

angelegte Feld beschleunigt werden, es liegt ein **Isolator** vor. Für jedes Elektron, dass aus einem niedrigeren Energiezustand des Bandes in einen höheren angehoben wird, muss umgekehrt ein Elektron aus diesem Zustand in das tiefere Niveau übergehen. Deshalb ist in einem vollbesetzten Zustand keine Stromleitung möglich.

Besteht zwischen dem obersten vollbesetzten Band und dem darüberliegenden nächsten leeren Band ein relativ geringer Abstand, dann ist der Stoff zwar bei niedrigen Temperaturen ein Isolator, aber bei Zimmertemperatur kann er jedoch eine wesentlich höhere elektrische Leitfähigkeit besitzen. Man spricht dann von einem **Halbleiter**. Seine Leitfähigkeit wird durch die thermische Anregung von Elektronen aus dem Valenzband in das darüberliegende Band verursacht. Die Wahrscheinlichkeit einer solchen Anregung nimmt exponentiell mit dem Bandabstand E_B ab und mit der Temperatur T zu. Halbleitende Eigenschaften zeigen sich erfahrungsgemäß bis zur Energielücke (gap) von etwa $E_B = 2,5\text{eV}$, während bei Isolatoren größere Werte zu finden sind. Beim Halbleiter tragen sowohl die in das Leitungsband gehobenen Elektronen als auch die im Valenzband zurückbleibenden Löcher zur Leitfähigkeit bei (Eigenleitung reiner Halbleiter). Eine Darstellung der beschriebenen Modelle findet man in Abb. 3.29.

3.10 Leitung in Halbleitern

3.10.1 p,n- Halbleiter

Wir wollen uns nun intensiver mit den Leitungsmechanismen in Halbleitern beschäftigen. Als typischen Vertreter der Halbleiter wollen wir uns mit dem Element Germanium aus der IV. Hauptgruppe des Periodensystems befassen. Alle der 4-wertigen Germaniumatome verbinden sich jeweils mit vier benachbarten Germaniumatomen, indem sich jedes der Valenzelektronen mit einem Valenzelektron der Nachbaratome zu einem Elektronenpaar verbindet (s. Abb. 3.30, aus [5]). In diesem Zustand sind alle Valenzelektronen gebunden und das Germanium verhält sich wie ein Isolator. Da die Bindungsenergie aber gering ist, sie beträgt nur $0,75\text{ eV}$, gilt dies nur bei tiefen Temperaturen. Je höher die Temperatur ist, desto stärker schwingen die Elektronen, bis sie eine Schwingungsenergie von mehr als $0,75\text{ eV}$ haben und die Bindungen aufbrechen. Dies ist schon bei Zimmertemperatur der Fall. An den Stellen, an denen ein Elektron freigesetzt worden ist, entsteht ein Elektronenfehlplatz, den man als **Defektelektron** oder **Loch** bezeichnet. Die freien Elektronen führen ähnlich wie in einem Metall Wärmebewegungen aus. Kommen sie dabei in die Nähe der Löcher, treten sie wieder in diese ein, sie **rekombinieren**. Die Wahrscheinlichkeit der Rekombination steigt mit der Dichte der freien Elektronen und Löcher. Es entsteht ein Gleichgewichtszustand, bei dem die Anzahl der pro Zeiteinheit entstehenden freien Elektronen und Löcher genauso groß ist, wie die durch Rekombination verschwindenden. Daraus ergibt sich eine konstante Dichte an freien Elektronen und Löchern, die umso größer ist, je höher die Temperatur ist.

Legt man an einen Halbleiterkristall eine Spannung an, so wandern die freien Elektronen

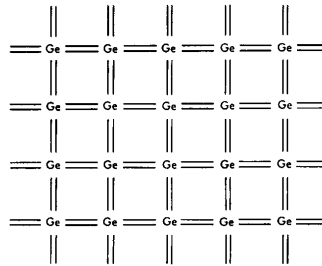


Abbildung 3.30: Die Bindung der Germaniumatome

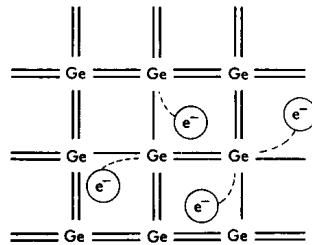


Abbildung 3.31: Eigenleitung im Halbleiter

vom Minuspol zum Pluspol und bilden damit einen Elektronenstrom. Zusätzlich kann aber auch ein gebundenes Elektron, das sich in der Nähe eines Loches befindet, in dieses Loch wandern. Dadurch verschwindet das alte Loch, während ein neues an der Stelle des abgewanderten Elektrons entsteht. Dieser Vorgang wiederholt sich beliebig oft, sodass die Löcher in entgegengesetzter Richtung zu den Elektronen wandern. Man kann die Löcher also als bewegliche, positiv geladene Ladungsträger auffassen, deren Strom durch den Leiter Löcherstrom genannt wird. Der gesamte Strom in einem Halbleiter im elektrischen Feld besteht also aus dem Elektronenstrom und dem Löcherstrom. Diesen Vorgang bezeichnet man als die **Eigenleitung** im Halbleiter (s. Abb. 3.31, entnommen aus [3]). Bei Zimmertemperatur stehen für die Eigenleitung in einem Mol Germanium jeweils $1,3 \cdot 10^{13}$ Elektronen und Löcher zur Verfügung, bei Silizium sind es $7,7 \cdot 10^9$ und bei Tellur $5 \cdot 10^{16}$.

Dotierte Halbleiter

Um die Leitfähigkeit der Halbleiter zu erhöhen, baut man Fremdatome ein. Besonders gut lassen sich in die 4-wertigen Atome wie Germanium und Silizium 3- und 5-wertige Fremdatome wie Bor, Aluminium, Gallium, Indium bzw. Phosphor, Arsen und Antimon einbauen. Die Fremdatome nehmen im Gitter jeweils den Platz eines 4-wertigen Atoms

ein. Diese Plätze nennt man **Störstellen** und ihren Beitrag zur elektrischen Leitung **Störstellenleitung**. Der Einbau der Fremdatome geschieht entweder bei hoher Temperatur durch Einlegieren oder indem man die Fremdatome in Gasform im Vakuumofen in dünne Halbleiterplättchen eindiffundieren lässt. Den gezielten Einbau von Fremdatomen nennt man **dotieren**. Betrachten wir nun am Beispiel der 4-wertigen Atome Silizium und Germanium, wie die Leitfähigkeit durch die Dotierung verändert wird.

Dotiert man Silizium mit einem 3-wertigen Fremdatom, beispielsweise mit Indium, dann verbinden sich die drei Valenzelektronen des Indiumatoms mit je einem Valenzelektron von drei benachbarten Siliziumatomen. Dabei bleibt ein Valenzelektron des vierten benachbarten Siliziumatoms ungepaart (s. Abb. 3.32a). In diese Lücke der Elektronenbindung tritt ein Valenzelektron eines benachbarten Siliziumatoms. Als Folge davon entsteht ähnlich wie oben ein im elektrischen Feld bewegliches positives Loch, gleichzeitig wird das Indiumatom zu einem negativen Ion. Jedes in das Halbleitergitter eingebaute 3-wertige

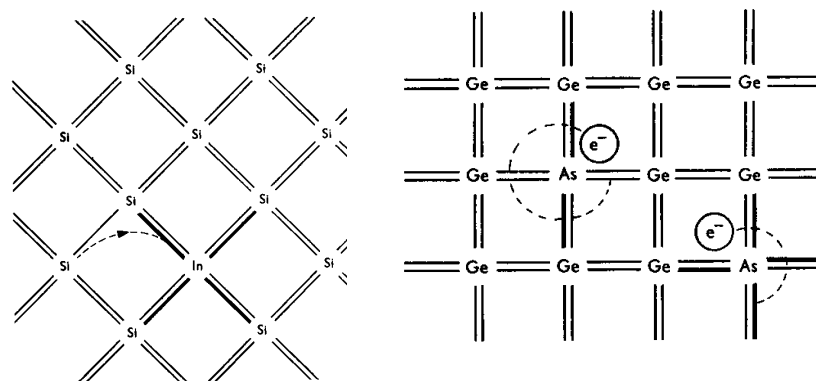


Abbildung 3.32: p- und n- dotierte Halbleiter

Fremdatom liefert also ein bewegliches Loch und ein fest in das Gitter eingebundenes negatives Ion. Daher bezeichnet man diese Fremdatome auch als Elektronenaufnehmer oder **Akzeptoren**. Auch nach dem Einbau von Akzeptoren bleibt der Halbleiter insgesamt elektrisch neutral. Es wird also nur die Dichte der positiven Löcher gegenüber dem Halbleiter erhöht, deshalb bezeichnet man einen mit Akzeptoren dotierten Halbleiter als **p- Halbleiter**. Der Strom in p-Halbleitern ist also hauptsächlich ein Löcherstrom.

Bei der Dotierung mit einem 5-wertigen Atom wie Arsen bleibt bei der Verbindung der Valenzelektronen das fünfte Valenzelektron des Arsenatoms ungepaart (s. Abb. 3.32b, beide entnommen aus [5]). Durch die schwache Bindung wird es bei der Wärmebewegung leicht vom Atom abgetrennt. Das Arsenatom wird dadurch zu einem feststehenden positiven Ion. Dies geschieht bei jedem eingebauten Atom, weshalb man diese Störatome auch als Elektronenspender oder **Donatoren** bezeichnet. Durch den Einbau von Donatoren wird also die Elektronendichte erhöht. Aufgrund des negativen Elektronenstroms spricht

man auch von einem **n-Halbleiter**. Auch die Störstellenleitung kann mit dem Bändermodell veranschaulicht werden. Bei den Donatoren (mit überschüssigen Elektronen) werden unterhalb der unteren Kante E_C des Leitungsbandes lokalisierte Elektronenterme in das Donatorniveau E_D eingetragen. Die Differenz $E_C - E_D$ entspricht dabei der Energie, die notwendig ist, um das Elektron von Störatom in das Leitungsband anzuregen (**Ionisierungsenergie**). Diese Energie ist vergleichbar mit der Wärmeenergie bei Zimmertemperatur, so dass in hohem Maße die Störatome ionisiert sind und ihr überschüssiges Atom

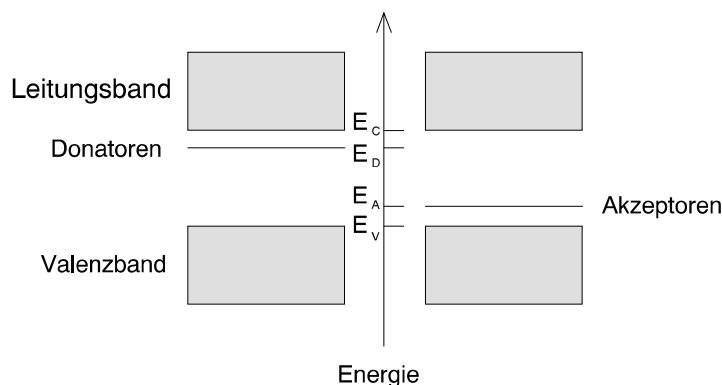


Abbildung 3.33: Störstellenleitung im Bändermodell

an das Leitungsband abgegeben haben. Die Akzeptoren (die zuwenig Elektronen haben) hingegen nehmen leicht das fehlende Bindungselektron auf, indem sie dem Valenzband des Halbleiterkristalls ein Elektron entziehen. Deshalb liegt das Akzeptorniveau E_A oberhalb der oberen Kante des Valenzbandes E_V . Die Differenz $E_A - E_V$ entspricht dabei der Energie, die benötigt wird, um das Elektron aus dem Valenzband an das Akzeptoratom anzulagern (s. Abb. 3.33).

3.10.2 Der pn- Übergang

Fügt man p-Germanium und n-Germanium zusammen, so entsteht ein sogenannter **pn-Übergang**. An der Kontaktfläche fangen die Ladungsträger aufgrund ihrer unterschiedlichen Konzentration an zu diffundieren. Die Löcher aus dem p-Germanium wandern durch die Grenzfläche in das n-Germanium, und die Elektronen aus dem n-Germanium bewegen sich in entgegengesetzter Richtung. Treffen ein Elektron und ein Loch aufeinander, so rekombinieren sie und stehen nicht mehr als Ladungsträger zur Verfügung. Dadurch verändert sich die Umgebung des pn-Übergangs. Es entsteht eine **Grenzschicht**, deren Ladungsverteilung wir nun näher untersuchen wollen. Durch das Abwandern der Löcher aus dem p-Germanium in Grenzfläche fehlen hier positive Ladungen. Da die ortsfesten negativen Ionen zurück bleiben, spricht man dort von einer **negativen Raumladung**. Im grenznahen Bereich des n-Germaniums hat sich ein Analog-Vorgang abgespielt. Aufgrund

der übriggebliebenen ortsfesten positiven Ionen spricht man hier von einer **positiven Raumladung**. Die beiden Raumladungszonen können aber nicht unbegrenzt wachsen, da die negative Raumladung des p-Germaniums mit zunehmender Größe das Eindringen weiterer Elektronen aufgrund der gleichnamigen Ladung erschwert. Dasselbe gilt für das Eindringen der Löcher in die positive Raumladungszone des n-Germaniums. Auf diese Weise bildet sich ein Gleichgewichtszustand aus, der durch bestimmte Raumladungen zu beiden Seiten der Grenze gekennzeichnet ist (s. Abb. 3.39 auf Seite 134, entnommen aus [3]). Da also innerhalb der Grenzschicht nur wenige bewegliche Ladungsträger zur Verfügung stehen, bildet die Grenzschicht eine Zone großen elektrischen Widerstandes. Ihre Dicke beträgt etwa $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$.

3.10.3 Die Halbleiterdiode

Die Dicke der Grenzschicht zwischen einem p- und einem n-Halbleiter ist durch Anlegen einer äußeren Spannung steuerbar, wie es bei der **Halbleiterdiode** ausgenutzt wird. Es gibt zwei Möglichkeiten, die Spannung an die Diode anzulegen (s. Abb. 3.34, aus [1]):

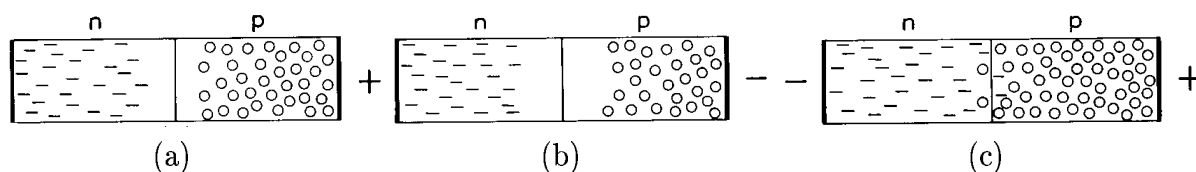


Abbildung 3.34: Die Halbleiterdiode (a) in Sperrichtung (b) und in Durchlassrichtung (c) geschaltet

1. Der positive Pol liegt an der n-Seite und der negative Pol an der p-Seite. Da die beweglichen Elektronen des n-Halbleiters vom positiven Pol und die beweglichen Löcher vom negativen Pol der Spannungsquelle angezogen werden, verbreitert sich die Grenzschicht, und die Anzahl der beweglichen Ladungsträger in der Nähe des pn-Übergangs nimmt weiter ab. Es wird kaum noch Strom geleitet, und der Widerstand des Übergangs hat sich um einige Zehnerpotenzen erhöht. Die Diode wirkt praktisch wie ein Isolator. Man sagt, dass der pn-Übergang **in Sperrichtung vorgespannt** ist und bezeichnet die Grenzschicht als Sperrschicht. Innerhalb der Sperrschicht findet man aber noch einige wenige Elektronen und Löcher, auf die die Spannung nicht sperrend wirkt, sondern die zu einem kleinen Stromfluss führt, dem **Sperrstrom**.
2. Der positive Pol liegt an der p-Seite und der negative Pol an der n-Seite. Bei dieser Schaltung tritt die entgegengesetzte Wirkung ein: die Elektronen und Löcher bewegen sich auf die Grenzschicht zu, sodass diese schmaler wird. Bei entsprechend hoher

Spannung kann sie sogar praktisch ganz abgebaut werden. Sie wird niederohmig und damit ist der pn-Übergang jetzt stromdurchlässig. Die Elektronen und Löcher treffen am Übergang zusammen und rekombinieren in großer Zahl. Die dadurch laufend verschwindenden Elektronen und Löcher werden von der Spannungsquelle nachgeliefert, in dem in den n-leitenden Teil neue Elektronen hineingedrückt und aus dem p-Halbleiter Elektronen unter Zurücklassung neuer Löcher abgesaugt werden. Im äußeren Leiterkreis fließt ein Elektronenstrom, dessen Stärke von der angelegten Spannung abhängt. Grafisch wird diese Abhängigkeit in der **Kennlinie** der Halbleiterdiode aufgezeichnet. Man sagt, dass der pn-Übergang **in Durchlassrichtung vorgespannt ist**.

Für die Halbleiterdiode verwendet man das Schaltsymbol aus Abb. 3.35. Die Pfeilrichtung

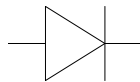


Abbildung 3.35: Schaltsymbol einer Diode

bezieht sich auf die international festgelegte Stromrichtung von plus nach minus und stimmt somit mit der Bewegungsrichtung der Löcher überein.

Versuch 3.14

Wir nehmen die Kennlinie einer Halbleiterdiode in Durchlassrichtung und in Sperrichtung mit einem Oszilloskop auf.

Die Abb. 3.36 (entnommen aus [1]) zeigt die Kennlinie einer Diode. Wird die Diode in Durchlassrichtung betrieben, so steigt die Stromstärke zunächst nach einer Exponentialfunktion an, dann linear mit der Spannung. Wird sie dagegen in Sperrichtung geschaltet, so entsteht nur ein sehr geringer Sperrstrom (man beachte den Maßstab!). Bei sehr hohen Spannungen steigt die Stromstärke ab einer bestimmten Spannung stark an. Diesen Bereich nennt man nach seinem Entdecker den ZENER-Bereich. Hier erreicht die elektrische Feldstärke E in der Grenzschicht so hohe Werte, dass die Kraft $F = -e E$ ausreicht, um Valenzelektronen aus ihren Bindungen zu reißen. Dadurch entstehen in der Grenzschicht plötzlich zahlreiche stark beschleunigte Ladungsträger, die ihrerseits durch Stoßionisation weitere Ladungsträger freisetzen können. Man kann diesen Effekt zur Spannungsstabilisierung ausnutzen.

3.10.4 Der Transistor

Das wichtigste Schaltelement aus der Halbleiterfamilie ist der Transistor. Er besteht aus drei Halbleitern, die über zwei pn-Übergänge zusammen gefügt sind. Es handelt sich also

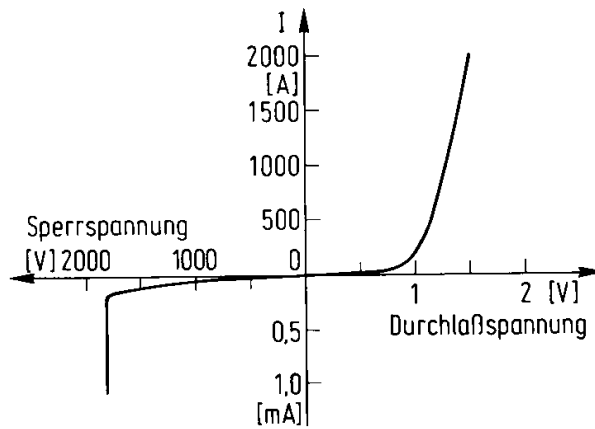


Abbildung 3.36: Kennlinie einer Diode

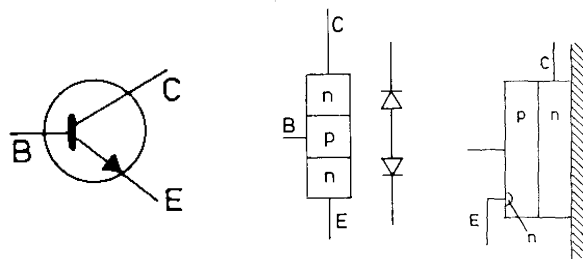


Abbildung 3.37: Der Transistor

entweder um pnp- oder npn-Transistoren. Man bezeichnet die beiden äußeren Schichten als **Emitter** E und als **Kollektor** K und die mittlere als die **Basis** B . Sie hat eine Dicke von nur 0,02 bis 0,03 mm (s. Abb. 3.37, entnommen aus [2]).

Für beide Transistorarten gelten grundsätzlich die gleichen physikalischen Zusammenhänge, nur dass die Wirkung des pnp-Transistors durch einen Strom von Löchern und die des npn-Transistors durch einen Strom von Elektronen zustande kommt.

Um die Wirkungsweise von Transistoren verstehen zu können, betrachten wir einen npn-Transistor in einem Schaltkreis. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, einen Transistor zu schalten. Bei der **Basisschaltung** ist die Basis der gemeinsame Kontakt von Eingangs- und Ausgangskreis (s. Abb. 3.38, entnommen aus [3]). Im Eingangskreis ist der Transistor in Durchlassrichtung geschaltet, weil die Spannungsquelle zwischen Basis und Emitter mit ihrem negativen Pol am Emitter liegt und dadurch Elektronen in die Emitter-Basis-Grenzschicht drücken kann. Im Ausgangskreis ist der Transistor dagegen in Sperrichtung geschaltet, weil die Spannungsquelle zwischen Kollektor und Basis bzw. zwischen Kollektor-

tor und Emitter mit ihrem positiven Pol am Kollektor liegt und dadurch Elektronen aus der Basis-Kollektor-Grenzschicht absaugt. Der wesentliche Vorgang, ohne den ein Transistor überhaupt nicht arbeiten könnte, ist folgender:

Die Elektronen, die durch die Basis-Emitter-Spannung in die Basis getrieben werden, rekombinieren dort nur zu 0,5 - 5 % mit den Löchern der Basis. Da die Basis so schmal ist, diffundieren fast alle Elektronen aufgrund ihrer hohen Diffusionsgeschwindigkeit durch sie hindurch und gelangen in die Basis-Kollektor-Grenzschicht. Hier werden sie durch das elektrische Feld in die Kollektorzone getrieben und dort am positiven Pol abgesaugt.

Fasst man den Transistor als einen Stromknoten auf, so muss nach dem KIRCHHOFFSchen-Gesetz die Summe der zufließenden und abfließenden Ströme gleich sein. Unter Beachtung der international festgelegten Stromrichtung (von plus nach minus) sind die zufließenden Ströme der Basisstrom I_B und der Kollektorstrom I_K , der abfließende Strom ist der Emitterstrom I_E . Es ist also

$$I_B + I_K = I_E. \quad (3.90)$$

Betrachten wir noch einmal die Elektronenbewegung. Beim npn-Transistor fließen die Elektronen über den Emitter in den Transistor hinein, fast alle fließen über den Kollektor wieder ab und ein geringer Teil fließt über die Basis.

In der Basisschaltung kann der Kollektorstrom I_K durch den Emitterstrom I_E gesteuert werden. Stromstärkeänderungen im Eingangskreis haben Stromstärkeänderungen im Ausgangskreis zur Folge. In der Basisschaltung sind die Stromstärken I_E und I_K fast gleich groß, denn nur ein geringer Teil des Emitterstroms fließt ja als Basisstrom ab, sodass in dieser Schaltung also keine Stromverstärkung vorliegt. Dagegen ergibt sich eine Leistungsverstärkung, denn die Sperrspannung U_{KB} kann nämlich viel größer gewählt werden als die Spannung U_{BE} zwischen Emitter und Basis, sodass die Ausgangsleistung $U_{KB} \cdot I_K \sim U_{KB} \cdot I_E$ viel größer ist als die Eingangsleistung $U_{BE} \cdot I_E$. Befindet sich ein Lastwiderstand R_{Last} im Ausgangskreis, so ist der Transistor auch als Spannungsverstärker wirksam. Geringe Spannungsänderungen im Eingangskreis bewirken große Änderungen der Stromstärke $I_K \sim I_E$.

In der **Emitterschaltung** wird der Kollektorstrom I_K durch den kleineren Basisstrom $I_B = I_E - I_K$ gesteuert (s. Abb. 3.38). Hier wirkt der Transistor als Stromverstärker. Auch in dieser Schaltung erfolgt eine Spannungsverstärkung am Lastwiderstand und insgesamt eine Leistungsverstärkung. Wegen der günstigen Verstärkereigenschaften wird die Emitterschaltung gegenüber der Basisschaltung bevorzugt.

Versuch 3.15

Wir nehmen die Kennlinien eines npn-Transistors in Basis- und Emitterschaltung auf.

Über die Betriebsdaten eines Transistors erhält man am übersichtlichsten Auskunft durch das **Kennlinienfeld** dieses Transistors, das für jeden Transistor unterschiedlich ist. Ein Beispiel sieht man in Abb. 3.38.

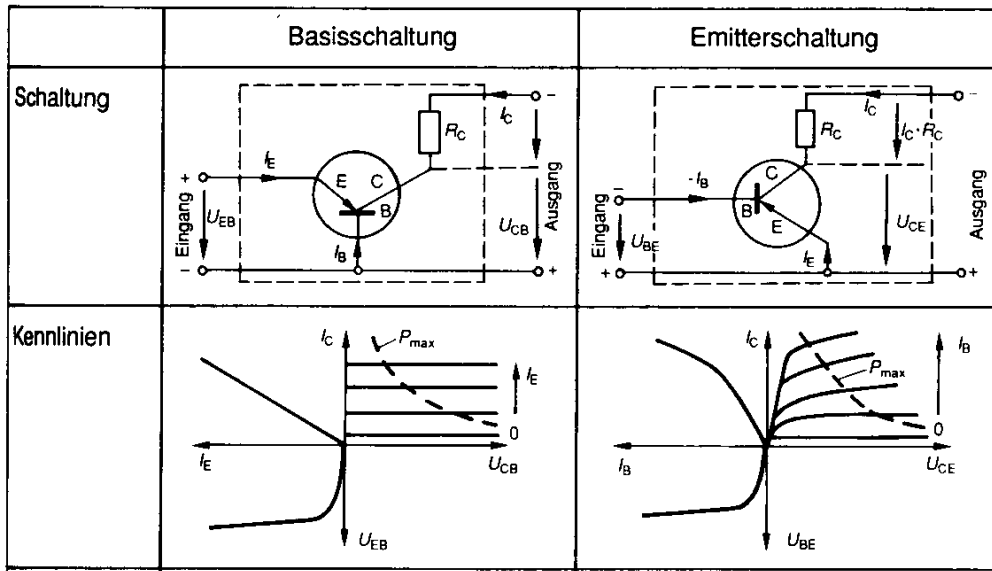


Abbildung 3.38: Basis- und Emitterschaltung eines Transistors mit den dazugehörigen Kennlinien

3.11 Ladungstransport im Hochvakuum

Wenn wir von Ladungstransport im Hochvakuum sprechen, dann meinen wir den Ladungstransport bei einem Druck von $10^{-2} - 10^{-4}$ Pa. Bei diesen Drücken beträgt die freie Weglänge 0,5 – 50 m. Die Teilchen wechselwirken nicht mehr miteinander, sondern mit der Gefäßwand. Für die Leitung im Vakuum müssen also Ladungsträger injiziert werden.