

Kapitel 8

Halbleiter

III	IV	V
Al	Si	P
Ga	Ge	As

Die elektrische Leitfähigkeit γ von Halbleitern liegt in der Regel zwischen der von gut leitenden Metallen und Isolatoren. Sie kann je nach Anwendung stark abhängen

- von den zugefügten Fremdstoffen bei der Herstellung (Anzahl und Art der Ladungsträger), **Dotierung**
- vom Stromfluss durch das Bauteil bzw. der Spannung am Bauteil,
- von der Temperatur (beeinflusst die Anzahl und Beweglichkeit der freien Ladungsträger),
- von der Belichtung (beeinflusst auch die Anzahl und Beweglichkeit der freien Ladungsträger),
- oder z.B. von der mechanischen Kraft, die einwirkt.

Bei Raumtemperatur ist die Leitfähigkeit reiner Halbleiter gering. Führt man Energie in Form von **Spannung** und **Stromfluss**, **Wärme** oder **Licht** zu, so kann sich die **Leitfähigkeit** ändern. Die Empfindlichkeit der Halbleiter auf **Druck**, **Temperatur**, **Licht** und andere **Strahlungsquellen** macht sie zu geeigneten **Sensoren** verschiedenster Art.

8.1 Dotierung

Unter Dotierung versteht man das **gezielte Verunreinigen von Halbleitern**, in dem man in hochreine kristalline Halbleiterwerkstoffe (z.B. Silizium oder Germanium) bestimmte Fremdatome einbaut. Die eingebrachte Anzahl der **Fremdatome ist dabei relativ klein**, kann aber **große Auswirkungen** auf die Leitfähigkeit haben.

Die folgenden Überlegungen beschreiben ein vereinfachtes Modell.

8.1.1 n - Dotierung

Wenn in reines **Silizium (Si)** ein V-wertiges Element (wie **Phosphor**) eingebaut wird, steht **pro Störstelle ein freies Elektron zur Verfügung**. Die ortsfesten per Dotierung eingebrachten Atomrümpfe sind positiv geladen, wenn sich das Elektron weg bewegt. Da es sich bei den freien Elektronen um **negativ geladene Ladungsträger** handelt, spricht man von einem **n-Halbleiter**. Schließt man eine Quelle an den n-Halbleiter an, entsteht ein Elektronenstrom von **Minus nach Plus durch den Halbleiter**.

8.1.2 p - Dotierung

Wenn in reines Silizium ein III-wertiges Element (wie **Aluminium**) eingebaut wird, sitzt in diesem Bereich **zunächst gedanklich pro Dotieratom ein Elektron weniger**. Man spricht von einem **Defektelektron (Loch)**. Diese Löcher sind beweglich, in dem sie von anderen Elektronen besetzt werden können und somit wandern. Da es sich bei den Löchern um positive Ladungsträger handelt, spricht man von einem **p-Halbleiter**.

Schließt man eine Quelle an den p-Halbleiter an, so fließen Elektronen vom Minus-Pol in den p-Halbleiter und **rekombinieren** mit den Löchern. Der Plus-Pol entzieht nun dem p-Halbleiter die Elektronen und es fließt ein **Löcherstrom von Plus nach Minus im Halbleiter**.

8.2 Eigenleitung von Halbleitermaterialien

Auch undotierte Halbleiter können freie Ladungsträger erzeugen, wenn z.B. Wärme oder Licht zugeführt wird. Somit ändert sich die Leitfähigkeit. Elektronen können die sogenannte Bandlücke vom Valenzband ins Leitungsband überwinden, sodass das vorher unbesetzte Leitungsband nun teilweise besetzt ist. Diese Elektronen und die im Valenzband verbleibenden Löcher können beide zum Stromfluss beitragen.

Mit steigender Temperatur nimmt also die Leitfähigkeit zu. Dadurch ergeben sich Grenzen für die maximale Betriebstemperatur in elektronischen Geräten, wobei Bauteile aus Germanium eine relativ niedrige maximale Betriebstemperatur aufweisen. Bauteile aus Silizium bzw. aus Galliumarsenid sind tendenziell für den Einsatz bei höheren Temperaturen geeignet.

8.3 Halbleiterwerkstoffe

Das bekannteste Halbleitermaterial ist Silizium (Si). Es kommt in der Natur sehr häufig vor, z.B. in Sand oder Quarz. Weitere bekannte Halbleitermaterialien sind Germanium (Ge) oder Galliumarsenid (GaAs).

Typische häufig verwendete Bauteile auf Halbleiterbasis sind Dioden, Transistoren, Integrierte Schaltkreise (ICs), Dehnungsmessstreifen, NTC-Widerstände, LEDs, Displays, Laserdioden und Solarzellen. Dafür eingesetzte Werkstoffe können z.B. Silizium (Si), Germanium (Ge), Galliumarsenid (GaAs), Indiumarsenid (InAs), Indiumantimonid (InSb), Galliumphosphid (GaP) und Siliziumcarbid (SiC) sein.

8.4 pn-Übergang

8.4.1 pn-Übergang ohne äußere Spannung

Setzt man einen p-Halbleiter und einen n-Halbleiter in einem Gedankenexperiment zusammen, so ergibt sich eine Grenzschicht. Diese nennt man Sperrschicht oder pn-Übergang. Das entstehende elektronische Bauelement wird Halbleiterdiode genannt.

Ohne äußere Einwirkung durch Spannung oder Strom bewegen sich in unserem Modell freie Ladungsträger nahe des Grenzbereiches. Man spricht von Rekombination durch Elektronen mit Löchern. Im Detail wandert in dieser Skizze ein freies Elektron der n-Schicht über die Grenze in die p-Schicht und geht dort eine Bindung ein. Es verbleibt ein pos. geladenes Rumpfatom (pos. Ion) in der n-Schicht, und es entsteht ein neg. geladenes Ion in der p-Schicht:

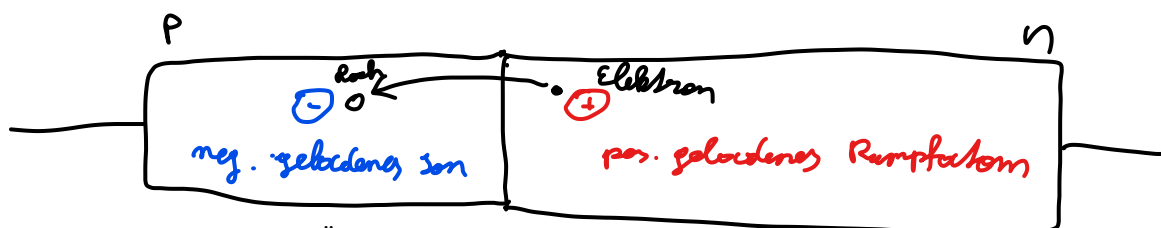


Abbildung 8.1: pn-Übergang ohne äußere Spannung

Eigentlich wandern im Grenzbereich viele Elektronen aus der n-Schicht in die p-Schicht. Diese Rekombination der Elektronen mit den Löchern nennt man auch Ladungsträgerdiffusion. Dadurch entsteht am pn-Übergang eine an freien Ladungsträgern verarmte Sperrschicht (auch Raumladungszone oder Verarmungszone genannt):

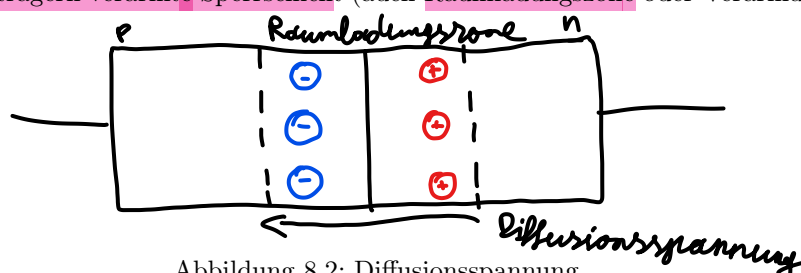


Abbildung 8.2: Diffusionsspannung

Diese Schicht ist schlecht leitend, und in ihr herrscht ein relativ starkes elektrisches Feld, verursacht durch die Ladungsträgerverschiebungen. Durch das elektrische Feld entsteht zwischen p- und n-Schicht eine elektrische Spannung. Sie wird Diffusionsspannung U_D genannt. Diese Spannung kann nicht als Spannungsquelle genutzt werden. Besteht das Trägermaterial aus **Silizium**, liegt die Diffusionsspannung bei Raumtemperatur im Bereich von ca. $U_D = 0,6\text{ V} - U_D = 0,7\text{ V}$.

8.4.2 pn-Übergang an äußerer Spannung in **Durchlassrichtung**

Wenn man die Diode an einer Quelle betreibt, sodass die p-Schicht am Pluspol liegt, und die n-Schicht am Minuspol angeschlossen ist, werden die Elektronen der n-Schicht vom Pluspol der Quelle angezogen, und die Raumladungszone wird mit freien Ladungsträgern überschwemmt. Über den pn-Übergang fließt also ein Strom. Man sagt, die Diode ist in Durchlassrichtung geschaltet. Die technische Stromrichtung, also die Richtung des eingezeichneten Strompfeiles, zeigt in die entgegengesetzte Richtung der Elektronen.

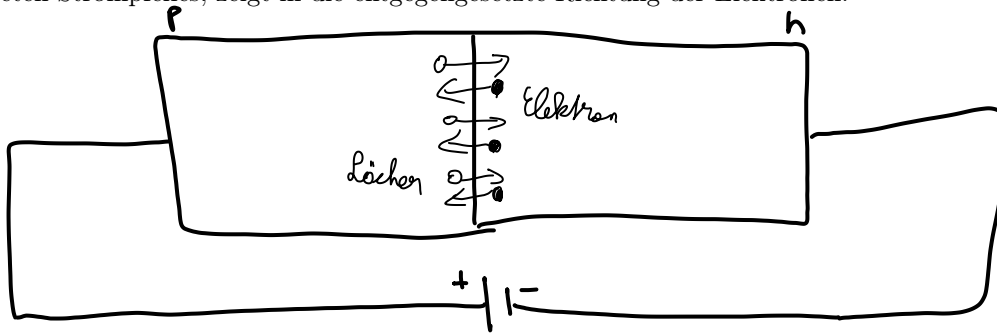


Abbildung 8.3: pn-Übergang in Durchlassrichtung

8.4.3 pn-Übergang an äußerer Spannung in Sperrrichtung

Wird die Quelle nun umgepolt, sodass die p-Schicht am Minuspol liegt, und die n-Schicht am Pluspol, so kann man sich vorstellen, dass die Elektronen der n-Schicht je nach Höhe der anliegenden Spannung mehr oder weniger weit vom Pluspol angezogen werden. Ähnliches kann man sich für die Löcher in die andere Richtung vorstellen.

Die Sperrschicht im Grenzbereich wird also größer. Bildhaft gesehen können keine Ladungsträger durchfließen. In der Praxis soll in der Regel durch einfache Dioden möglichst kein Sperrstrom fließen.

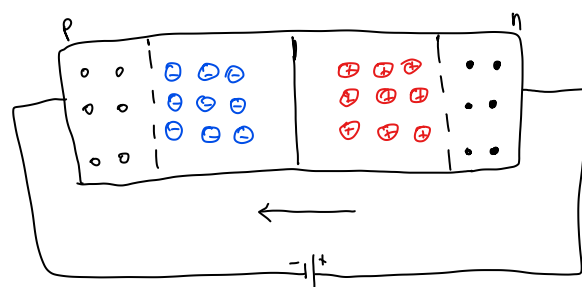


Abbildung 8.4: pn-Übergang in Sperrrichtung

Dieses Bild mit einer isolierenden Schicht in der Mitte und den leitenden Randbereichen erinnert an einen Kondensator. Tatsächlich hat die Diode in **Sperrrichtung kapazitive Eigenschaften**, und die Kapazität kann mit der anliegenden Spannung verändert werden. Speziell für diesen Anwendungszweck hergestellte Bauteile werden **Kapazitätsdioden** genannt. Sie spielen eine **wichtige Rolle in vielen elektronischen Geräten zur Filterung oder Erzeugung von Frequenzen**.

8.5 Die Diode

Diese Eigenschaften der pn-Übergänge werden in Halbleiterdioden genutzt. Die p- und n-Schichten befinden sich in einem Gehäuse mit zwei Anschlussbeinen. Der Ring am Gehäuse markiert die Kathode.

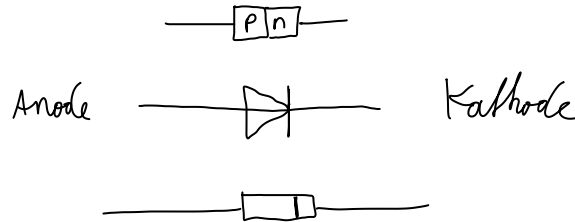


Abbildung 8.5: Diode (Aufbau, Schaltbild, Gehäuseansicht)

Das Bild oben zeigt den prinzipiellen Aufbau. Die Abbildung in der Mitte das Schaltzeichen, und unten die achsiale Bauteilansicht. Die Dreiecksspitze zeigt die technische Stromrichtung in Durchlassrichtung an.

Die Diode wird mit dem Pluspol Richtung Anode in Durchlassrichtung betrieben, der Pluspol der Quelle an der Kathode bedeutet Sperrrichtung.

8.5.1 Ermittlung der Diodenkennlinie

Um die Durchlasskennlinie (also die Abhängigkeit zwischen Strom und Spannung in Durchlassrichtung) einer Diode zu ermitteln, kann man folgende Schaltung verwenden:

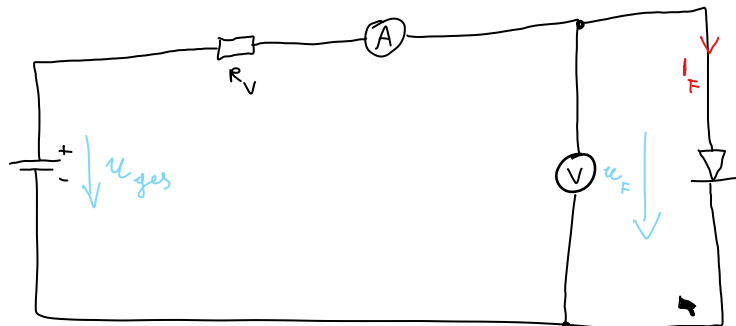


Abbildung 8.6: Ermittlung der Diodenkennlinie

Die Messschaltung besteht aus einer Spannungsquelle, einem Vorwiderstand zur Strombegrenzung, einem Amperemeter, dem Voltmeter und dem Messobjekt, also der Diode.

In der Schaltung bedeuten:

U_F = Durchlassspannung

I_F = Durchlassstrom

Zur Messung:

Um die Durchlassspannung U_F zu verändern, kann die Spannung U_{Ges} am Netzgerät variiert werden. In diesem Beispiel liegen folgende Messwerte vor:

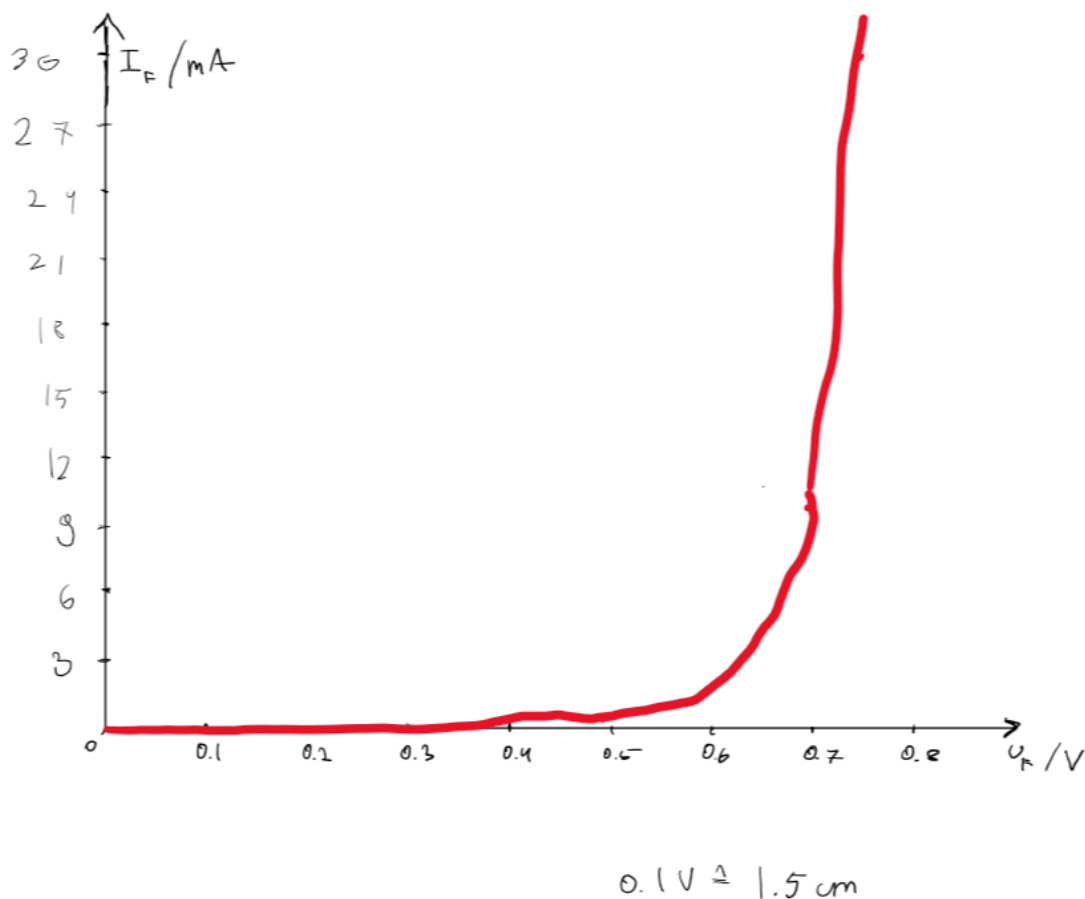
U_F / V	0	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
I_F / mA	0	0	0,02	0,2	1,5	10	30

Ab einem bestimmten Durchlassspannungswert U_F beginnt der Strom relativ stark anzusteigen. Diesen Spannungswert nennt man Schwellspannung. Die Halbleiterdiode verhält sich hier wie ein spannungsabhängiger Widerstand.

Im Gegensatz zu den passiven Bauelementen R, L und C ist die Diode ein aktives und nichtlineares Bauteil.

Diodenkennlinie:

Wählen Sie bitte einen vernünftigen Maßstab für Ihre Achsen und zeichnen Sie die Diodenkennlinie aus den oberen Werten ein:

**Übersicht über gängige Diodentypen:**

Die angegebenen Werte sind Richtwerte und können je nach Hersteller, Temperatur und Anwendung variieren:

Typ	Gehäuse	$U_{R_{max}} / V$	$I_{F_{max}} / mA$	$I_{R_{max}} / \mu A$ typ.
1N4007	DO-204AL, DO-41	1000	1000	ca. 30
1N4148	SOD27, DO-35	100	200	0,025
BAT48	DO35	40	350	2 – 50

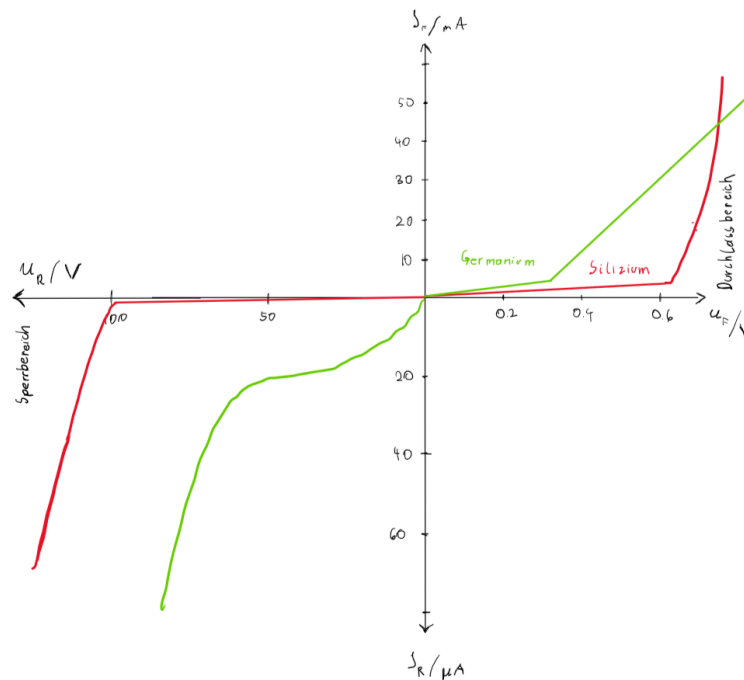
Vergleich von Diodenkennlinien:

Abbildung 8.7: Ungefähre Kennlinien einer Si- und einer Ge-Diode

Eingetragen werden die Kennlinien einer Germanium(Ge)-Diode und einer Silizium(Si)-Diode.

Der Durchlassbereich liegt rechts oben im Bild, der Sperrbereich liegt links unten.

Die beiden anderen Quadranten spielen bei der Kennlinienaufnahme keine Rolle.

Die Kennlinie kann z.B. dazu verwendet werden, um die Schwellspannung oder den differentiellen Widerstand r_F abzuschätzen.

Schwellspannung \approx Diffusionsspannung

Um die Diode in Durchlassrichtung zu betreiben, muss die Spannung der Anode um die Schwellspannung positiver sein als die der Kathode. Die Schwellspannung ist abhängig vom Halbleitermaterial, und ist in etwa so hoch wie die bereits besprochene Diffusionsspannung U_D .

Ein paar Beispiele von Halbleiterdioden:

- Schottkydioden $U_D \approx 0,3 \text{ V}$
- Germaniumdioden: $U_D \approx 0,3 \text{ V}$
- Siliziumdioden: $U_D \approx 0,65 \text{ V}$

Durchlassbereich:

Im Durchlassbereich ($U_F > 0$) wächst der Strom mit steigender Spannung exponentiell. Deswegen sollten Dioden beim Messen von Durchlasskennlinien nie direkt an eine Spannungsquelle angeschlossen werden, sondern immer mit einem Vorwiderstand.

Der Strom in Durchlassrichtung kann nach der Shockley-Gleichung (nach William Bradford Shockley) folgendermaßen modelliert werden:

$$I_F = I_S \cdot (e^{\frac{U_F}{n \cdot U_T}} - 1) \quad (8.1)$$

Legende:

I_F ... Durchlassstrom

U_F ... Durchlassspannung

I_S ... Sättigungsstrom (typ. $10^{-12} A$ bis $10^{-6} A$)

e unter der Hochzahl: Eulersche Zahl

n ... Emissionskoeffizient, ungefähr 1 bis 2, wird manchmal gleich 1 gesetzt

U_T ... Temperaturspannung, kann berechnet werden mit $U_T = \frac{k \cdot T}{e}$

T ... absolute Temperatur in Kelvin

$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{Ws}{K}$... Boltzmannkonstante

$e = 1.6022 \cdot 10^{-19} As$... Elementarladung, für Temperaturspannungsberechnung.

Sperrbereich:

Im Sperrbereich fließt bei relativ kleinen Sperrspannungen ein meist sehr kleiner Sperrstrom. Ab einer bestimmten Sperrspannung kommt es zum Durchbruch. Der Sperrstrom steigt dabei schlagartig an, und das Bauteil verliert die „Ventilwirkung“.

Dieser Betriebsbereich ist bei herkömmlichen Dioden unerwünscht. Es gibt allerdings Anwendungen, wo genau diese Steilheit des Durchbruches zur Spannungsstabilisierung ausgenutzt wird (bei Zenerdioden).

BEISPIEL 8.5.1: BESTIMMEN SIE DEN WERT DER TEMPERATURSPANNUNG U_T BEI RAUMTEMPERATUR.

$$U_T = \frac{k \cdot T}{e} = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \frac{Ws}{K} \cdot 294.15 K}{1.6022 \cdot 10^{-19} As} = 0.02 V = 25.3 mV$$

BEISPIEL 8.5.2: BESTIMMEN SIE DEN WERT DER TEMPERATURSPANNUNG U_T , WENN SICH DIE TEMPERATUR DER DIODE IM BETRIEB UM $\Delta\vartheta = 30^\circ C$ ERHÖHT HAT.

$$U_T = \frac{k \cdot (T + 30K)}{e} = 27.9 mV$$

Der Sättigungsstrom I_S ist stark temperaturabhängig. Dieser Effekt wird manchmal zur Temperaturmessung ausgenutzt, der Zusammenhang ist aber relativ kompliziert. Man kann auch den Strom in Durchlassrichtung konstant halten, und die Durchlassspannung messen. Die Spannung U_F nimmt dann in etwa um $2 mV/K$ ab:

$$TK(U_F) = -2 mV/K \quad (8.2)$$

8.5.2 Berechnung von Diodenschaltungen

Die Kennlinie der Diode ist nichtlinear. Viele der bisher besprochenen Methoden zur Netzwerkanalyse sind daher nicht direkt anwendbar.

Das nachfolgende Diagramm zeigt den Zusammenhang der Momentanwerte von Durchlassspannung und Durchlassstrom einer Diode, die im Dauerbetrieb einen maximalen mittleren gleichgerichteten Strom in Vorwärtsrichtung von 1 A aushält, sehr kurze Zeit aber auch höhere Momentanwerte verarbeiten kann.

Beachten Sie, dass der Maßstab auf der Stromachse logarithmisch aufgetragen ist. Deswegen ergibt sich bei kleineren Strömen ein näherungsweise linearer Verlauf:

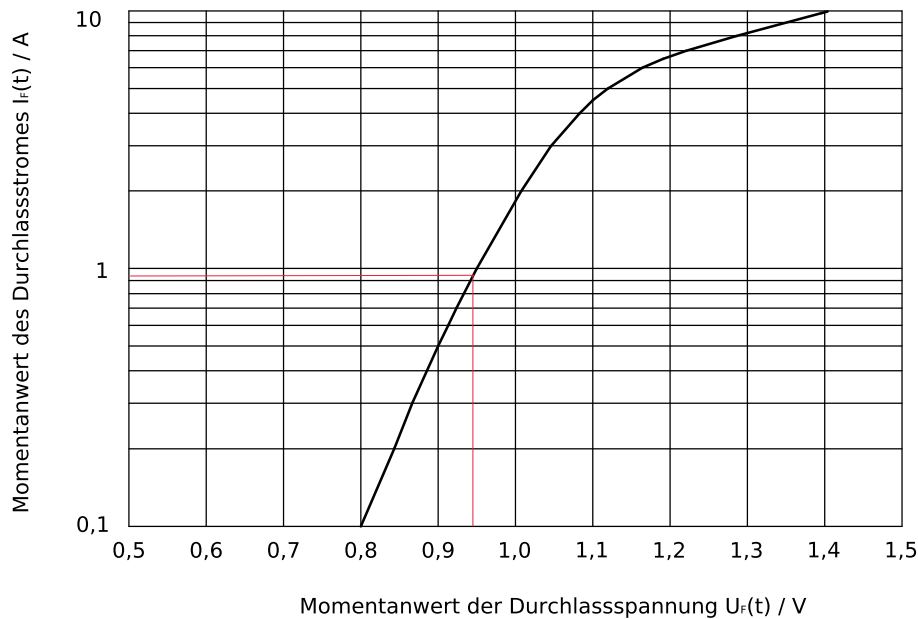


Abbildung 8.8: Durchlasskennlinie einer Beispieldiode für hohe erlaubte Sperrspannungen.

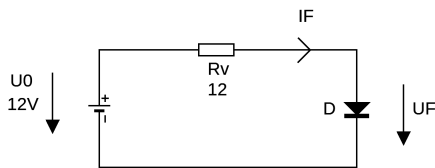
Der Zusammenhang der Momentanwerte zwischen U_F und I_F kann aus der Kennlinie des Bauteils entnommen werden. Eine nichtlineare Kennlinie ist in der praktischen Analyse solcher Schaltungen schwerer handhabbar als lineare Gleichungssysteme. Für die Analyse von Diodenschaltungen wird deshalb manchmal eine der beiden folgenden Methoden verwendet:

ITERATIONSVERFAHREN:

- Man startet mit einem Näherungswert für U_F .
- Mit diesem Wert wird die Schaltung durchgerechnet und I_F bestimmt.
- Aus der Kennlinie den zu diesem I_F gehörenden neuen Wert U_F ablesen (oder maßstabsgetreu errechnen).
- Ursprüngliches U_F mit dem neuen U_F vergleichen \Rightarrow
 - kleine Abweichung \Rightarrow man ist fertig.
 - zu große Abweichung \Rightarrow man wiederholt das Verfahren ab dem zweiten Punkt.

Das bedeutet, man tastet sich in mehreren Schritten - hoffentlich - näher an die tatsächlichen Werte von U_F und I_F an.

BEISPIEL: Hier wird die Diode der Durchlasskennlinie nach Abb. 8.8 untersucht, die für relativ hohe Sperrspannungen gebaut ist. Bei diesem Modell liegt daher auch die Durchlassspannung in diesem Beispiel höher als die oft erwähnten $U_F \approx 0,65 \text{ V}$:



Annahme: $U_F' = 0.9 \text{ V}$

$$I_F' = \frac{U_0 - U_F'}{R_V} = \dots \text{ mA}$$

in die Kennlinie $\Rightarrow U_F'' = \dots \text{ V}$

$$I_F'' = \frac{U_0 - U_F''}{R_V} = \dots \text{ mA}$$

in die Kennlinie $\Rightarrow U_F''' = \dots \text{ V}$

Ergebnis: $U_F = \dots \text{ V} @ I_F = \dots \text{ mA}$

$$U_F' = 0.9 \text{ V}$$

$$I_F' = \frac{U_0 - U_F'}{R_V} = \frac{12 \text{ V} - 0.9 \text{ V}}{12 \Omega} = 0.925 \text{ A} = 925 \text{ mA}$$

$$\rightarrow U_F'' = 0.99 \text{ V}$$

$$I_F'' = \frac{U_0 - U_F''}{R_V} = \frac{12 \text{ V} - 0.99 \text{ V}}{12 \Omega}$$

GRAFISCHE NETZWERKANALYSE:

Man verwendet dazu eine Gleichung und eine Funktion:

- Die Maschenregel im unteren Beispiel $R_V \cdot I_F + U_F = U_0$ und die
- Diodenkennlinie als Funktion.

Die Geradengleichung $U_F = U_0 - R_V \cdot I_F$ wird mit dem Diagramm der Diodenkennlinie kombiniert. Der Schnittpunkt ergibt den Arbeitspunkt.

Das Umformen der Geradengleichung ergibt:

$$I_F = \frac{U_0 - U_F}{R_V} = \frac{U_0}{R_V} - \frac{1}{R_V} \cdot U_F \quad (8.3)$$

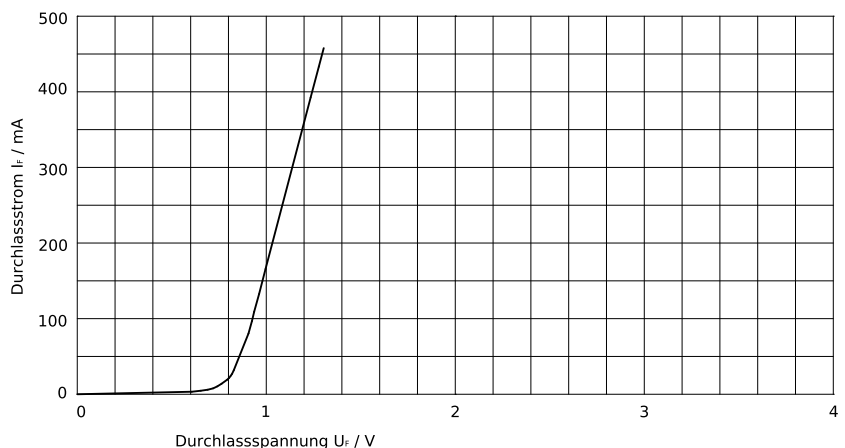
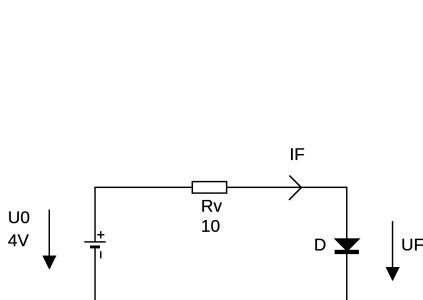
Zum Zeichnen der Geraden bieten sich zwei Punkte an:

Punkt 1: $I_F = 0 \Rightarrow U_0 = U_F$

Punkt 2: $U_F = 0 \Rightarrow I_F = \frac{U_0}{R_V}$

BEISPIEL:

Hier verwenden Sie eine Siliziumdiode, wie sie oft zum Gleichrichten kleiner Ströme in elektronischen Schaltungen eingesetzt wird. Ermitteln Sie den Arbeitspunkt dieser Schaltung.



8.6 Verschiedene Diodenarten

Je nach Anwendungsgebiet gibt es unterschiedliche Herstellungsverfahren bzw. Aufbauarten. Häufige Anwendungen betreffen:

- Gleichrichtung
- Spannungsstabilisierung (Zenerdioden)
- Anzeigen und Beleuchtung

8.6.1 Gleichrichterdiolen

Damit die Gleichrichterdiode in Sperrrichtung eine hohe Spannungsfestigkeit aufweist, wäre eine niedrige Dotierung notwendig. Niedrig dotiertes Material ist allerdings schlecht leitend und bewirkt einen unerwünscht hohen Bahnwiderstand. Dieser verursacht eine höhere Spannung in Durchlassrichtung und erhöhte Verluste des Bauteils.

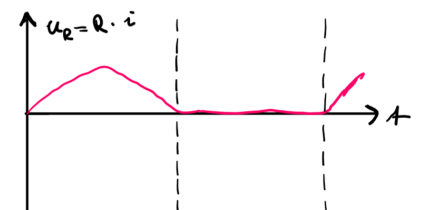
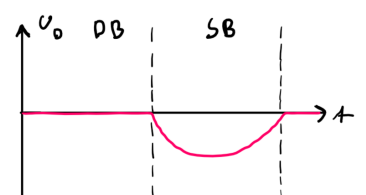
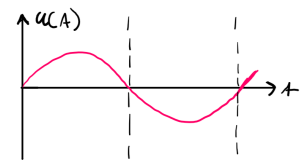
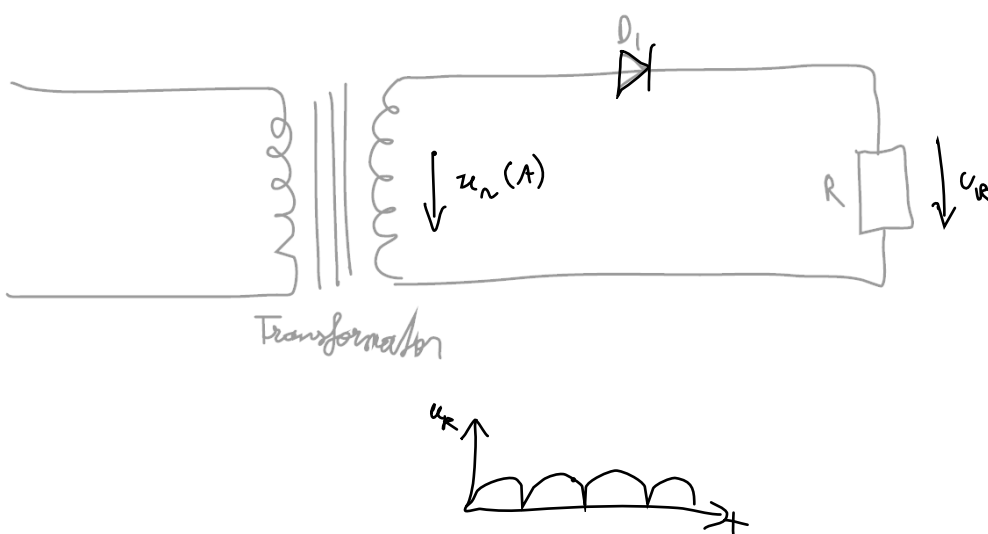
Eine mögliche Abhilfe ist es, die Randzonen von Gleichrichterdiolen stärker zu dotieren. Dann wird in Durchlassrichtung die Raumladungszone mit Ladungsträgern aus den Randbereichen überflutet, und der Bahnwiderstand wirkt sich geringer aus.



Je nach max. Durchlassstrom unterscheidet man:

- Dioden mit Drahtanschlüssen für Ströme im Bereich von einigen Ampere,
- Schraubdioden mit Durchlassströmen bis etwa max. 100 A und
- Scheibendioden mit Wasserkühlung für noch höhere Ströme.

Einweggleichrichter mit Transformator und Lastwiderstand:

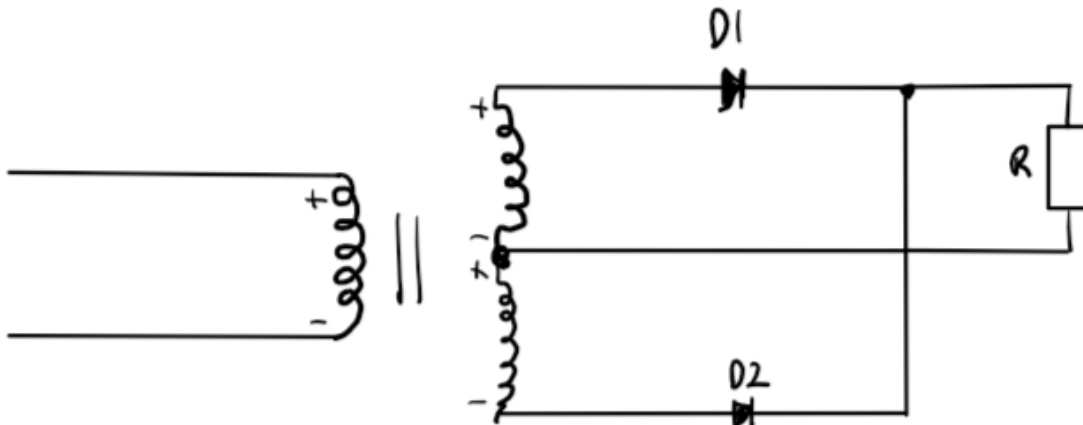


Vernachlässigt man die Durchlassspannung an der Diode, ergibt sich für den Gleichrichtwert der Ausgangsspannung: $\overline{U_G} = \frac{\overline{U_{\sim}}}{\pi}$

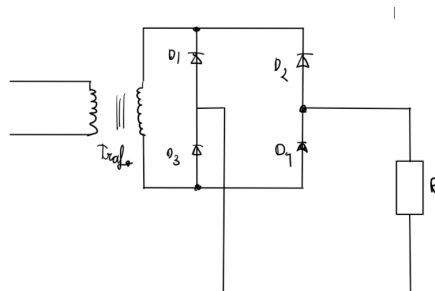
Die Welligkeit der Ausgangsspannung ist groß. Sie kann durch Parallelschalten eines Kondensators zum Widerstand R verringert werden. Ist der Kondensator groß genug, kann annähernde Gleichspannung mit geringeren Einbrüchen der Spannung am Lastwiderstand erzeugt werden.

Vollweggleichrichter in Mittelpunktschaltung, Trafo und Lastwiderstand:

Diese Schaltung lässt sich mit zwei Dioden und einem Trafo mit Mittelanzapfung realisieren:



Der Gleichrichtwert unter Vernachlässigung der Flussspannungen beträgt: $\overline{U_G} = \frac{2\hat{U}_{\sim}}{\pi}$

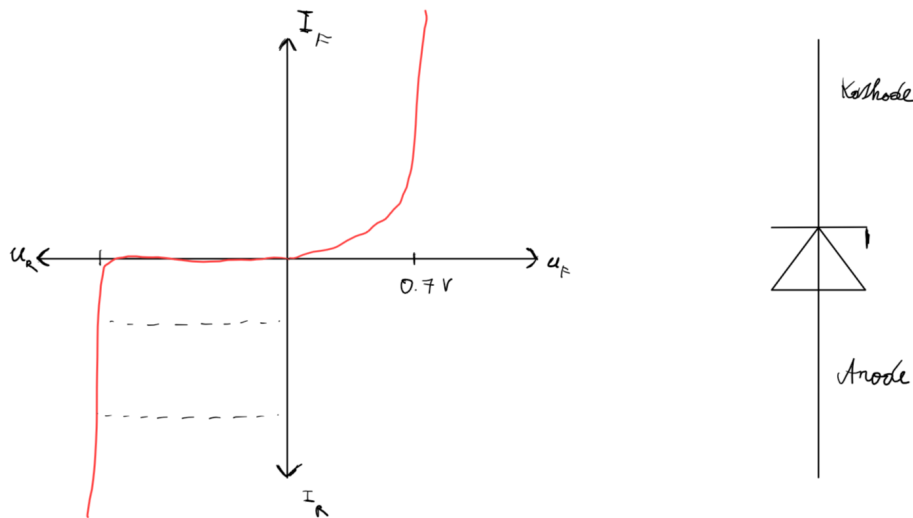
Vollweggleichrichter in Brückenschaltung

Der Vergleich zwischen den beiden Vollweggleichrichterschaltungen zeigt, dass bei der Schaltung mit Mittelpunktanzapfung die Ausgangsspannung um eine Diodenflussspannung verkleinert wird, bei der Vollweggleichrichterschaltung um zwei Flussspannungen. Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist, dass die erste Variante einen etwas komplizierteren Trafo benötigt. So ein Bauelement ist in der Regel teurer als ein herkömmlicher Transformator. Deswegen wird relativ oft ein Vollweggleichrichter mit vier Dioden (auch Brückengleichrichter genannt) eingesetzt.

Der Einweggleichrichter wird eher selten eingesetzt, er gilt oft als veraltet.

8.6.2 Zenerdioden

Zenerdioden werden üblicherweise zur Spannungsstabilisierung in Sperrrichtung betrieben.



Zener-Effekt:

Die Sperrspannung verursacht ein elektrisches Feld in der Sperrschicht. Dieses Feld bewirkt eine Kraft auf die Elektronen in den Kristallverbindungen. Ab einer bestimmten Feldstärke ist die Kraft so groß, dass Elektronen aus ihren Bindungen gerissen werden können. Es kommt zur Paarbildung, der Halbleiter wird leitfähig.

Lawineneffekt (Avalanche-Effect):

Der Lawineneffekt oder auch Lawinendurchbruch genannt setzt in der Regel bei etwas höheren Spannungen ein, als für den Zener-Effekt notwendig. Oft wirken in der Praxis beide Effekte gleichzeitig.

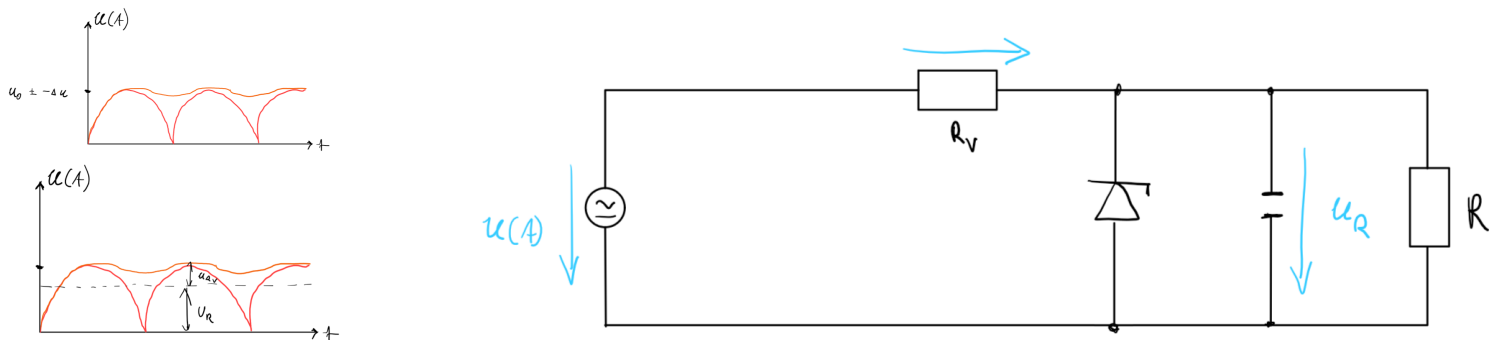
Jene Elektronen, die vom Zener-Effekt freigesetzt worden sind, werden durch das elektrische Feld beschleunigt. Ab einem bestimmten Wert können sie ein weiteres oder auch mehrere weitere Elektronen aus dem Kristallverbund ausschlagen. Die Zahl der freien Elektronen kann dabei lawinenartig ansteigen.

Durch verschiedene Halbleitermaterialien und durch unterschiedliche Dotierverfahren erreicht man Durchbruchspannungen im Bereich von ca. 2 V - 600 V. In Zenerdioden mit $U_z < 5\text{ V}$ tritt eher nur der Zener-Effekt auf. Diese Dioden haben einen negativen Temperaturkoeffizienten. In Zenerdioden mit $U_z > 6\text{ V}$ tritt verstärkt der Lawineneffekt auf, der Temperaturkoeffizient ist positiv.

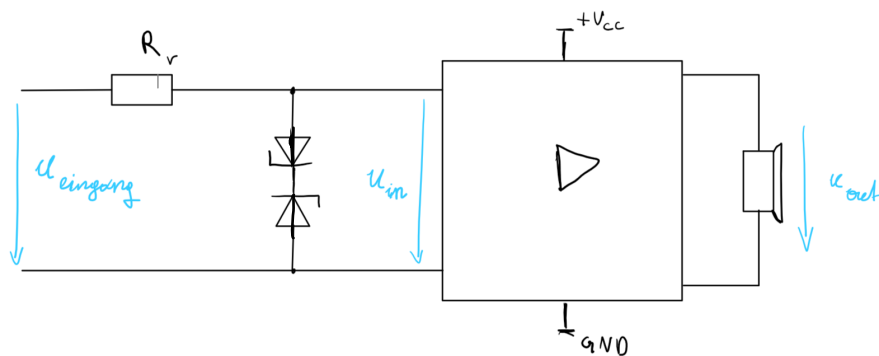
Werden Zenerdioden für ca. $U_z = 5,5\text{ V}$ gebaut, überlagern sich der Zener-Effekt und der Lawineneffekt so, dass sich die Temperaturabhängigkeit fast aufhebt. Dies kann in einfachen Referenzspannungsquellen verwendet werden, um die Spannung weitgehend temperaturstabil zu halten. Mit sogenannten Bandabstandsreferenzen kann aber eine deutlich bessere Temperaturstabilität erreicht werden. Deswegen sind Zenerdioden zur Erzeugung von temperaturstabilen Spannungen oft nicht mehr erste Wahl.

Anwendungen:

- Spannungsstabilisierung
- Gewisser Schutz vor Spannungsspitzen
- Referenzdioden zur Erzeugung einer konstanten Spannung ($T_K \approx 0$ für $U_z = 5,5\text{ V}$)

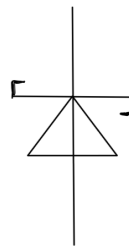
Beispiel zur Spannungsstabilisierung:

Beispiel: Schutz gegen Spannungsspitzen am Eingang eines Verstärkers

$$U_{e,max} = U_z + U_F$$


8.6.3 Schottky-Diode

Die Schottkydiode hat anstelle des pn-Überganges einen Metall-Halbleiter-Übergang.

Schaltsymbole:



Eigenschaften von Silizium-Schottkydioden:

- sehr schnell schaltend (z.B. $t_s < 100 \text{ ps}$),
- geringe Durchlassspannung (z.B. $U_F \approx 0.35 \text{ V}$),
- eher oft geringe maximal erlaubte Sperrspannung (z.B. $U_R \approx 20 \text{ V} - 50 \text{ V}$),
- relativ hoher Sperrstrom.

Anwendungen sind daher bevorzugt die Gleichrichtung hoher Frequenzen und die Gleichrichtung niedriger Wechselspannungen.