstärkt, zusätzlich fließt noch der Kollektor Emitter Reststrom von T2.

Die Summe dieser Ströme verschlechtert den Arbeitspunkt „Transistor AUS“.



Um den Effekt der Kollektor Emitter Restströme zu reduzieren, wird auf dem gleichen Kristall eine Zusatzschaltung integriert. Die Widerstände R1 und R2 werden so dimensioniert, dass im abgeschalteten Zustand der überwiegende Teil des Kollektor Emitter Reststromes von T1 über R2 abfließt und damit nicht mit B verstärkt wird. Die Diode D ermöglicht bei Anwendung eines inversen Basisstromes den Zugang zur Basis von T2, damit kann die Schaltung für den inversen Basisstrom für beide Transistoren angewendet werden und somit die Ausschaltzeiten verringert werden.

Dreistufiger Darlington:



$$B_{ges} = B_1 * B_2 * B_3$$

Nicht verwenden, nur im äußersten Notfall!

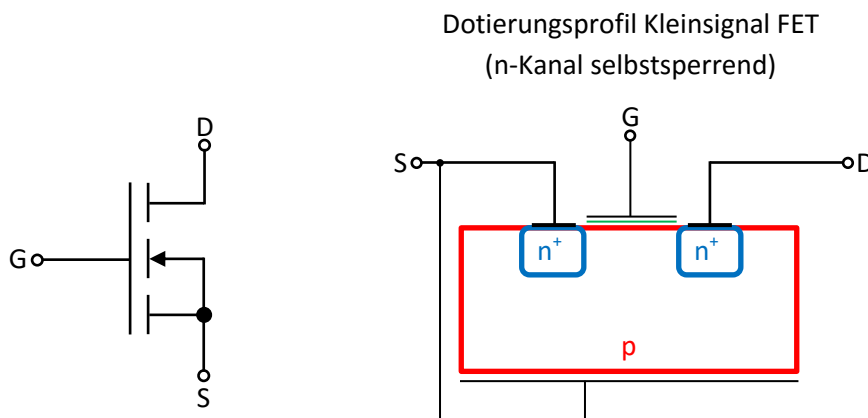
Der dreistufige Darlington ist ebenfalls auf einem gemeinsamen Halbleiter realisiert. Die Schaltung gegen die Kollektor-Emitter-Restströme wird auch im dreistufigen Darlington verwendet (R1, R2, R3, D1, D2). U_{CE_satt} steigt mit steigender Stufenzahl, prinzipiell weist ein einzelner Transistor ein besseres Schaltverhalten auf als ein Darlington.-

5.1.3. Leistungs-FET

- Aufbau & Wirkungsweise**

4 Arten:

n-Kanal	selbstsperrend	bevorzugt
p-Kanal	selbstsperrend	
n-Kanal	selbstleitend	Leistungselektronik
p-Kanal	selbstleitend	



In einem p-dotiertem Substrat werden 2 stark dotierte (n^+)-Inseln eingebracht. In der Mitte des Substrats befindet sich getrennt durch eine Isolationsschicht (SiO_2) eine Elektrode als Gate. Eine der Inseln wird direkt mit einer Elektrode kontaktiert und ergibt den Drain-Anschluss, die Andere Insel wird ebenfalls kontaktiert und ergibt den Source-Anschluss gemeinsam mit der Elektrode auf der Unterseite des Halbleiters.

$U_{GS} = 0V$: Es fließt kein Drain-Strom. Zwischen der rechten n-Insel und dem p-Substrat besteht eine Sperrschicht, die den Stromfluss verhindert.

$0 < U_{GS} < U_{\text{Einsatz}}$: Unterhalb der Gate-Elektrode kommt es zu einer Elektronenanreicherung, diese freien Elektronen werden von der Gate-Elektrode angezogen. Ist U_{GS} groß genug, ist die Anzahl der freien Elektronen größer als die Zahl der Löcher, dadurch wird das ursprünglich p-leitende Material n-leitend. Damit werden bei U_{Einsatz} die beiden n-leitenden Inseln mit einem n-leitenden Kanal verbunden (Inversionskanal) und es fließt ein Drain-Strom von D nach S.

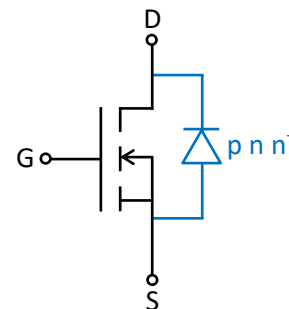
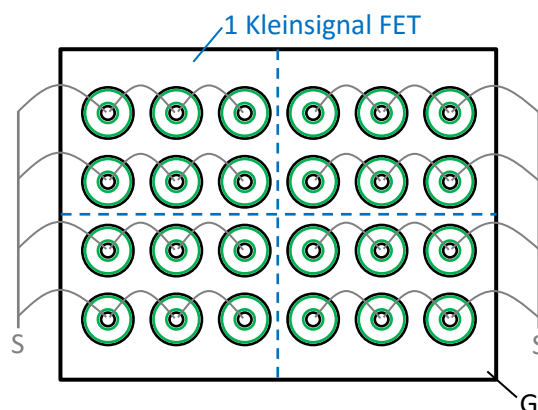
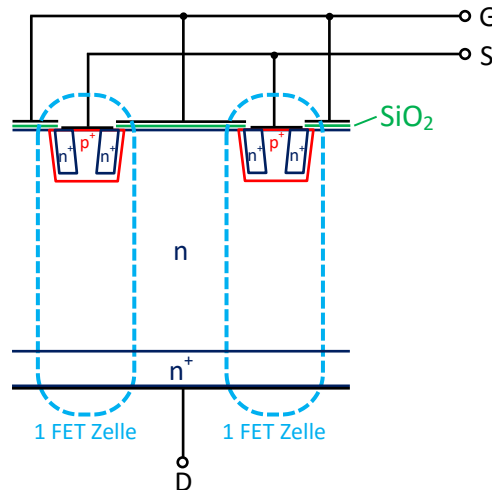
$U_{\text{Einsatz}} \leq U_{GS}$: Durch weiteres Erhöhen von U_{GS} wird der hochohmige n-leitende Kanal immer niederohmiger, bis der Minimalwert r_{DSon} erreicht wird.

Der Strom beruht ausschließlich auf der Bewegung von Elektronen, daher auch die Bezeichnung Unipolartransistor. Der von Drain nach Source erzeugte, leitfähige Kanal wird durch ein elektrisches Feld verursacht, welches zwischen Gate-Elektrode und Substrat besteht. Daher auch die Bezeichnung Feldeffekt-Transistor.

Durch U_{GS} wird zwischen Drain und Source ein n-leitender Kanal verursacht, daher auch die Bezeichnung n-Kanal FET oder n-Kanal Typ.

Ein p-Kanal FET hat gegenüber einem n-Kanal FET den Nachteil eines größeren spezifischen Widerstandes, daher sind meistens zu Erzielung gleicher elektrischer Daten auch größere Abmessungen erforderlich.

Für große Leistungen (große Ströme) werden die FETs (FET-Zellen) parallel geschaltet.



Der dargestellte n-Kanal Typ besteht aus 2 parallel-liegenden FET-Zellen. Bei Anlegen einer positiven Steuerspannung U_{GS} kommt es zu einer Elektronenanreicherung unter der Gate-Elektrode im p^+ -Gebiet und es entsteht eine erste n-leitende Verbindung zwischen Drain und Source.

Die mittlere n-dotierte Schicht (Substrat) legt mit ihrer Dicke die Sperrfestigkeit fest. Um im voll leitenden Zustand einen möglichst kleinen R_{Dson} zu erhalten, wird im Bereich der Drain-Elektrode eine n^+ -Schicht gesetzt, als „Vorratsbehälter“.

Die Anordnung enthält zusätzlich eine Diode ($p^+ n n^+$), sodass der FET in Rückwärtsrichtung keine Spannung aufnehmen kann (Inversdiode).

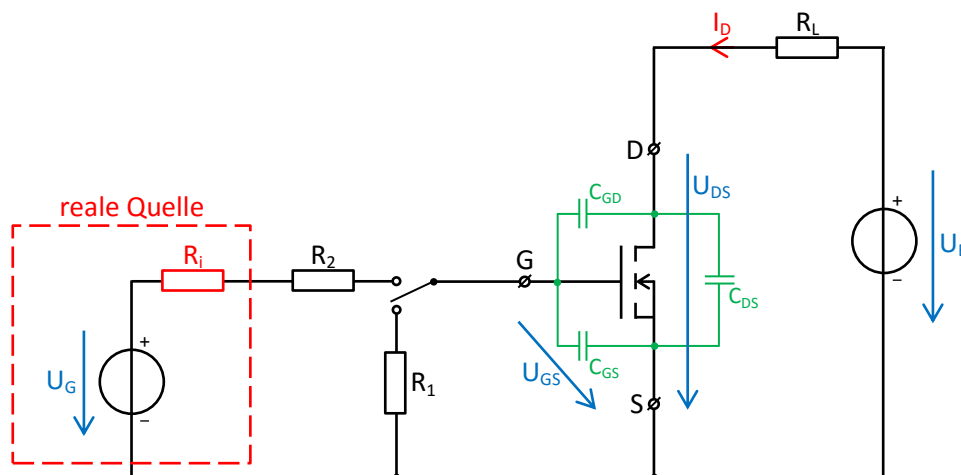
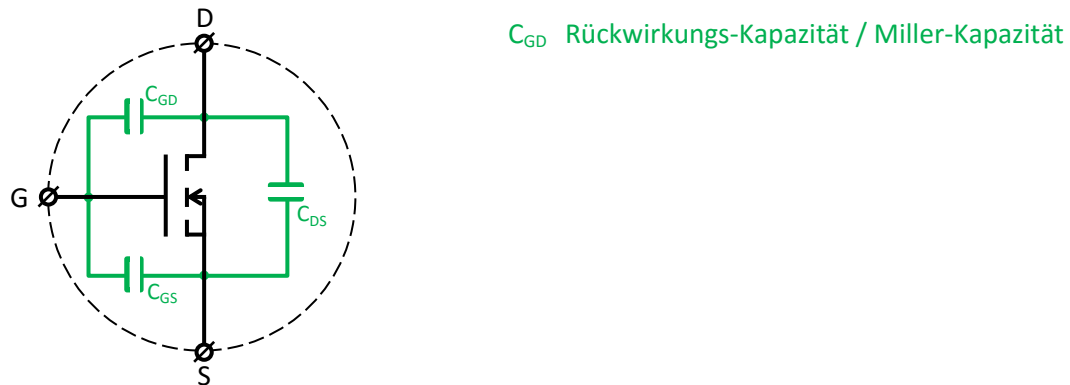
Weiteres Bauteil in der Anordnung ist der Bipolar-Transistor npn, wobei die Basis-Emitter-Strecke durch die Source-Elektrode kurzgeschlossen ist.

Im Gegensatz zum Bipolar-Transistor ist beim FET der Durchlasswiderstand weitestgehend unabhängig vom fließenden Strom.

FETs mit höherer Sperrspannung haben auch einen erhöhten Durchlasswiderstand $R_{DS(on)}$, daher sollten beim Designen von Schaltungen bzw. bei Reparaturen keine unnötig hohe Sperrspannung dimensioniert werden.

- **Schaltverhalten Leistungs-FET**

Vereinfachtes ESB



$$U_{GS} = 0V$$

Gate und Source sind über den Widerstand R_1 verbunden. Die wirksame Eingangskapazität $C_i = C_{GD} + C_{GS}$ ist vollständig entladen.

$$\xrightarrow{0 \leq U_{GS} \leq U_{ON}}$$

Zum Einschalten wird der Schalter umgelegt und U_G angeschlossen. U_{GS} kann nicht sprunghaft ansteigen, da die wirksame Eingangskapazität über die Widerstände $R_i + R_2$ geladen wird. Nach einer gewissen Zeit wird die Einsatzspannung erreicht (leitfähiger Kanal), es setzt der Stromfluss ein und U_{DS} wird kleiner. Durch die Rückwirkungskapazität $C_{GD}(U_{DS})$ [ändert ihren Wert in Abhängigkeit von U_{DS}] ändert sich die Eingangskapazität, es muss nachgeladen werden und dadurch wird das Einschalten des FETs ein weiteres Mal verzögert.

$$\xrightarrow{U_{ON} \geq U_{GS} \geq 0}$$

Der FET wird wieder ausgeschaltet, die in der Eingangskapazität vorhandene Ladung wird über R_1 abgeführt. U_{DS} steigt, damit verändern sich die Ladungsverhältnisse am FET. Erst wenn die Einsatzspannung unterschritten wird, sperrt der FET.

$$T_{\text{EIN}}: \begin{matrix} (R_1 + R_2) \\ R_1 \end{matrix}, \begin{matrix} C_i \\ C_i \end{matrix}$$

Dimensionierung
der Ansteuerung

FET

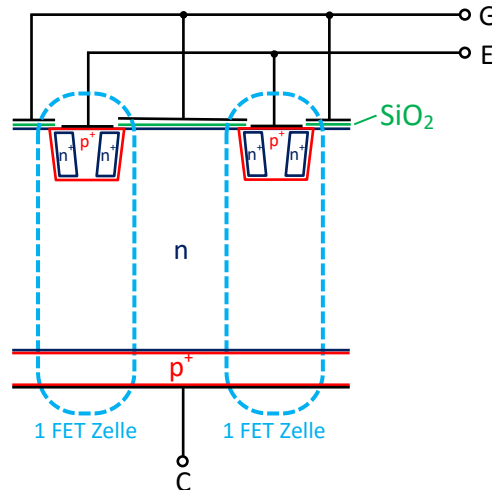
Für das Abschalten des FET kann auch eine negative Spannung U_{GS} verwendet werden, die auch nach dem Abschaltvorgang angelegt bleiben kann (Erhöhung der Störsicherheit). Je höher die Schaltfrequenz des FET wird, desto kürzer ist die Zeit für das Umladen der wirksamen Eingangskapazität, dadurch steigen die Ladeströme ($I = Q/t$) und damit werden für schnelle Schalter auch nennenswerte Steuerleistungen benötigt.

- FETs schalten schneller als Bipolar-Transistoren, daher ist auch die Verlustleistung geringer
- Als Schutz gegen Überspannungen werden FETs mit einer RCD-Schaltung versehen, welche auch die Ausschaltverlustleistung verringert.

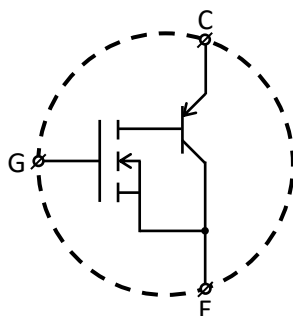
5.1.4. IGBT

Isolated Gate Bipolar Transistor

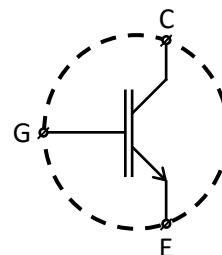
- **Aufbau & Wirkungsweise**



„Innenschaltung“:



Schaltplansymbol:



Das Bauteil entspricht im Bereich Emitter und Gate den Aufbau eines Leistungs-FETs. Im Bereich Kollektor-Emitter ergibt sich ein pnp-Transistor ($p^+ n p^+$).

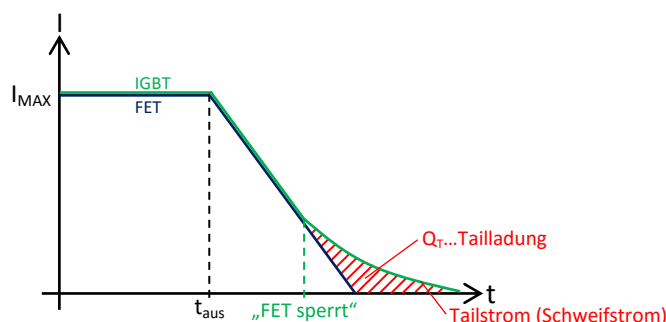
- $U_{GE} = 0V$: Der FET leitet nicht, daher kein Basisstrom für pnp-Transistor -> Bipolartransistor sperrt in beide Richtungen.
- $U_{GE} > 0V$ Legt man eine positive Spannung U_{GE} an, so kommt es in den p+-Gebieten unter der Gate-Elektrode zu einer Elektroden-Anreicherung, bis sich bei der Einsatzspannung ein erster leitfähiger Kanal ausbildet. Der nun fließende Strom fließt in das n-Substrat (Basis des Bipolar-Transistors) und bildet damit dieser leitend wird.
- Im Dotierungsprofil ergibt sich wie beim FET ein zusätzlicher npn-Transistor mit kurzgeschlossener Basis-Emitter-Strecke (für grundsätzliches Verhalten nicht relevant).
- Die Innenschaltung (=vereinfachtes ESB) zeigt eine von einem selbstsperrenden FET und von einem pnp-Transistor gebildete Darlingtonschaltung.

Der IGBT sperrt Grundsätzlich auch in Rückwärtsrichtung, was in vielen Fällen nicht benötigt wird. Daher werden diese für verkleinerte Rückwärtssperrspannungen konzipiert und dadurch die Durchlasseigenschaften verbessert.

IGBTs haben gegenüber FET bei Bauteilen niedriger Sperrspannung immer den höheren Durchlasswiderstand. IGBTs werden bei mittleren Sperrspannungen (einige 100V) bis zu hohen Sperrspannungen verwendet. Bei niedrigen Sperrspannungen ist generell ein FET zu bevorzugen.

- **Schaltverhalten**

- Ansteuerung wie beim FET
- Einschaltvorgang:
Beim Einschaltvorgang wird zunächst die wirksame Eingangskapazität geladen, bis der Treiber-FET leitend wird. Zu diesem Zeitpunkt ist der Durchlasswiderstand des pnp-Transistors noch sehr hoch. Mit steigender Löcherdiffusion (I_B steigt) wird der Durchlasswiderstand auf seinen minimalen Endwert reduziert.
- Ausschaltvorgang:



Beim Ausschalten des IGBTs wird zunächst die wirksame Eingangskapazität entladen. Wird die Einsatzspannung unterschritten, sperrt der FET und es können keine Löcher aus der Basis des pnp-Transistors abfließen. Diese Löcher werden durch Rekombination abgebaut und daraus ergibt sich ein langsam zurückgehender Strom (Tailstrom). Beim FET tritt kein Tailstrom auf, beim IGBT ist im Bereich des Tailstroms die schraffierte Fläche die so genannte Tailladung.

- Zusatzbeschaltung:
Zum Schutz gegen Überspannungen wird beim IGBT meist die RCD-Schaltung angewendet (auch Reduktion der Ausschaltverlustleistungen).
Zur Erhöhung der Störsicherheit von ungewolltem Einschalten kann an U_{GE} eine negative Spannung angelegt werden.