

Vorlesung 1 – zusätzliches Thema

Feldeffekt- und Bipolar-Transistor

Es gibt zwei Transistorarten - bipolare Transistoren und Feldeffekt-Transistoren (FETs). Beide basieren auf quantenmechanischen Eigenschaften von Halbleitern: Elektronen, die für Strom relevant sind, (Valenzelektronen) können sich in zwei Energiebänder aufhalten (Abbildung 1). Wenn das Valenzband voll ist, und das Leitungsband leer, leitet der Halbleiter keinen Strom. Das entspricht einem reinen Halbleiter auf niedriger Temperatur. Es widerspricht unserer Intuition: Ein Energieband ist voll von Elektronen, aber die Elektronen „bewegen“ sich im E-Feld nicht - es fließt kein Strom. Eine Erklärung: Ein Elektron kann sich nur dann bewegen, wenn es unbesetzte Quantenzustände (Quantenstellen) im Energieband gibt.

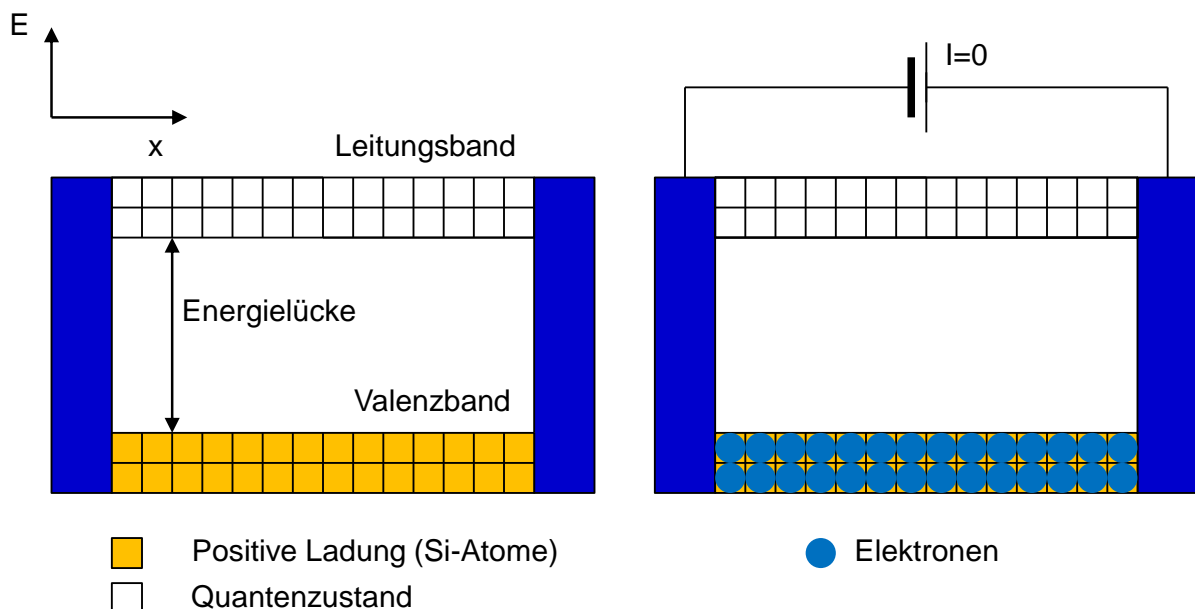


Abbildung 1: Halbleiter ohne Dotierung (intrinsischer Halbleiter) auf niedriger Temperatur. Valenzband ist voll (rechts), alle Quantenzustände sind belegt. Die Elektronen können sich nicht „bewegen“ und es fließt kein Strom.

Wenn man dem Halbleiter Donator-Atomen (z.B. Phosphor) hinzufügt (etwa ein Silizium von Million Silizium Atomen wird durch Donator-Atom ersetzt), spendieren diese Atomen ihre Elektronen, die sich dann im Leitungsband bewegen können. Wir bekommen N-Typ Halbleiter. Wenn Kristallgitter perfekt wäre, würden sich diese Elektronen wie die Elektronen im Vakuum verhalten. (Sie würden im E-Feld gleichmäßig beschleunigen.) Ein elektrischer Widerstand entsteht, weil die Elektronen mit Phononen, Donator-Atomen, und anderen Verunreinigungen zusammenstoßen.

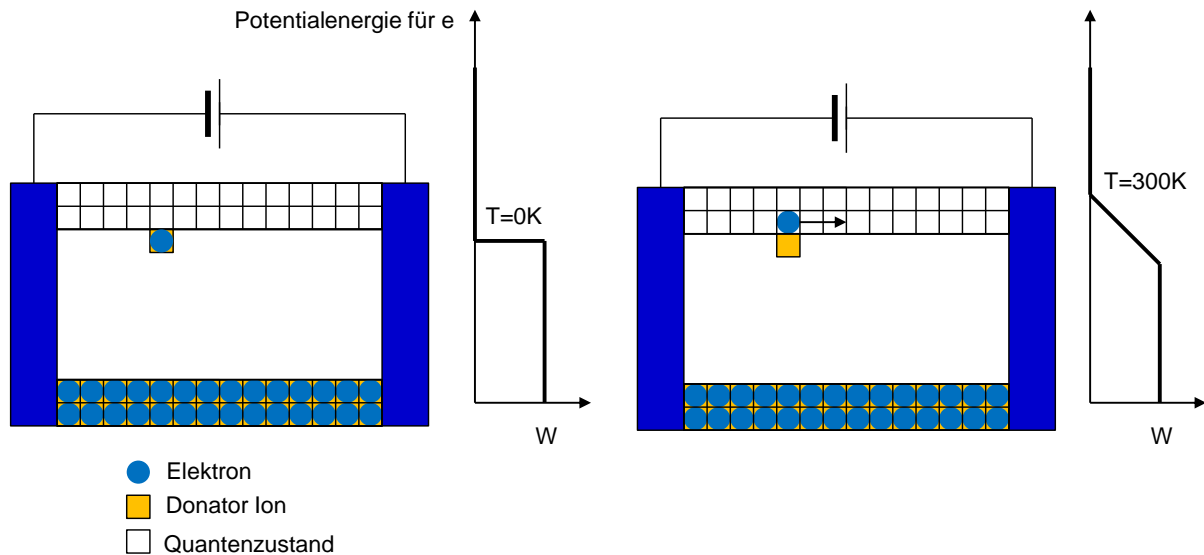


Abbildung 2: Ein Donator ist ein Quantenzustand (Q-Zustand) für Elektron. Dieser Q-Zustand befindet sich in der Nähe vom Leitungsband. Ein Donator-Zustand ist positiv geladen wenn frei. Die Wahrscheinlichkeit dass ein Q-Zustand belegt ist (W) ist durch Fermi-Dirac Statistik gegeben. Auf $T=0\text{ K}$ (linke Abbildung), enthalten noch alle Donator-Atomen ihre Elektronen. Es gibt keine Elektronen in Leitungsband. Das ändert sich für $T=300\text{ K}$ (Abbildung rechts). Nun sind fast alle Donator-Atomen frei von Elektronen (ionisiert). Die freigesetzten Elektronen befinden sich im Leitungsband, da sonst die Struktur positiv geladen wäre. Beachten wir, dass noch viele Quantenzustände in Leitungsband frei sind. Die Dichte der Q-Zustände in Leitungsband ist etwa 10^{22}cm^{-3} (gleich wie die Dichte der Atomen in Silizium). Typische Dichte von Donatoratomen ist 10^{16}cm^{-3} .

Wenn man dem Halbleiter Akzeptor-Atome hinzufügt, können die Elektronen aus dem Valenzband auf die Akzeptor Atome übergehen. Es bleiben die unbesetzten Stellen („Löcher“) im Valenzband. Dann können sich die Valenzelektronen im E-Feld bewegen (Abbildung 3). Den Strom kann man modellieren indem man annimmt, dass sich eine leere Stelle (Loch) wie ein positives Teilchen im E-Feld

bewegt.

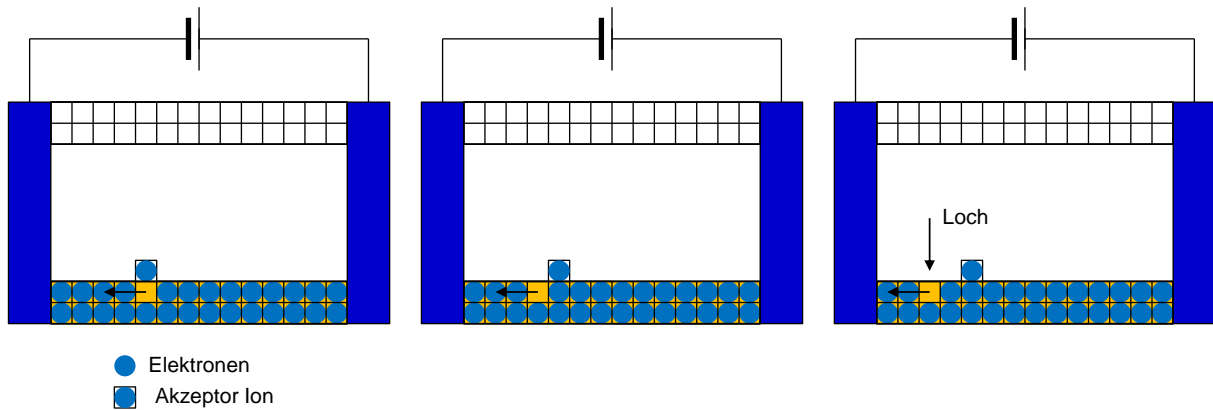


Abbildung 3: Auch ein Akzeptor ist ein Quantenzustand. Dieser Q -Zustand befindet sich in der Nähe vom Valenzband. Ein Akzeptor-Zustand ist negativ wenn voll. Auf Zimmertemperatur enthalten die meisten Akzeptoren ein Elektron. Eine positiv geladene leere Stelle (ein Loch) bleibt im Valenzband.

Oft wird ein Energiediagramm wie in Abbildung 4 gezeigt.

Elektronen sammeln sich in den Bereichen im Leitungsband mit niedrigerer Potentialenergie. (Rechts in Abbildung 4) Löcher sammeln sich in den Bereichen im Valenzband, die einer höheren Potentialenergie für Elektronen entsprechen. (Links in Abbildung 4) Dort ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron fehlt größer. In einem mittleren Bereich (PN-Übergang, Sperrschicht, Verarmungszone) sind die Quantenstellen im Valenzband belegt – es gibt keine Löcher. Die Stellen im Leitungsband sind leer – es gibt keine freien Elektronen. Deswegen ist die Ladung von Akzeptor- und Donator-Ionen nicht kompensiert und es entstehen Raumladungen. Diese Ladungen verformen die Energiebänder.

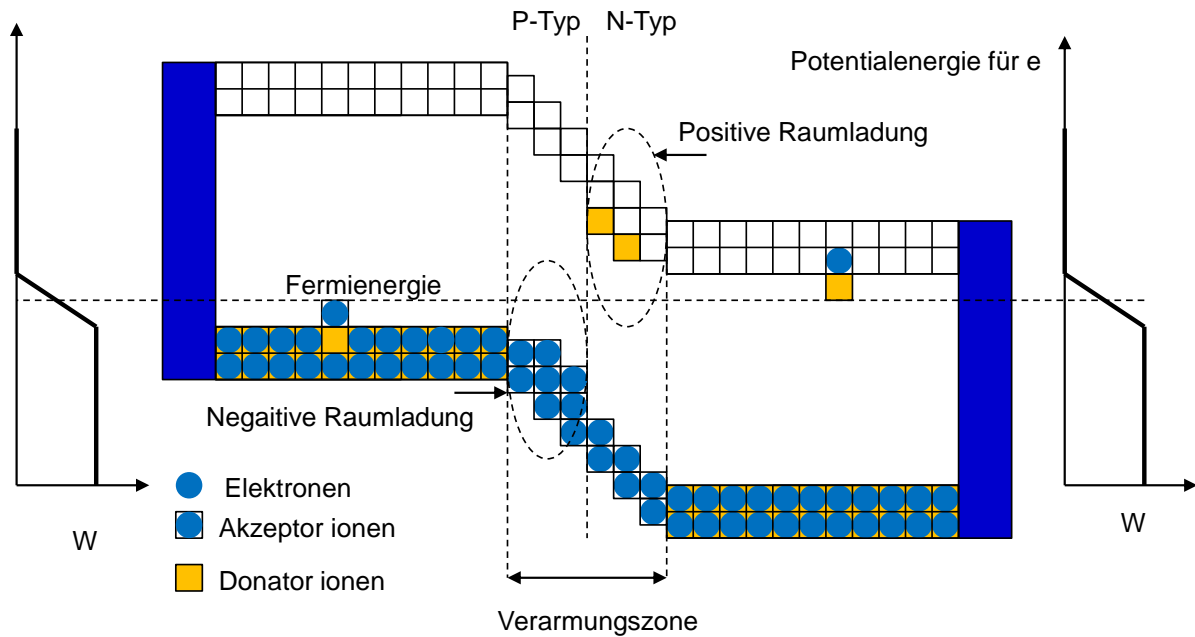


Abbildung 4: PN-Übergang, bzw. Diode. Keine externe Spannung ist angelegt, kein Strom fließt, deswegen ist das „System“ (die Diode) im Gleichgewichtszustand. Dann ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Quantenstelle belegt ist (W) überall durch identische Formel bestimmt – die Fermi Energie ist überall gleich. Die Energiebänder (und das elektrische Potential) verformen sich. Am P-N Übergang (in der Verarmungszone) entsteht das E-Feld. In der Verarmungszone sind die Quantenstellen im Valenzband belegt – es gibt keine Löcher. Die Stellen im Leitungsband sind in der Verarmungszone leer – es gibt keine freien Elektronen. Deswegen ist die Ladung von Akzeptor- und Donator-Ionen nicht kompensiert und es entstehen Raumladungen.

Beide Arten von Transistoren (MOSFET und bipolar) basieren auf einer NPN (oder PNP) Struktur.

Für diese Struktur gelten die Diagramme wie in Abbildung 5.

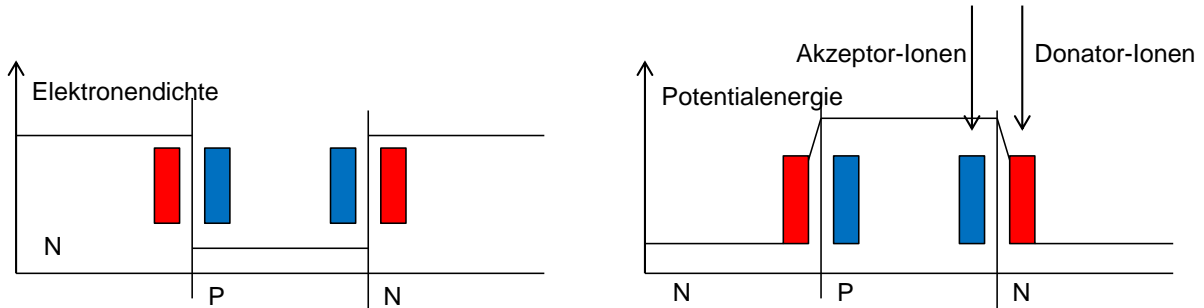


Abbildung 5: NPN Struktur. Links: Elektronendichte als Funktion von Position. Rechts: Potentialenergie als Funktion von Position. Die Raumladungen sind ebenfalls gekennzeichnet: rot positive Donator-Ionen und blau negative Akzeptor-Ionen.

Die N-Bereiche haben niedrigere Potentialenergie. (Donator-Ionen sind positiv – sie ziehen die Elektronen an.)

Wir würden gerne den Strom zwischen zwei N-Bereichen kontrollieren. Das kann man auf zwei Arten machen: Wir können das Potential des mittleren P-Bereichs oder den Strom durch ihn verändern. Es ist wichtig, dass für diese Ansteuerung weniger Leistung verbraucht wird als die Stromänderung zwischen N-Bereichen erzeugt.

Feldeffekt Transistor

Ein Feldeffekt Transistor basiert auf der Veränderung der Potentialbarriere durch die angelegte Spannung. Die einfachste Auslegung ist der Feldeffekt Transistor basierend auf der Metall-Oxid-Halbleiter Struktur (MOSFET). Oberhalb des P-Bereichs befindet sich ein Kondensator mit einer Gate-Elektrode (Abbildung 6). Ohne Spannung zwischen dem Gate und dem linken N-Bereich (Source) leitet die Struktur nicht.

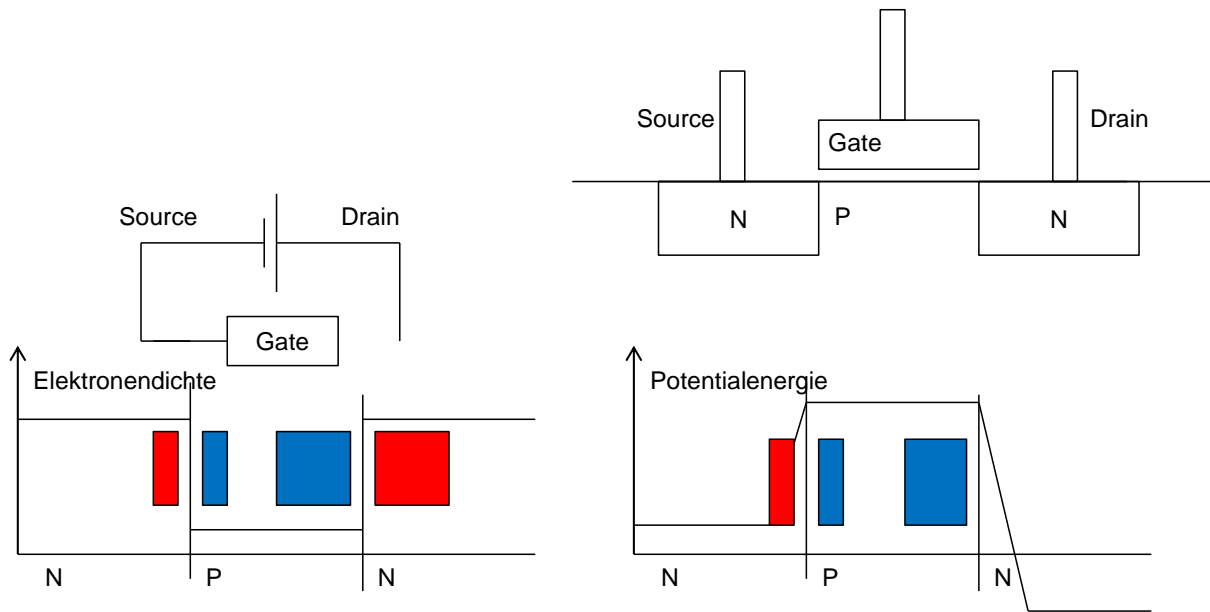


Abbildung 6: Feldeffekt-Transistor

Wenn wir die Gate-Elektrode an positive Spannung legen, verringert sich die Potentialbarriere.

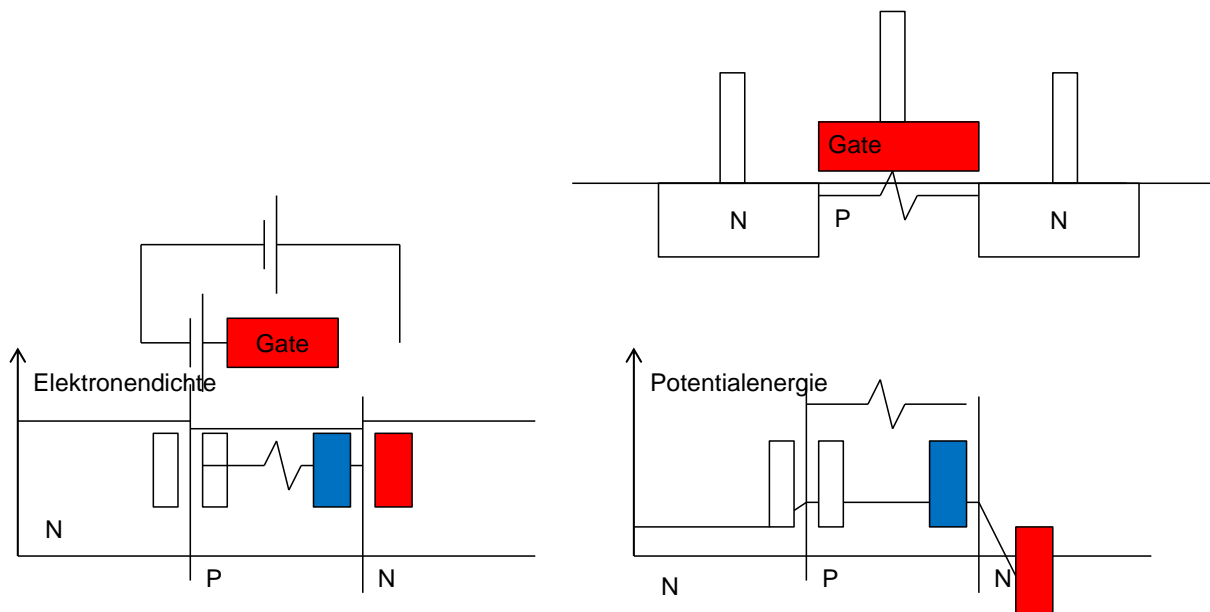


Abbildung 7: Feldeffekt-Transistor leitet

Wenn die Potentialbarriere klein wird, können die Elektronen wie in einem elektrischen Leiter zwischen zwei N-Bereichen fließen. Aus dem P-Bereich wird ein N-Bereich, es kommt zur Inversion.

Der Strom hängt von Gate-Source Spannung ab. Für digitale Schaltungen sind folgende Eigenschaften wichtig: Ein MOS Transistor mit hoher Gate-Source

Spannung verhält sich wie ein geschlossener Schalter. Ein MOS Transistor mit niedriger Gate-Source Spannung wie ein offener Schalter.

Es gibt auch einen komplementären MOS Transistor, der auf PNP Struktur basiert. Hier sind die Löcher die Ladungsträger. Um einen Löcher-Kanal zu bilden benötigt man negative Gate-Source Spannung. Ein PMOS leitet, wenn seine Gate Elektrode auf einem niedrigen Potential steht.

Folgende Eigenschaften sind wichtig:

- Nur eine Art der Ladungsträger ist relevant für den Strom.
- Der Strom fließt nur unmittelbar unter dem Isolator – es ist ein „Oberflächenstrom“.
- Eine dünne Isolator-Lage ist wichtig, sonst ist die Gate-Source Schwelle-Spannung, ab welcher der Transistor leitet, zu hoch.

Bipolartransistor

Die Funktionsweise eines bipolaren Transistors ist komplizierter.

Bei einem bipolaren Transistor, fließt der Strom durch das ganze Volumen des Materials – nicht nur an der Oberfläche.

Wir haben wieder eine NPN Struktur. Die P-Lage ist dünn.

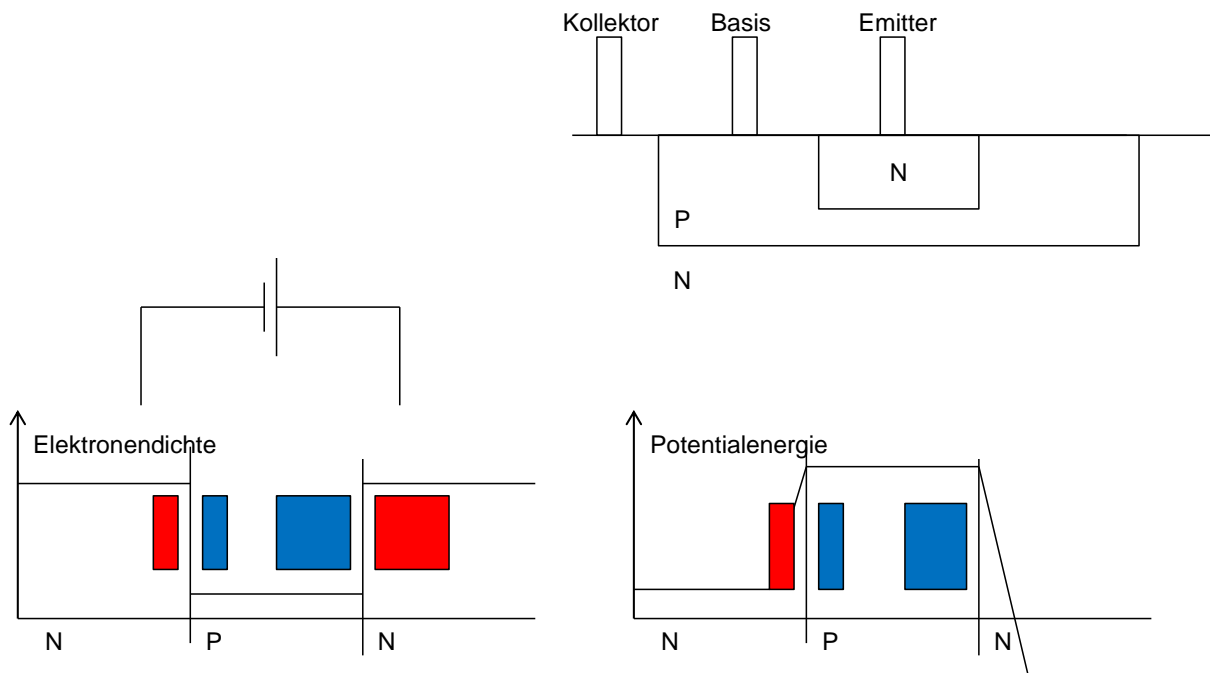


Abbildung 8: Bipolartransistor

Hier hat die P-Lage eigenen Kontakt. Dieser Kontakt dient zur Regelung. Wenn es keine Spannung zwischen dem P-Bereich (Basis) und dem linken N-Bereich (Emitter) gibt, sperrt der Transistor. Elektronen können die Potentialbarriere nicht überwinden. Wenn wir an Basis eine Stromquelle anschließen, leitet die PN Diode und die Potentialbarriere wird niedriger. Trotzdem bleibt die Barriere erhalten, und es bildet sich kein Elektronen-Kanal, wie im MOSFET. Der P-Bereich bleibt P. Es werden lediglich die Elektronen als Minoritätsträger in Basis injiziert.

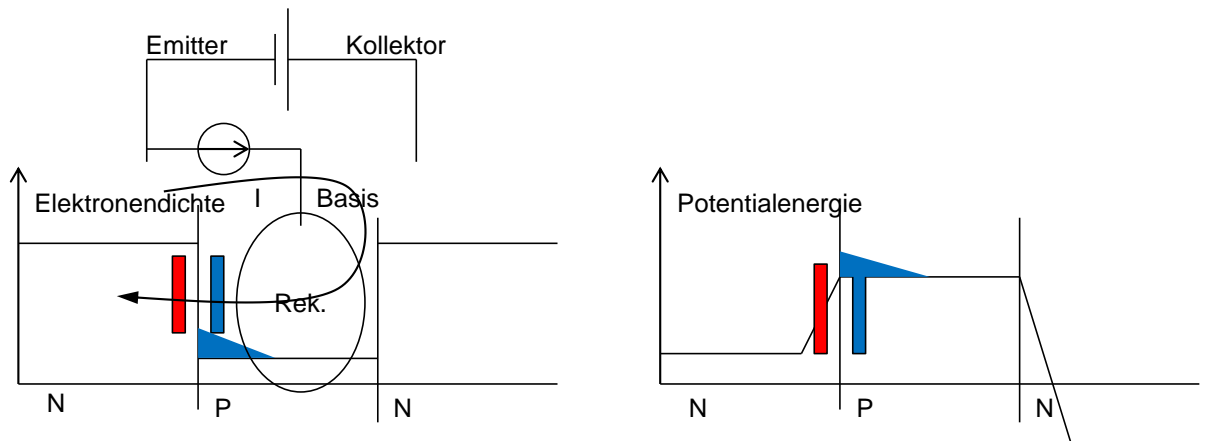


Abbildung 9: Basis ist zu lang.

Sie gelangen dort da sie genügend thermische Energie besitzen. Wegen Injektion, ist die Elektronendichte höher nah am Emitter als tiefer in Basis. Die Elektronen bewegen sich durch P-Bereich durch Diffusion. Wenn Basis zu lang wäre, wie in der Abbildung 9, würden die injizierten Elektronen nach einer Weile mit den in Basis vorhandenen Löchern rekombinieren. Das heißt, die überschussige Elektronen würden „in die Löcher fallen“. Wenn aber Basis sehr dünn ist (Abbildung 10), ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass ein injiziertes Elektron am Rande des Kollektors gelangt, ohne vorher zu rekombinieren. Sobald das passiert, wird das Elektron vom Kollektor aufgesaugt.

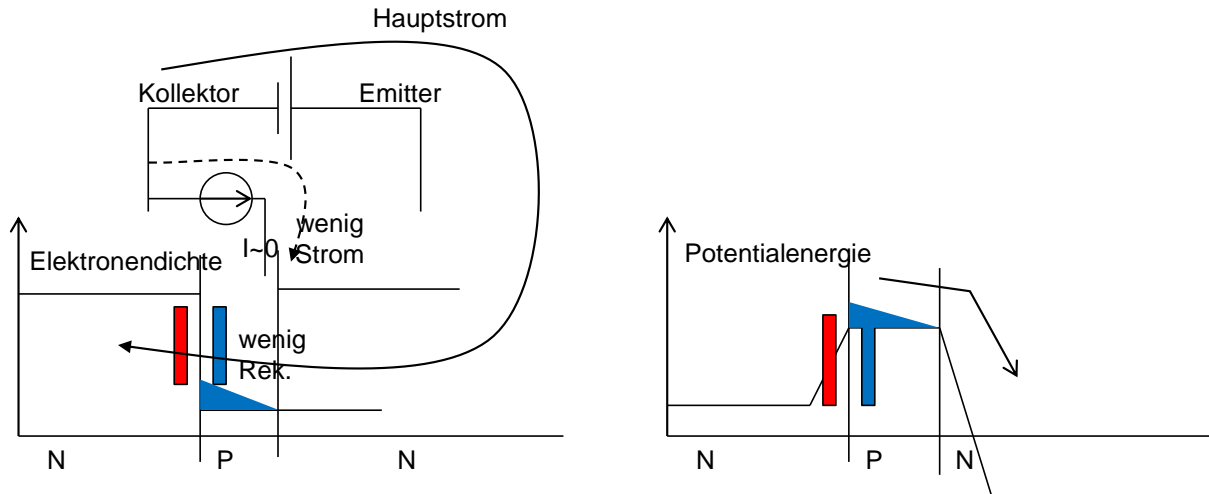


Abbildung 9: Bipolartransistor. Elektronen können vom Emitter in den Kollektor durch Diffusion fließen. Der Kollektor-Emitter Strom hängt vom Basis-Strom ab.

Wir möchten, dass möglichst viele Elektronen in den Kollektor gelangen und dass möglichst wenige Elektronen rekombiniert werden. Die rekombinierten Elektronen bilden einen Basis-Strom. Wir möchten also bei einem möglichst kleinen Basisstrom einen großen Kollektor-Emitter Strom erreichen. Das kann man erzielen wenn der Basiskontakt dünn und die Beweglichkeit der Elektronen groß sind.

Der Strom zwischen dem Kollektor und dem Emitter ist ein Diffusionsstrom. Er entsteht wegen eines Dichte-Abfalls (Gradient) in Basis vom Emitter bis zum Kollektor. Der Kollektor-Emitter Strom ist durch die Folgende Formel beschreiben:

$$I_{KE} = D n/L$$

D ist die Diffusionskonstante, n ist die Elektronendichte in Basis in der Nähe vom Emitter und L ist die Basislänge. Wir nehmen an, dass die Elektronendichte in der Nähe vom Kollektor 0 ist und dass die Dichte linear abfällt.

Der Basisstrom hängt ebenfalls von der Dichte n:

$$I_B = n L/T$$

T ist die Lebensdauer von Elektronen in Basis.

Das Verhältnis zwischen dem Kollektor-Emitter- und dem Basis-Strom ist konstant:

$$I_{KE}/I_B = D T/L^2 = L_{dif}^2/L^2$$

Bei der Herleitung haben wir die Gleichung für die Diffusionslänge benutzt:

$$L_{\text{dif}}^2 = DT$$

Die Diffusionslänge ist die Länge, die die Ladungsträger zurücklegen bevor sie rekombinieren.

Falls die Basislänge viel kleiner als die Diffusionslänge ist, ist auch I_{KE} viel größer als I_{B} .

Beachten wir auch folgendes – Ein Bipolartransistor verhält sich mehr wie ein Stromverstärker und weniger als ein spannungsgesteuerter Schalter. In keinem Arbeitsbereich gibt es eine Ohmsche Verbindung zwischen dem Emitter und dem Kollektor. Deshalb lässt sich mit einem bipolaren Transistor ein Schalter schwer realisieren. Logische Schaltungen mit bipolaren Transistoren sind zwar möglich (TTL, ECL Logik), deren Struktur ist aber komplizierter als im Falle von CMOS Schaltungen.