

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.

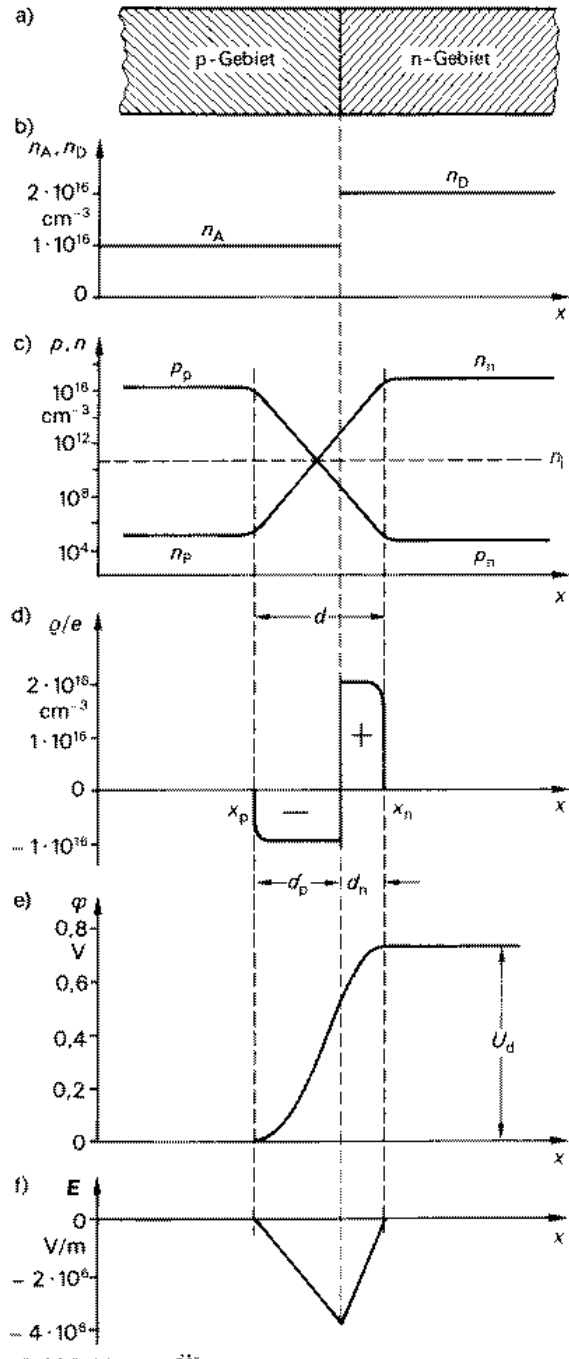


Abbildung 3.39: Der pn-Übergang

3.11.1 Glühemission

Das am häufigsten verwendete Verfahren zur Injektion von Ladungsträgern im Vakuum beruht auf der **thermischen Emission (Glühemission)** von Elektronen.

Dieser Prozess ähnelt dem Verdampfen von Molekülen aus einer Flüssigkeitsoberfläche. Wir wollen ihn nun anhand der **Elektronenröhren** betrachten. Eine Elektronenröhre besteht aus zwei Elektroden, der Kathode und der Anode, die in einem evakuierten Glaskolben eingeschmolzen sind (s. Abb. 3.40, entnommen aus [2]). Durch das Erhitzen der

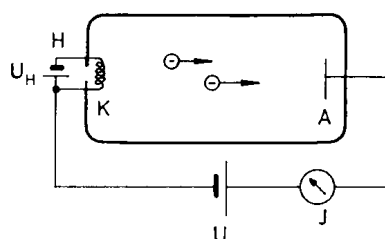


Abbildung 3.40: Elektronenröhre

Glühkathode nimmt die mittlere kinetische Energie der Elektronen in dem Metall so stark zu, dass sie die Anziehungskraft der zurückbleibenden Atomrümpfe überwinden und aus der Heizspirale austreten können (Austrittsarbeit W_A). Diese Elektronen können dann zur Anode gelangen. Eine Elektronenröhre, die nur aus Kathode und Anode besteht, nennt man (**Vakuum**)**Diode**.

Die Verdampfung der Elektronen können wir durch den Anlaufstrom messen, den wir beim Anlegen einer Gegenspannung ($U < 0$ V) erhalten.

Versuch 3.16

Wir messen die Abhängigkeit des Anodenstroms I_A von der Anodenspannung U_A einer Vakuumdiode bei verschiedenen Heizströmen. (Aufnehmen einer I/U - Kennlinie)

Abbildung 3.41 zeigt die Diodenkennlinien (entnommen aus [2]). Bei $U > 0$ V steigt der Strom mit wachsender Spannung rasch an bis schließlich eine Sättigung eintritt. Mit steigender Temperatur der Heizwendel (größerer Heizstrom) steigt der Anlaufstrom stark an. Die Abhängigkeit der Stromdichte j der austretenden Elektronen von der Austrittsarbeit W_A und der Temperatur T der Heizwendel wird durch die **RICHARDSON-Gleichung** beschrieben (O. RICHARDSON, 1879 - 1959):

$$j = A T^2 e^{-\frac{W_A}{kT}}. \quad (3.91)$$

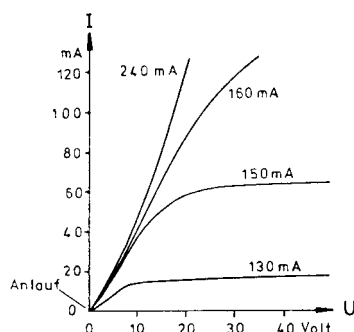


Abbildung 3.41: Kennlinie der Vakuumdiode

Die Richardson- Konstante A ist materialabhängig und liegt zwischen $10^6 \text{ A}/(\text{m}^2 \text{ K}^2)$ für Wolfram und $10^2 \text{ A}/(\text{m}^2 \text{ K}^2)$ für Metalloxide. Die ebenfalls werkstoffabhängige Austrittsarbeit W_A liegt zwischen 1 eV bei Metalloxiden und 5 eV bei Nickel. Die Größe des durch eine Vakuumdiode fließenden Stromes kann durch eine von außen angelegte Steuerungspannung verändert werden, indem man zwischen Kathode und Anode ein oder mehrere Steuergitter anbringt. Je nach Anzahl der Gitter werden diese Röhren dann Triode, Tetrode, Pentode usw. genannt. Bei der **Triode** wird ein Gitter zwischen Kathode und Anode gebracht, das eine negative Vorspannung erhält. Durch die Höhe des Gitterpotenzials lässt sich der Anodenstrom beeinflussen. Der Anodenstrom wird durch die Raumladung vor der Kathode bestimmt, die jetzt sowohl von der Gitterspannung als auch von der Anodenspannung beeinflusst wird. Aufgrund der geometrischen Abschirmung des Gitters ist nur noch ein Anteil $D \cdot U_A$ mit $D \ll 1$ des Anodenpotenzials im Raum vor der Kathode strombestimmend wirksam. Die Größe D nennt man **Durchgriff**; sie gibt an, wie stark das Anodenpotenzial durch das Steuergitter “hindurchgreift”. Bei Trioden hat der Durchgriff D Werte zwischen 0,1 und 0,5. Die daraus resultierende starke Rückwirkung der Anodenspannung auf den Anodenstrom (geringer innerer Widerstand) ist für viele Anwendungen störend.

Daher führt man bei der **Pentode** zwei weitere Gitter in das Elektrodensystem zwischen Steuergitter und Anode ein: ein erheblich positiv vorgespanntes Schirmgitter g_2 ($U_{g_2} \approx U_a$) und ein auf Kathodenpotenzial liegendes Bremsgitter g_3 . Das Schirmgitter schirmt den Raum zwischen Kathode und erstem Gitter gegen die Einflüsse des Anodenraums ab, während das Bremsgitter nur eine Hilfsfunktion hat.

3.11.2 Photoemission

Eine weitere Möglichkeit, Elektronen in das Vakuum zu injizieren, bietet die **Photoemission**. Der Effekt besteht darin, dass, wenn man Lichtquanten auf eine Metallplatte strahlt, dadurch Elektronen aus dem Metallverbund auslöst werden. Dies gelingt allerdings nur, wenn die Energie der Photonen (Lichtquanten) größer als die Austrittsarbeit ist. Diese Elektronen werden als Photostrom außerhalb des Metalls registriert.

Eine Anwendung findet der Photoeffekt in der **Photozelle**. Hier steht einer metallverspiegelten Wand aus Kalium, Cäsium, Cadmium o.ä. eine ringförmige Anode gegenüber (s. Abb. 3.42). Licht, das auf die Metallschicht (Kathode) fällt, löst dort Elektronen aus, die von der Anode gesammelt und vom Galvanometer G als Photostrom gemessen werden.

Versuch 3.17

Wir bestrahlen bei konstanter Spannung eine Photodiode und messen den Strom. Wir beobachten, dass der Strom zur Lichtintensität proportional ist und oberhalb einer Sättigungsspannung unabhängig von der angelegten Spannung ist (s. Abb. 3.42, entnommen aus [9]).

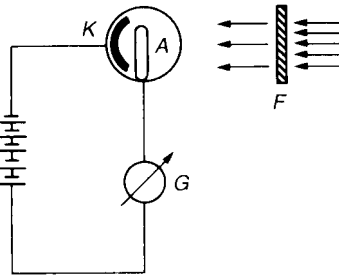


Abbildung 3.42: Photodiode

Photozellen können evakuiert oder gasgefüllt sein. Im zweiten Fall wird der Elektronenstrom durch Stoßionisation verstärkt.

3.11.3 Sekundärelektronenemission

Die bereits freigesetzten Elektronen können wiederum soviel kinetische Energie erlangen, dass sie weitere Elektronen durch Stoß freisetzen können (**Sekundärelektronen** genannt). Schnelle Elektronen können sogar mehrere Sekundärelektronen freisetzen. Dies nutzt man im Sekundärelektronen- Vervielfacher (kurz SEV oder **Multiplifier**) aus, um einzelne Elektronen, vor allem aber geringe Lichtintensitäten bis herab zu einzelnen Photonen nachzuweisen. Das Licht löst aus der Photokathode Elektronen aus, die dann durch

eine Spannung von einigen 100 V bis zur nächsten Elektrode (Dynode) beschleunigt werden, wo jedes Elektron mehrere Sekundärelektronen auslöst. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis nach mehreren Verstärkungsstufen (oft 10 oder mehr) ein gut messbarer Strom entstanden ist.

3.12 Leitung in Gasen

3.12.1 Die Gasentladung

Die Atome und Moleküle von Gasen sind unter Normalbedingungen nicht thermisch ionisiert, also elektrisch neutral. Da keine Ladungsträger vorhanden sind, tritt in ihnen im allgemeinen auch keine Stromleitung auf.

Versuch 3.18

An einen Plattenkondensator mit einem Plattenabstand von einigen cm wird eine Spannung von einigen 100 V gelegt. Bei normaler Luftatmosphäre zeigt ein in den Kreis eingeschaltetes Strommessinstrument keinen Strom an. Hält man hingegen eine Flamme zwischen die Kondensatorplatten, so zeigt das AMPÈREmeter einen Strom an.

Durch die erhöhte Temperatur können in dem Gas Ladungsträger ionisiert werden, die sich in dem elektrischen Feld bewegen. Darüber hinaus kann die Ionisation auch durch Licht oder radioaktive Strahlung erfolgen, dabei entstehen positive Ionen und Elektronen. Die Elektronen können sich nachträglich an neutrale Atome bzw. Moleküle anlagern, sodass auch negative Ionen auftreten.

Die unselbständige Gasentladung

Immer, wenn die Stromleitung erst eintritt, wenn durch äußere Einflüsse Ladungsträger im Gas erzeugt werden, spricht man von **unselbständiger Gasentladung**.

Bei einer konstanten Gasionisierung (pro Zeiteinheit wird eine konstante Anzahl von Ladungen erzeugt) zeigt die unselbständige Gasentladung eine charakteristische Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung (s. Abb. 3.43, entnommen aus [3]):

Für kleine Spannungen (Bereich I) nimmt die Stromstärke zunächst linear mit der Zeit zu, d.h., es gilt das OHMSche Gesetz $U/I = konst.$. Die Gasionen stoßen auf dem Weg zur gegenpoligen Elektrode auf andere Gasatome. Ferner können sie mit Ionen entgegengesetzter Ladung wieder rekombinieren, deshalb wird dieser erste Bereich auch **Rekombinationsbereich** genannt. Steigt die Spannung weiterhin, dann gelangen die Ionen so schnell zu den Elektroden, dass keine Rekombinationprozesse mehr möglich sind. Alle Gasionen fließen jetzt in einem konstanten Strom ab, der Sättigungsstrom genannt wird (Bereich II).