

## 6.2. Eigenschaften und Anwendungen von Halbleiterdioden

### 6.2.1. Strom-Spannungs-Kennlinie

Ein aus einem pn-Übergang bestehendes Bauelement wird als Halbleiterdiode bezeichnet. Die auf Abb. 6.5. dargestellte Kennlinie zeigt einen ausgeprägt nichtlinearen Verlauf (s. Glg. 5.40). Das ist charakteristisch für alle Bauelemente aus Halbleitern. Im Unterschied zu Ohmschen Widerständen, Kapazitäten und Induktivitäten, den *linearen Bauelementen*, bezeichnet man Halbleiterbauelemente auch als *nichtlineare Bauelemente*.

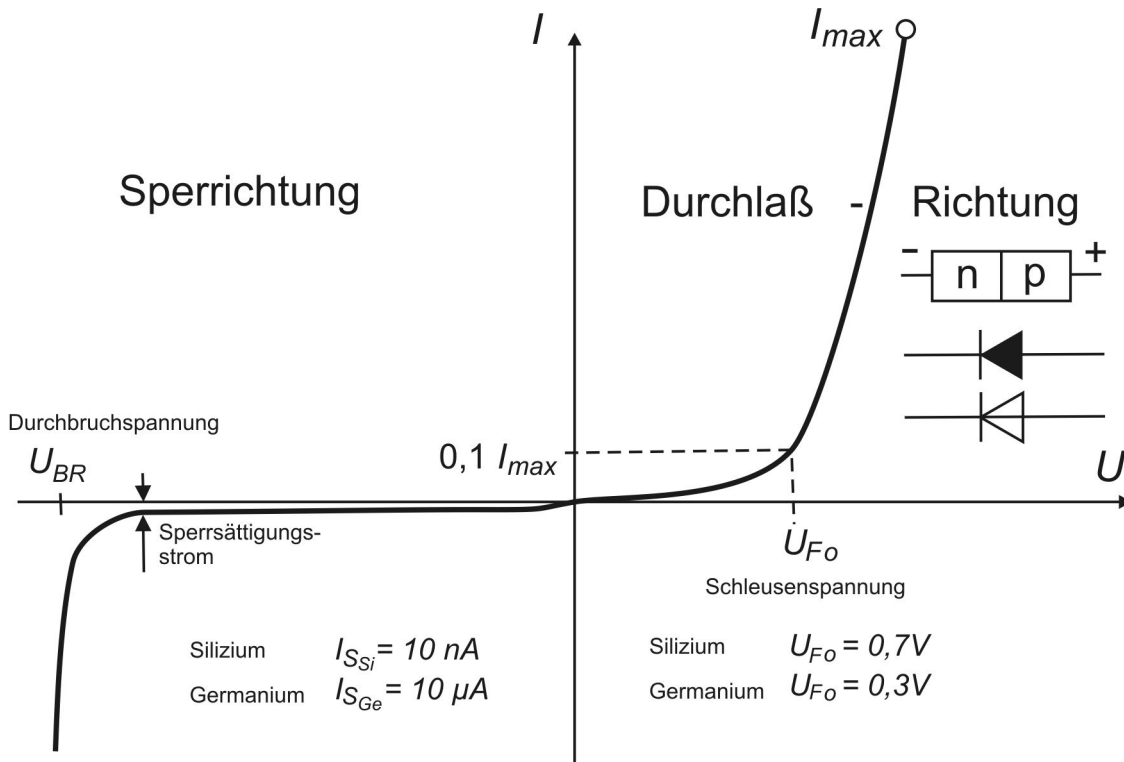


Abb. 6.5 Strom-Spannungs-Kennlinie einer Halbleiterdiode

Im ersten Quadranten ist der pn-Übergang mit der Polung der Anschlüsse in Durchlassrichtung dargestellt, darunter Schaltsymbole der HL-Diode. In Sperrrichtung über die Durchbruchspannung hinaus dürfen nur für diesen Betriebsfall speziell hergestellte Dioden betrieben werden (Zener-Dioden)

Dioden aus Germanium haben eine geringere Schleienspannung und einen höheren Sperrsättigungsstrom als Dioden aus Silizium. Das hat seine Ursache in der unterschiedlichen Breite der verbotenen Zone. Die Diffusionsspannung ist deshalb bei Silizium größer als bei Germanium. Folglich ist bei Silizium ein stärkeres äußeres Feld vonnöten, um die Sperrschicht leitfähig zu machen. Hieraus resultiert die bei Silizium höhere Schleienspannung. Der Sperrstrom ist bei Germanium höher, da wegen der geringeren Breite der verbotenen Zone bei Germanium stets mehr Ladungsträgerpaare generiert werden. Erst bei Überschreiten der Schleienspannung steigt der Diodenstrom exponentiell an, Auch in Durchlassrichtung tritt an der Diode somit stets ein Spannungsabfall auf. Hieraus resultiert eine in der Schaltungspraxis oft genutzte Möglichkeit, einen von der Stromstärke nur wenig abhängigen Spannungsabfall zu erzeugen: es werden einfach eine oder auch mehrere Dioden in Reihe geschaltet in Flussrichtung betrieben. Da im Durchlassbereich näherungsweise gilt  $I \approx \exp U/U_T$  (s. Glg. 5.40), ist die Diodenkennlinie stark von der Temperatur abhängig, ggf. ist Kühlung notwendig, da bei Leistungsdioden eine mitunter erhebliche Verlustleistung abgeführt werden muss.

### 6.2.2. Gleichrichtung von Wechselspannung

Bei der Erzeugung von Elektroenergie und bei deren Transport ist Wechselspannung sehr vorteilhaft, für viele Anwendungen benötigt man jedoch Gleichspannung. Gleichrichter können diese Aufgabe bewältigen. Historisch wurden zuerst Hochvakuumröhren verwendet. Eine durch thermische Anregung an der Kathode erzeugte Elektronenwolke bewegt sich unter dem Einfluss des äußeren elektrischen

Feldes zur Anode. Vertauscht man die Polung von Anode und Kathode erlischt der Ladungstransport sofort, da die Anode nicht geheizt wird und somit keine Elektronen emittiert. Für höhere Leistungen verwendete man Quecksilberdampfgleichrichter. Der Nachteil dieser Geräte besteht in der Notwendigkeit zur Heizung, kompliziertem und voluminösem Aufbau, hohe Anschaffungs- und Wartungskosten. Die ersten Trockengleichrichter auf der Basis von Halbleitern verwendeten Cadmiumselenid (Selen-gleichrichter) oder Kupferoxid (Kupferoxydul-Gleichrichter) und wurden standardmäßig etwa ab 1950 eingesetzt. In Flussrichtung hatten diese Gleichrichter allerdings einen Innenwiderstand zwischen  $3\Omega$  und  $30\Omega$  bei typischen Stromdichten um  $100\text{mA}/\text{cm}^2$ , so dass großflächige und kaskadierte Anordnungen notwendig wurden. Weitere Nachteile waren nur kleine Sperrspannungen, relativ großer Sperrstrom, starke Temperaturabhängigkeit. Moderne Siliziumgleichrichterdioden sind kompakt, je nach Bauform für hohe Spannungen (über  $1\text{kV}$ ), Durchlasströme bis  $1000\text{A}$  und Frequenzen bis in den GHz-Bereich geeignet. Der Sperrstrom ist sehr gering, die Temperaturabhängigkeit der Parameter wie bei allen HL-Bauelementen aber nicht zu vernachlässigen. Um bei hohen Durchlasströmen die Stromdichte in zulässigen Grenzen zu halten, werden  $pn$ -Schichten von einigen  $\text{cm}^2$  Fläche verwendet. Die Kühlung muss optimal sein, da bei solch hohen Strömen über die Schleusenspannung eine erhebliche Verlustleistung anfällt. Die erstaunlich hohe Spannungsfestigkeit wird durch einen Kunstgriff erreicht. Zwischen  $p$ - und  $n$ -Gebiet wird eine dünne Schicht völlig undotierten Halbleitermaterials eingebracht. Dieser Halbleiter stellt wegen seiner ausschließlichen Eigenleitung (*intrinsic*) eine gute Isolationsschicht dar. Aus den  $n$ - bzw.  $p$ -dotierten Bereichen eindringende Ladungsträger können ungehindert durch diese  $i$ -Schicht diffundieren und rekombinieren, wodurch sich ausserhalb der  $i$ -Schicht die gleichen Verhältnisse einstellen wie ohne diese. Somit bildet sich ganz analog den Verhältnissen am  $pn$ -Übergang auch hier zwischen  $p$ - und  $n$ -dotierten Bereichen die Diffusionsspannung heraus, jetzt allerdings in größerem Abstand voneinander. Diese Verhältnisse ähneln wieder einem auf die Diffusionsspannung aufgeladenen Kondensator, allerdings bei wesentlich größerem „Plattenabstand“, was die hohe Spannungsfestigkeit dieser *pin-Dioden* genannten Bauelemente bewirkt.

Bei der Gleichrichtung von Wechselspannung unterscheidet man zwischen Einweg- und Zweiweggleichrichtung, je nachdem, ob nur die eine Halbwelle oder beide Halbwellen der Wechselspannung gleichgerichtet werden. Der Unterschied ist wie bei einem Fahrrad, dessen Pedale nur mit dem rechten Fuß oder mit beiden Füßen getreten wird. Tritt man nur mit einem Fuß, ist die Leistung geringer und es ruckelt etwas mehr beim Fahren.

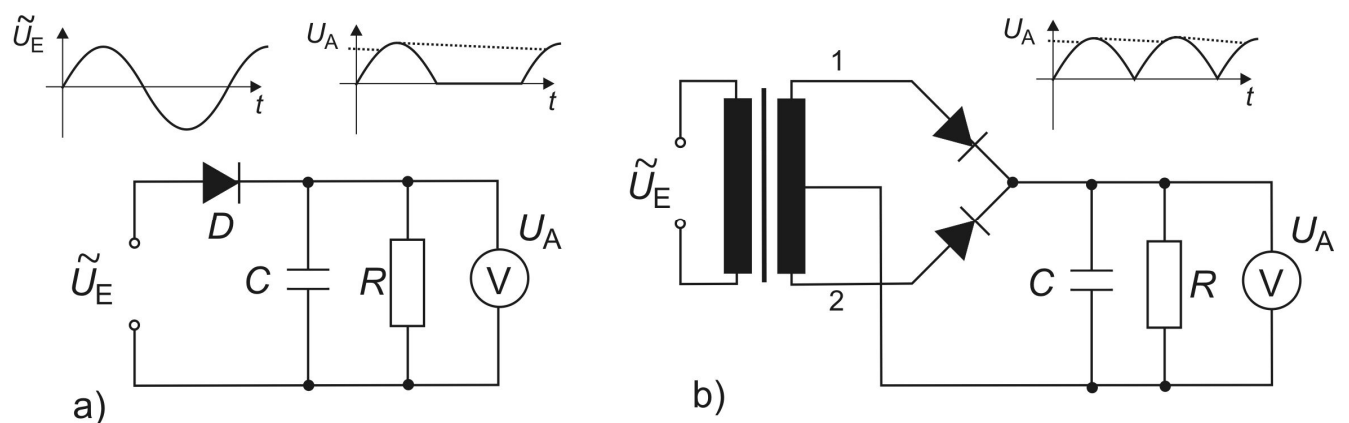


Abb. 6.6 Gleichrichterschaltungen

a) Einweggleichrichtung; b) Zweiweggleichrichtung

Bei der Einweggleichrichtung sperrt die Diode, sobald die Schleusenspannung unterschritten wird. Somit wird nur die positive Halbwelle auf den Ausgang übertragen. Der Kondensator  $C$  dient zur Glättung der Ausgangsspannung. Wird die Diode in Flussrichtung betrieben, wird der Kondensator aufgeladen. Sinkt die Eingangsspannung unter die Kondensatorspannung, sperrt die Diode und über den Lastwiderstand  $R$  entlädt sich der Kondensator. Den Spannungsverlauf mit Glättungskondensator verdeutlicht die gestrichelte Kurve, ohne Glättung die durchgezogene.

Bei der Zweiweggleichrichtung wird ein Trafo mit Mittenanzapfung der Sekundärwicklung verwendet. Bezüglich der Mittenanzapfung sind die Wechselspannungen an 1 und 2 gegenphasig zueinander, so dass die beiden Dioden abwechselnd sperren und leiten und somit beide Halbwellen nacheinander gleichgerichtet werden.

Abb. 6.7 Graetz-Brückenschaltung

Mit 4 Dioden kann man nebenstehende Zweiweggleichrichtung realisieren. Der Kondensator wird bei der positiven Halbwelle über die Dioden 1 und 4 aufgeladen, während der negativen Halbwelle über die Dioden 2 und 3. Die Schaltung funktioniert natürlich auch ohne Glättungskondensator, dann liegt am Lastwiderstand R eine entsprechend stark verbrummte Gleichspannung an.

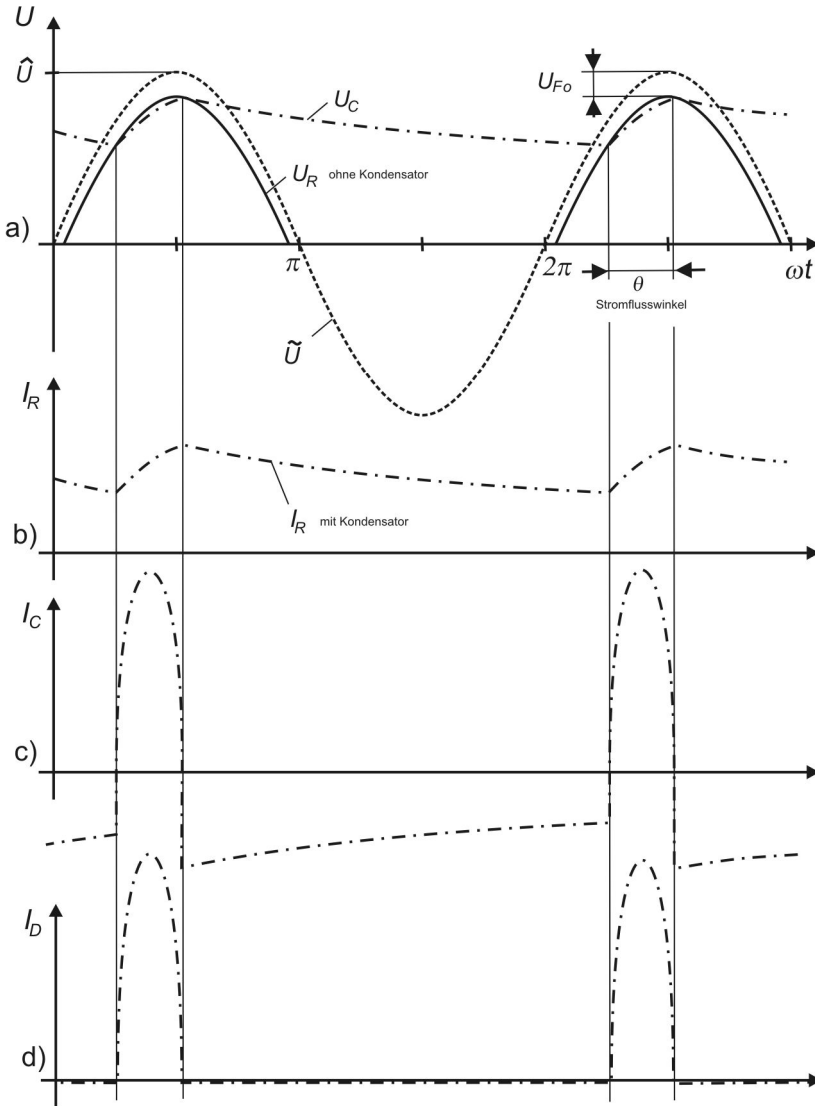
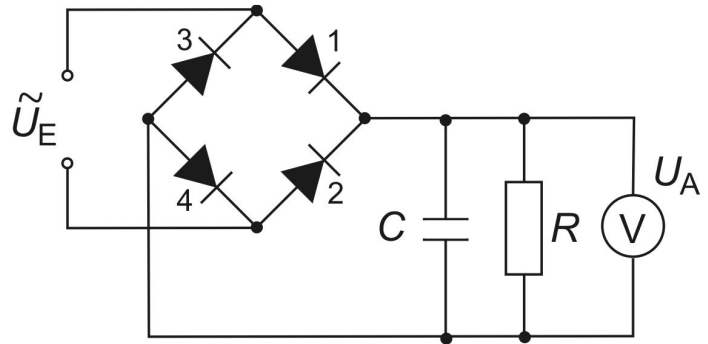


Abb. 6.8 Spannungen und Ströme bei der Einweggleichrichtung

a) Ohne Verwendung eines Glättungskondensators hat die gleichgerichtete Spannung den Verlauf der positiven Halbwellen der eingespeisten Wechselspannung, vermindert um den Spannungsabfall  $U_{Fo}$  (Schleusenspannung) an der in Flussrichtung betriebenen Diode. Bei Verwendung eines Glättungskondensators liegt an diesem auch die Ausgangsspannung an. Der Kondensator wird aufgeladen, sobald gilt

b)  $U(t) \geq U_C + U_{Fo}$ . Sinkt die Eingangsspannung, entlädt sich der Kondensator über den Lastwiderstand mit einer exponentiellen Zeitabhängigkeit

c)  $U_C(t) = U_{max} \exp(-t / RC)$ .

d) Der Strom über den Lastwiderstand hat einen ganz ähnlichen Zeitverlauf wie die Spannung am Kondensator (Ohmsches Gesetz)

e) Am Kondensator ändert sich periodisch die Stromrichtung. Einer kurzen Phase der Aufladung über die Dioden folgt eine solche der Entladung über den

Lastwiderstand. Es gilt  $\int_t^{t+T} I_C(t) dt = 0$ .

f) Bei Verwendung eines Glättungskondensators fließt nur während einer kurzen Zeit  $\delta t \ll T$  mit

$\omega \cdot \delta t = \Theta$  (Stromflusswinkel) ein relativ starker Strom über die Diode, ansonsten sperrt sie.

### 6.2.3 HF-Gleichrichtung (Amplitudendemodulation)

Wegen der günstigen Ausbreitungseigenschaften hochfrequenter elektromagnetischer Wellen bieten sich diese als Träger von Information an. Im Frequenzbereich zwischen  $10^5$ - $10^8$ Hz (Lang-, Mittel-, Kurzwelle, Flugfunk) wird hierzu die *Amplitudenmodulation* (AM) verwendet. Die Amplitude der HF-Welle variiert zeitlich im Takt der zu übertragenden Information. Im einfachsten Fall wird die Amplitude zwischen Null und ihrem Maximalwert ein- bzw. ausgeschaltet (Morsen). Bei Übertragung eines analogen Signals wird dieses der Amplitude der Trägerwelle als Zeitfunktion aufgeprägt. Die Demodulation einer amplitudenmodulierten Welle erfolgt mit einem Gleichrichter ganz analog zur

Einweggleichrichtung Abb.6.6a. Als HF-Richtdioden finden spezielle Bauformen mit geringer Sperrschichtkapazität und niedriger Schleusenspannung Verwendung. Die Zeitkonstante  $\tau = RC$  der HF-Gleichrichtung muss groß sein gegen die Periode des HF-Signal, aber andererseits klein genug, um das NF-Signal nicht zu glätten. Somit gilt  $\omega_{\text{HF}} \gg 1/RC \gg \omega_{\text{NF}}$ .

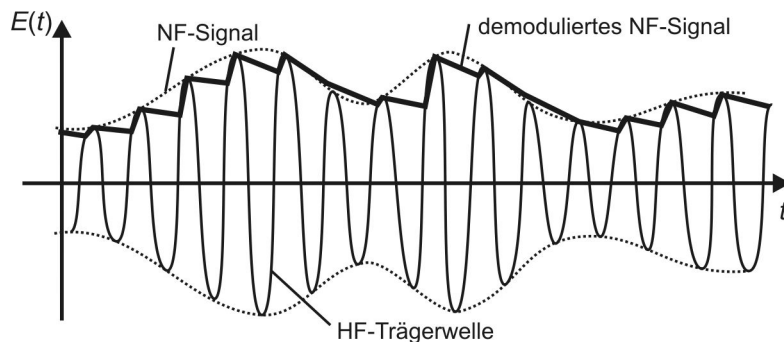


Abb. 6.9 Amplitudenmodulation

Das zu übertragende Signal bildet die Hüllkurve der Trägerwelle (gestrichelte Kurve). Bei der Demodulation mittels Gleichrichtung wird die Hüllkurve extrahiert.

Bei der amplitudenmodulierten Trägerwelle wird die Intensität („Lautstärke“) des Signals als Variationsbreite der Amplitude übertragen. Die Schnelligkeit der zeitlichen Änderung der HF-Amplitude liefert die Frequenz („Tonhöhe“) des NF-Signals. Da u.a. insbesondere durch atmosphärische Störungen gerade die Intensität der Trägerwelle beeinflusst wird, ist davon auch das NF-Signal betroffen. Wesentlich unempfindlicher bezüglich Störungen ist die Methode der *Frequenzmodulation* (FM). Dabei wird die Frequenz der Trägerwelle im Takt der NF verstimmt. Der Betrieb von Fernsehsendern, UKW-Radio sowie die Telekommunikation wird mittels FM realisiert.

#### 6.2.4. Spannungsstabilisierung mittels Zener-Diode

Die ZENER-Diode (oder Z-Diode) wird im Durchbruchbereich, also in Sperrrichtung betrieben. Hier hat die Kennlinie einen starken Anstieg, also einen hohen differentiellen Leitwert bzw. kleinen differentiellen Widerstand  $R_{\text{diff}} = \Delta U_Z / \Delta I_Z$ . Eine kleine Spannungsschwankung der Eingangsspannung  $\Delta U_E$  bewirkt eine gleichsinnige Änderung der Zenerspannung  $\Delta U_Z = U_Z' - U_Z$  und verschiebt den Arbeitspunkt AP der Zenerdiode, wobei sich der Zenerstrom drastisch ändert  $\Delta I_Z = I_Z' - I_Z$ . Hierdurch fällt am Vorwiderstand  $R_V$  eine höhere Spannung ab, somit fast die gesamte Eingangsspannungsschwankung. Die Ausgangsspannung erfährt nur eine vergleichsweise geringe Änderung  $\Delta U_A = U_Z$ .

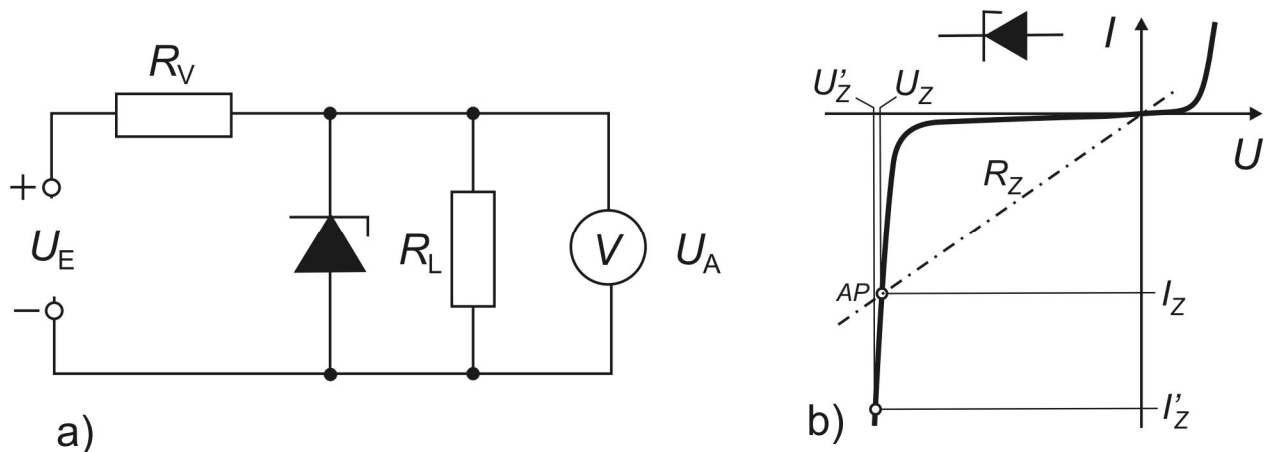


Abb.6.10 Spannungsstabilisierungsschaltung mit Z-Diode a) und Kennlinie b)

In der Schaltung a) liegen die Z-Diode und der Lastwiderstand parallel hinter einem Vorwiderstand. Der kleine differentielle Widerstand der Z-Diode schließt Schwankungen der Eingangsspannung faktisch kurz. Der Widerstand der Z-Diode im Arbeitspunkt AP entspricht dem eines Widerstandes  $R_Z$  (strichpunktierte Kennlinie).

Bei der Dimensionierung einer Spannungsstabilisierung wird zunächst eine geeignete Z-Diode ausgewählt. Zu beachten ist, dass die Diode dem Wert der Spannung entspricht, auf den stabilisiert werden soll. Notwendig sind ferner ausreichend hohe Werte für den zulässiger Maximalstrom sowie die maximale Verlustleistung. Die Z-Diode hat am Arbeitspunkt einen Widerstand von  $R_Z$ , der mit dem dazu parallelen  $R_L$  und dem Vorwiderstand  $R_V$  einen Spannungsteiler bildet.

$$U_E = U_V + U_Z = R_V (I_Z + I_L) + U_Z = R_V \left( \frac{U_Z}{R_Z} + \frac{U_Z}{R_L} \right) + U_Z \quad (6.1)$$

Als Spannungsteilverhältnis ergibt sich

$$\frac{U_Z}{U_E} = \frac{R_L R_Z}{R_V R_L + R_V R_Z + R_L R_Z} \quad (6.2)$$

Eine differentielle Betrachtung ( $U_E$  in 6.1 nach  $U_Z$  ableiten) liefert für die Schwankungen von Eingangs- und Ausgangsspannungen ein Verhältnis

$$\frac{\Delta U_Z}{\Delta U_E} = \frac{R_L R_{diff}}{R_V R_L + R_V R_{diff} + R_L R_{diff}} \approx \frac{R_{diff}}{R_V} \quad (6.3)$$

Da  $R_{diff} \ll R_V, R_L$ , ergibt sich wegen  $\Delta U_Z / \Delta U_E \ll 1$  eine starke Dämpfung der Eingangsspannungsschwankung.

Auf ganz ähnliche Art und Weise kann die Zenerdiode Schwankungen der Ausgangsspannung ausgleichen, die als Folge einer zeitlich veränderlichen Last  $R_L(t)$  auftreten. Möge die Eingangsspannung  $U_E$  konstant sein und der Lastwiderstand um Werte  $\Delta R(t)$  zeitlich schwanken. Eine differentielle Betrachtung liefert in diesem Fall

$$\frac{\Delta U_Z}{U_Z} \approx \frac{R_{diff}}{R_L} \cdot \frac{\Delta R_L}{R_L} \quad (6.4)$$

### 6.2.5 Spannungsverdopplung und -Vervielfachung

Wegen ihres kompakten Aufbaus werden Spannungsverdopplerschaltungen aus Widerständen, Kondensatoren und Dioden vielfach anstelle von Transformatoren angewendet.

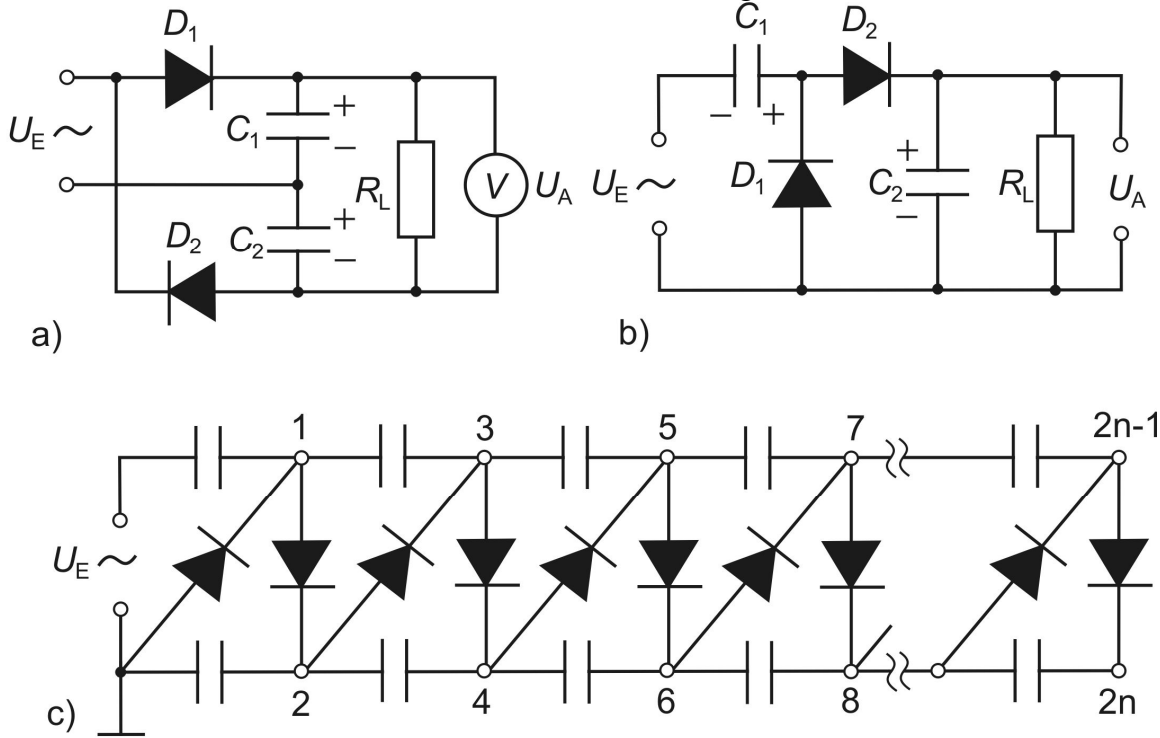


Abb. 6.11 Schaltungen zur Spannungsverdopplung und -Vervielfachung

a) Zweipuls-Verdopplerschaltung (DELON- oder GREINACHER-Schaltung)

Die Schaltung besteht aus zwei Einweg-Gleichrichterschaltungen, denen jeweils ein Kondensator als Last nachgeschaltet ist. Die Gleichrichterdiode  $D_1$  erzeugt eine Gleichspannung aus der positiven Halbwelle der Eingangswchelspannung, die Gleichrichterdiode  $D_2$  eine solche aus der negativen Halbwelle. Die beiden Gleichrichterdioden müssen dabei eine Sperrspannung vom doppelten Scheitelwert der Eingangswchelspannung vertragen können. Die beiden Lastkondensatoren  $C_1$  und  $C_2$  werden abwechselnd nahezu auf den Scheitelwert der Wchelspannung aufgeladen. Durch ihre Zusammenschaltung entsteht dabei am Ausgang eine Gleichspannung vom nahezu zweifachen Scheitelwert  $\hat{U}$  (vermindert um die doppelte Schwellenspannung  $U_{F0}$ ).

### b) Einpuls-Verdopplerschaltung (VILLARD-Schaltung)

Einer Einweg-Gleichrichterschaltung bestehend aus  $C_1$  und  $D_1$  ist ein Kondensator und eine Diode ( $C_2$  und  $D_2$ ) nachgeschaltet. Während einer Halbwelle werden die beiden Kondensatoren aufgeladen. Eine halbe Periode später addiert sich hierzu die Spannung der zweiten Halbwelle zur Ausgangsspannung. Damit der Kondensator  $C_2$  sich nicht wieder über den Kondensator  $C_1$  entlädt, wird die Diode  $D_2$  als Entladesperre geschaltet. Die Ausgangsspannung der unbelasteten Schaltung beträgt etwa  $2\hat{U}$

### c) Kaskadenschaltung

Die VILLARD-Schaltung lässt sich kaskadieren. Bei  $n$  aufeinanderfolgenden Schaltungsstufen lassen sich an den Punkten 1, 2, 3, ...,  $2n$  an der unbelasteten Schaltung die Spannungen  $\hat{U}$ ,  $2\hat{U}$ ,  $3\hat{U}$ , ...,  $2n\hat{U}$  abgreifen.

Bei den Spannungsvervielfacherschaltungen müssen folgende Dinge beachtet werden:

- Der Strom, der durch die Gleichrichterioden fließt, erhöht sich mit der Anzahl  $n$  der Stufen.
- Der Eingangsstrom ist  $n$ -mal so groß wie der Laststrom.
- Der Spannungsvervielfacher ist eine Gleichspannungsquelle mit einem hohen Innenwiderstand.
- Der Innenwiderstand steigt mit der Anzahl der Stufen. Er verringert sich mit der Vergrößerung der Kapazitäten der verwendeten Kondensatoren.
- Die verwendeten Kondensatoren müssen für eine Spannung von  $2\hat{U}$  ausgelegt sein.
- Die Stromentnahme am Ausgang ist sehr gering.
- Nach dem Einschalten einer Spannungsvervielfacherschaltung vergeht etwas Zeit, bis alle Kondensatoren aufgeladen sind.
- Bei der Stromentnahme wird der am Ende liegende Kondensator zuerst entladen. Dieser wird vom vorgeschalteten Kondensator wieder aufgeladen.

Spannungsvervielfacher werden zur Erzeugung von Hochspannung für Laserdrucker, Elektronenbildröhren, elektrostatische Staubfilter und ähnlichen Anwendungen eingesetzt, bei denen hohe Spannungen bei nur geringen Strömen bzw. Leistungen benötigt werden.



### 6.2.6 Schottky-Diode

Eine Schottky-Diode beruht auf einem Metall-Halbleiter-Übergang, s. 5.4.4.3. Wenn die Austrittsarbeit der Elektronen im Metall größer als die im Halbleiter, so können beim Kontakt Elektronen entsprechend hoher Energie leichter vom Halbleiter ins Metall übergehen als umgekehrt. Hierdurch entsteht in der Halbleiterrandschicht eines  $n$ -Halbleiters eine positive Raumladung, verbunden mit einer Verarmung an Majoritätsladungsträgern (Elektronen). Gegenüber entsteht im Metall eine entsprechend große negative Flächenladung. Dies bewirkt eine hochohmige Grenzschicht zwischen Metall und Halbleiter. Wird am Metall gegenüber dem Halbleiter eine positive Spannung angelegt, wird die Raumladungszone reduziert und Elektronen können aus dem Halbleiter ins Metall fließen. Ein deutlicher Stromanstieg setzt bereits bei der vergleichsweise kleinen Flussspannung von  $U_{F0}=0,3\text{V}$  ein. Bei negativer Spannung wird die Raumladungszone vergrößert und die Diode bleibt gesperrt. Die Kennlinie der Schottky-Diode gleicht also der einer Halbleiterdiode (Abb.6.5). Sowohl im Metall als auch im Halbleiter wird der Ladungstransport nur durch die Elektronen realisiert. Die Löcherkonzentration im Bahngebiet des Halbleiters bleibt konstant. Es diffundieren keine Löcher vom Metall in den Halbleiter. Somit besitzt die Schottky-Diode keine Diffusionskapazität und die störende Speicherzeit im Schalterbetrieb (s.u.) entfällt. Ein extrem schnelles Schaltverhalten im GHz-Bereich ist die Folge. Ein weiterer Vorteil liegt in der kleinen Flussspannung von Schottky-Dioden. Bei der Verwendung dieser Bauelemente in Gleichrichterschaltungen werden somit die Leistungsverluste infolge des Spannungsabfalls an den Dioden verringert.

### 6.2.7 Dioden als Schalter

Wegen seiner Richtwirkung wird der  $pn$ -Übergang häufig als Schalter genutzt. Im Idealfall besitzt der  $pn$ -Übergang zwei Schaltzustände:

- In Durchlassrichtung fällt die Spannung  $U_{F0}$  über dem  $pn$ -Übergang ab. Der Strom wird durch den Innenwiderstand der Diode  $R_i$  sowie durch die äußere Beschaltung (Vorwiderstand, Ausgangswiderstand der Signalquelle) begrenzt.
- Für alle  $U < U_{F0}$  sperrt der  $pn$ -Übergang. Es fließt der sehr kleine Sperrsättigungsstrom  $I_S$ .

Beim Umschalten zwischen den beiden stationären Zuständen bewirken die *Sperrschicht-* und *Diffusionskapazität* zeitliche Verzögerungen. Am gesperrten  $pn$ -Übergang bewirkt die Änderung der Sperrspannung  $dU$  eine Änderung der Raumladung  $dQ_s$  in der Sperrschicht. Dies entspricht einem kapazitiven Verhalten.

$$\text{Sperrschichtkapazität } C_S = \frac{dQ_s}{dU} \tag{6.5}$$

Befindet sich der  $pn$ -Übergang in Durchlassrichtung, sind die Minoritätsladungsträgerdichten in den *Bahngebieten* (das sind die Bereiche außerhalb der Sperrschicht) stark gegenüber den Gleichgewichtsdichten angehoben. Dies stellt eine Ladungsspeicherung dar.

$$\text{Diffusionskapazität } C_D \cong \tau_D \frac{I}{U_T} \tag{6.6}$$

Der Parameter  $\tau_D$  stellt eine Zeitkonstante für die Auf- und Abbaugeschwindigkeit der Diffusionsladung dar. Sie entspricht der Laufzeit der Ladungsträger durch die Bahngebiete.

**Einschalten:** Beim Umschalten von Sperr- in Durchlassrichtung wird zunächst die Sperrspannung über dem  $pn$ -Übergang abgebaut. Durch die Entladung der Sperrschichtkapazität und die anschließende Aufladung der Diffusionskapazität entsteht eine Spitze im Diodenstrom. Nach der Zeit  $t_d$  stellt sich der stationäre Durchlassstrom  $I_F$  ein:

$$I_F = \frac{U_1 - U_{F0}}{R_1 + R_B} \tag{6.7}$$

mit der Quellenspannung  $U_1$ , dem Vorwiderstand  $R_1$  und dem Bahnwiderstand  $R_B$ . Der Bahnwiderstand ist der Ohmsche Widerstand der Halbleitergebiete außerhalb der Sperrschicht.

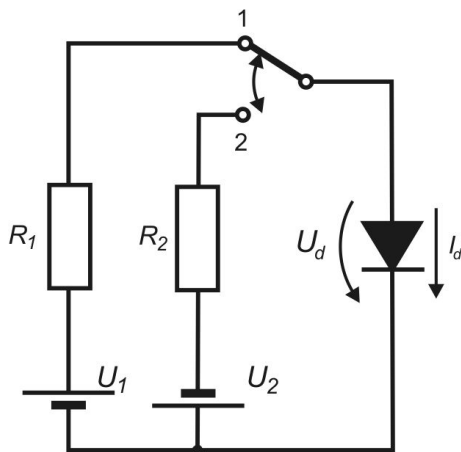


Abb. 6.12 Schaltung zur Beschreibung des Schaltverhaltens der  $pn$ -Diode

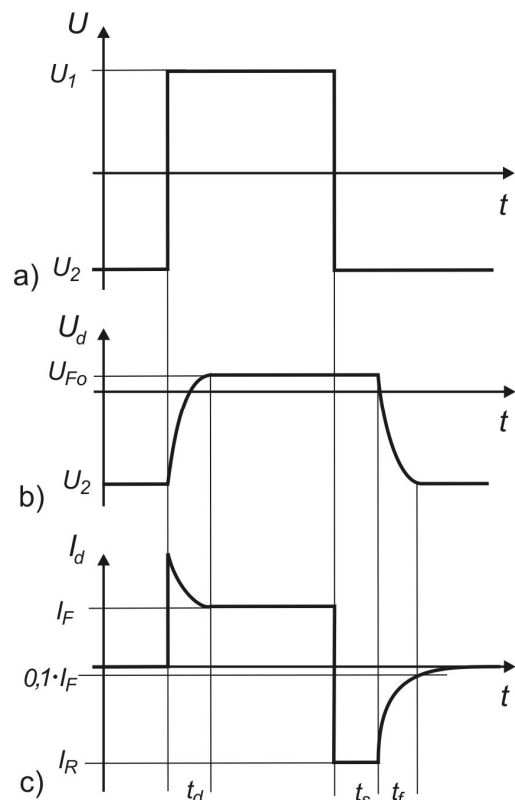


Abb. 6.13 Zeitverläufe beim Schalten des  $pn$ -Überganges

- geschaltete Quellenspannung
- Diodenspannung
- Diodenstrom

**Ausschalten:** Nach dem Umschalten der Quellenspannung muss zunächst die in der Diffusionskapazität gespeicherte Ladung abgebaut werden. Dies erfolgt mit dem konstanten negativen Rückstrom

$$I_R = \frac{U_{F0} - U_2}{R_2 + R_B}.$$

Es ergibt sich eine *Speicherzeit*  $t_S$  von

$$t_S = \tau_D \ln \left( 1 - \frac{I_F}{I_R} \right). \quad (6.8)$$

Nachdem der *pn*-Übergang gesperrt ist, wird die Sperrschichtkapazität auf die von der Quelle gelieferte Sperrspannung aufgeladen. Der Diodenstrom nähert sich exponentiell an den stationären Sperrstrom an. Als *Abfallzeit*  $t_f$  bezeichnet man die Zeit bis zur Unterschreitung von 10% des Rückstroms.

Damit ergibt sich eine Abfallzeit von

$$t_f = \bar{C}_S (R_2 + R_B) \ln 10 \quad (6.9)$$

mit der mittleren Sperrschichtkapazität  $\bar{C}_S$ .

Um schnelles Umschalten der Diode zwischen Sperr- und Durchlassrichtung zu erreichen, sind sowohl geringe Diffusions- und Sperrschichtkapazitäten als auch ein geringer Bahnwiderstand nötig. Spezielle *Schaltdioden* werden diesen Anforderungen in besonderem Maße gerecht.

Mit Dioden lassen sich leicht logische Schaltungen realisieren. Hierbei wird ausgenutzt, dass in Flussrichtung der Widerstand der Diode klein und in Sperrrichtung groß ist gegen einen festen Referenzwiderstand, mit dem die Diode einen Spannungsteiler bildet.

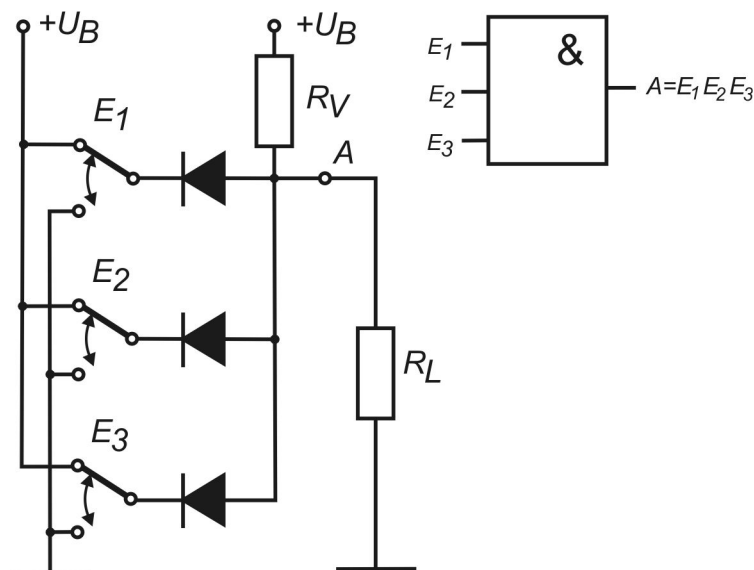


Abb. 6.14 Logische Schaltung mit Dioden  
Im nebenstehenden Beispiel ist eine logische UND-Verknüpfung der drei Eingänge  $E_1$ ,  $E_2$  und  $E_3$  realisiert. Durch wahlweises Umlegen der Schalter werden die Dioden entweder in Flussrichtung (Schalter auf Massepotential) oder Sperrrichtung (Schalter auf  $+U_B$ ) betrieben. Da der Gesamtwiderstand der parallel geschalteten Dioden klein gegen den Referenzwiderstand  $R_V$  ist, sobald nur eine der drei Dioden leitet, liegt der Ausgang  $A$  auf tiefem Potential, also  $\bar{E}_1 \cup \bar{E}_2 \cup \bar{E}_3 = \bar{A}$ . Analog gilt, dass bei einem gleichzeitigen Sperrbetrieb aller drei Dioden der Ausgang auf hohem Potential liegt  $E_1 \cap E_2 \cap E_3 = A$ .

### 6.2.8 Photodioden und Solarzellen

Die senkrecht einfallende Sonnenstrahlungsleistung pro Quadratmeter beträgt (außerhalb der Erdatmosphäre) rund 1,4 kW (Solarkonstante). Auf die Erde treffen somit rund 180 Millionen Gigawatt.

Im Vergleich dazu wird gegenwärtig weltweit nur eine etwa zehntausendfach geringere Leistung aus verschiedenen Energieträgern erzeugt und verbraucht. Wenn auch nur etwa die Hälfte der o.g. Strahlungsleistung der Sonne die Erdoberfläche erreicht und davon der überwiegende Teil wegen der Unzugänglichkeit der bestrahlten Flächen nicht nutzbar ist - der uns derzeit schon zugängliche Teil der Sonnenstrahlung ist eine riesige, regenerative und saubere Energiequelle.

Zur Nutzung dieser primären Sonnenenergie werden unter anderem Solarzellen eingesetzt. Sie wandeln die Sonnenenergie unmittelbar in die gut handhabbare Elektroenergie um. Nachteilig beim Einsatz von Solarzellen sind ihr geringer Wirkungsgrad und die noch relativ hohen Kosten ihrer Herstellung.

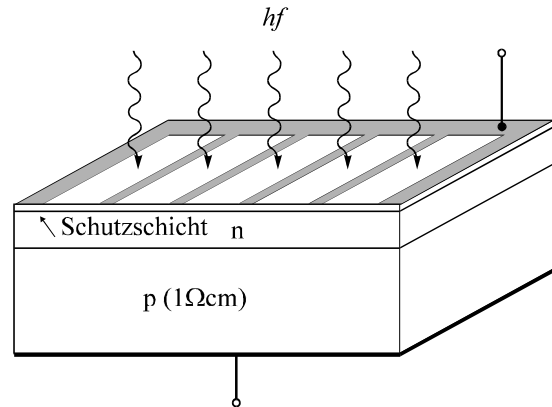


**Aufbau:** Solarzellen, Photoelemente und Photodioden unterscheiden sich nicht grundlegend im physikalischen Wirkprinzip. Ihre Parameter und ihre Betriebsbedingungen dagegen sind für das jeweilige Einsatzgebiet optimiert und daher unterschiedlich. Photodioden und Photoelemente dienen i. allg. der Strahlungsmessung, Solarzellen hingegen der quantitativen Energieumwandlung.

Der prinzipielle Aufbau entspricht dem einer Halbleiterdiode, in deren Sperrschicht jedoch Lichteinfall ermöglicht wird. Beispielsweise befindet sich auf einem *p*-dotierten Si-Träger eine dünne *n*-dotierte Si-Schicht.

Abb. 6.15 Schematischer Aufbau einer Solarzelle

Bei Solarzellen findet man im Gegensatz zu Photodioden großflächige Anordnungen, da die elektrische Leistung proportional mit der bestrahlten Fläche *A'* wächst. Auf der bestrahlten Seite sind kammartig metallische Kontaktbahnen aufgebracht, um Stromwege über das Halbleitermaterial zu verringern und eine effektive Ausleuchtung der Halbleiteroberfläche zu ermöglichen. Die *n*-dotierte Oberflächenschicht ist sehr dünn. Darüber ist eine reflexmindernde Schicht aufgebracht, die auch vor Witterungseinflüssen schützt.



**Sperrschicht bei Lichteinfall:** Bestrahlt man eine *pn*-Kombination mit Photonen geeigneter Wellenlänge (nahes IR und sichtbares Licht), so werden in der *p*-Schicht, in der Raumladungszone und auch noch in der *n*-Schicht durch den "inneren" Photoeffekt Elektron-Loch-Paare erzeugt, indem durch Aufnahme der Photonenenergie ein Elektron aus der Bindung zweier benachbarter Si-Atome herausgelöst wird. Die Erzeugungsrate der Ladungsträger nimmt infolge Absorption mit zunehmender Eindringtiefe ab. Ein Teil der *e - h* - Paare rekombiniert sofort wieder, wobei die Energie als Wärme abgegeben wird. Nichtrekombinierte *e - h* - Paare ermöglichen den Ladungstransport. Eine effektive Ladungstrennung erfolgt in der Diffusionszone, da die dort generierten Ladungsträger im Feld  $E_x$  der Raumladungen sofort auseinander driften. Die hierbei verrichtete Verschiebungsarbeit entspricht gerade der Diffusionsspannung  $W = eU_D$ . Die Trennung der photogenerierten Ladungsträger nennt man den "photovoltaischen" Effekt.

Außerhalb der Diffusionszone generierte Minoritätsträger (also Elektronen in der *p* - Schicht und Löcher in der *n* - Schicht) diffundieren - soweit sie nicht vorher rekombinieren - zur Sperrschicht, wo sich ihre Konzentrationen aufgrund der Ladungsträgerdrift verringert haben, s. Abb. 6. 16.

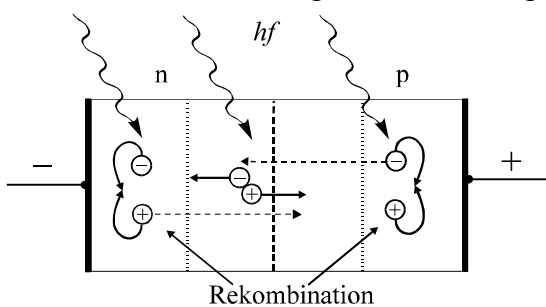


Abb. 6.16. Photogeneration und Rekombination von Elektron-Loch-Paaren

Photostrom  $I_K$  auf. Mit  $I_K = I_D$  folgt aus (5.40)

$$U_0 = \frac{kT}{ne} \ln \left( 1 + \frac{I_K}{I_S} \right). \quad (6.10)$$

Wegen der Proportionalität von  $I_K$  zur Bestrahlungsstärke  $E$  (in  $W/m^2$ ) liegt eine logarithmische Abhängigkeit der Leerlaufspannung  $U_0$  von  $E$  vor. Mit der Temperatur  $T$  nimmt  $U_0$  ab, weil  $I_S$  mit  $T$  zunimmt.

Wird die Solarzelle mit einem Lastwiderstand beschaltet, fließt über diesen ein Strom  $I_L$  von (+) nach (-). Das durch die oben diskutierten Diffusionsprozesse hervorgerufene innere Feld wirkt also

Drift- und Diffusionsströme überlagern sich zum Photostrom, der innerhalb der Solarzelle von *n* nach *p* gerichtet ist.

Schließt man die Kontakte kurz, so fließt der Photostrom als Kurzschlußstrom  $I_K$  der Solarzelle von ihrem Pluspol (+) zu ihrem Minuspol (-). Er ist der Oberfläche der Solarzelle und deren Bestrahlungsstärke  $E$  proportional und nimmt mit der Temperatur geringfügig zu.

Lässt man die Kontakte offen, liegt die Leerlaufspannung  $U_0$  der Solarzelle in Durchlassrichtung an ihrer "inneren Diode". Der Durchlaßstrom  $I_D$  hebt dabei den

wie eine elektromotorische Kraft (EMK) einer Spannungsquelle und als eine solche ist die Solarzelle (bzw. Photoelement) zu betrachten. Wird eine äußere Spannung in Sperrrichtung angelegt (Pluspol an n - dotierten Bereich, Minuspol an p - dotierten), fließt zusätzlich zum sehr geringen Sperrstrom ein zur Bestrahlungsstärke proportionaler Photostrom. Dies ist die Betriebsart der Photodiode.

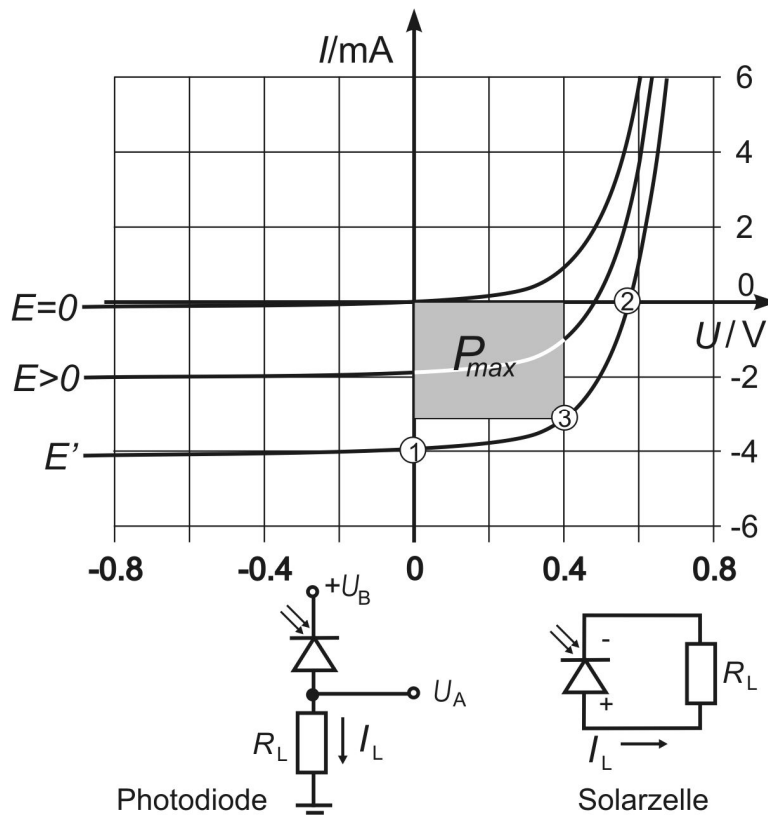


Abb. 6.17 Kennlinien und Grundschaltungen von Photodiode und Solarzelle

Stromstärken positiv angegeben und die Kennlinien erscheinen an der  $U$ -Achse gespiegelt).

Der Arbeitspunkt wird durch den Lastwiderstand  $R_L$  i. allg. in das Leistungsmaximum ③ gelegt.

Die Kurve ( $E = 0$ ) in Abb. 6.17 ist die (Dioden)-Kennlinie der unbestrahlten Solarzelle. Bei Bestrahlung wird dieser Kennlinie der Photostrom überlagert. Aufgrund seiner Richtung verringert er den Durchlassstrom und vergrößert den Sperrstrom.

Der 3. Quadrant zeigt die Betriebsbedingungen der Photodiode; im Sperrbetrieb sind die Ströme zur Bestrahlungsstärke  $E$  proportional.

Im 4. Quadranten sind die Betriebsbedingungen der Solarzelle (bzw. des Photoelementes) an der Kennlinie mit  $E = E'$  dargestellt.

Am vom Strom  $I_L$  durchflossenen Lastwiderstand  $R_L$  fällt die Spannung  $U_L$  ab; in ihm wird die Leistung  $P_L = U_L \cdot I_L$  entwickelt (entspricht der getönten Fläche). Der Strom  $I_L$  ist um den der Spannung  $U_L$  zugeordneten Durchlassstrom  $I_D(U_L)$  (betragsmäßig) kleiner als  $I_K$ . Die Verhältnisse für Kurzschluss ① ( $U = 0$ ) und Leerlauf ② ( $I = 0$ ) sind auf der  $U$ - bzw.  $I$ -Achse ersichtlich (in Diagrammen für die Solarzelle allein sind oft die

### 6.2.9 Lichtemitterdiode (LED)

Lichtemitterdioden sind  $pn$ -Dioden, zu deren Funktion die spontane Rekombinationsstrahlung in *direkten Halbleitern* ausgenutzt wird. Zur Lichterzeugung ist es lediglich notwendig, in der Sperrschicht eine Überschussrate an Minoritätsladungsträgern zu generieren. Hierzu wird die Diode in Flussrichtung mit einem ausreichend hohen Strom betrieben. Betriebsstrom und Helligkeit der Rekombinationsstrahlung sind zueinander weitgehend proportional. Im sichtbaren Bereich emittierende LED's werden vorzugsweise für Anzeigezwecke verwendet. In den letzten Jahren konnte die Leuchtdichte jedoch derartig gesteigert werden, dass LED's auch für Beleuchtung eingesetzt werden können (Rücklicht für KFZ, Taschenlampen und Fahrradscheinwerfer). Der Vorteil liegt in geringeren Betriebsspannungen, höherem Wirkungsgrad und höherer Lebensdauer als Glühfadenlampen. Im Infrarotbereich arbeitende LED's werden für Signalzwecke (Lichtschranken, Bewegungsmelder) sowie die optische Nachrichtenübertragung über Lichtleiter eingesetzt. Glas hat im Infrarotbereich Wellenlängen"fenster", bei denen praktisch keine Absorption stattfindet, also lange Übertragungsstrecken ermöglicht werden.

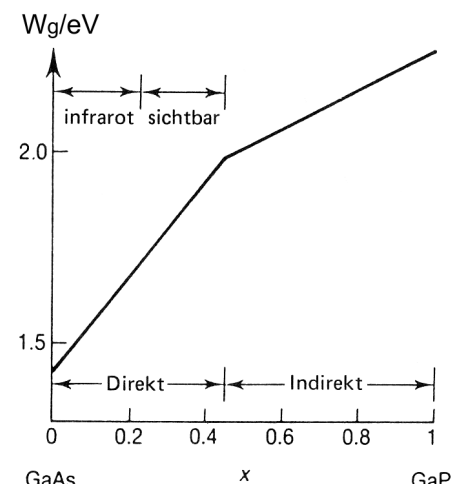


Abb. 6.18 Bandlückenenergie von  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$

Da die Wellenlänge der emittierten Strahlung vom Bandabstand abhängt, werden vorzugsweise Mischkristalle aus Ga, As, P verwendet. Arsen und Phosphor besitzen jeweils fünf Valenzelektronen und können mit dreiwertigem Gallium einen stabilen Verbundhalbleiter ergeben. Dies bedeutet, dass ein ganzer Bereich von Halbleitern mit einer Zusammensetzung  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  mit  $x < 1$  hergestellt werden kann mit Bandlücken von 1,43eV (GaAs) bis 2,26eV (GaP).

Für  $x > 0,45$ , das betrifft gerade die interessanten größeren Bandlücken, wird  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  allerdings zu einem indirekten Halbleiter, s. Abb.6.18. Knapp unterhalb dieser Schwelle lassen sich rote LED's herstellen. Für  $x > 0,45$  kann man jedoch durch Dotierung mit N Zwischenniveaus in der Bandstruktur erzeugen, die wie eine Falle zunächst Elektronen aus dem Leitungsband einfangen und danach eine strahlende Rekombination mit Löchern aus dem Valenzband ermöglichen. Die Photonenenergie entspricht der Energiedifferenz zwischen Falle und Valenzbandoberkante und ist von der Zusammensetzung der Halbleiterlegierung abhängig. Damit sind Emissionen im gelben und grünen Bereich des sichtbaren Lichts möglich. Blaue LED's konnten erst vor wenigen Jahren realisiert werden. Hierbei werden Zinksulfid (ZnS) und Siliziumkarbid (SiC) als Halbleiterwerkstoff verwendet.

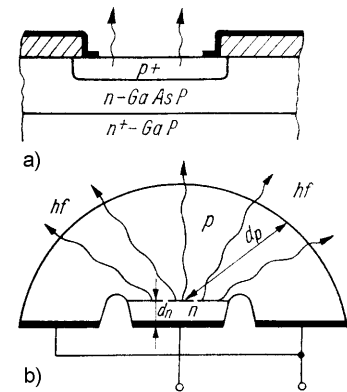


Abb. 6.19 Bauformen von LED

### 6.2.10 Halbleiterinjektionslaser

Das Wort **Laser** ist ein Acronym aus dem Begriff *light amplification by stimulated emission of radiation*. ALBERT EINSTEIN hatte bereits im Jahr 1916 das Phänomen vorhergesagt, das dem Laser zu Grunde liegt: die stimulierte Emission. Vorher glaubte man, es gebe nur zwei Arten, wie ein Atom mit einem Photon umgehen kann: Entweder es schluckt das Photon und wird dabei auf ein höheres Energieniveau gehoben (angeregt), oder es sendet ein Photon aus und fällt dabei auf ein niedrigeres Energieniveau. EINSTEIN erkannte, dass es noch eine dritte Art der Wechselwirkung gibt: Ein Photon mit passender Energie kann ein angeregtes Atom dazu bringen, dass es auf ein niedrigeres Niveau fällt und dabei ein Photon mit der gleichen Energie wie das einfallende aussendet. In der normalen Welt passiert dies relativ selten, denn da sind wesentlich mehr Atome in niedrigen als in angeregten Energiezuständen. Im Laser versetzt man eine Vielzahl von Atomen künstlich in einen angeregten Zustand, um sie anschließend durch stimulierte Emission gezielt zur Abgabe ihrer Photonen zu zwingen. So erhält man Licht in einer sehr schmalen spektralen Verteilung, also ziemlich genau einer festgelegten Wellenlänge, das man beispielsweise mit Hilfe eines Spiegelsystems zu einem eng gebündelten Strahl formt. Wie sehr EINSTEIN auch hier seiner Zeit voraus war erwies sich daran dass die ersten Laser erst 1960 von Theodore MAIMAN<sup>66</sup> und Nikolai BASSOV<sup>67</sup> gebaut wurden. Die Funktionsweise eines Lasers ist in Abb. 6.20a skizziert. Durch geeignete Manipulation regt man Zustände aus dem Grundniveau in ein angeregtes Niveau. Dies kann z.B. durch Einstrahlung von Licht der passenden Wellenlänge erfolgen. Nach ganz kurzer Zeit würden die angeregten Zustände wieder in den Grundzustand übergehen und dabei Lumineszenzlicht aussenden, gäbe es nicht einen attraktiven kurzen Weg zu einem Zwischenniveau. Wichtig ist, dass es keinen effektiven Mechanismus geben darf, der aus diesem sogenannten *metastabilen* Niveau in den Grundzustand führt. Folglich steigt die Besetzung der Zustände auf diesem Niveau stark an, letztlich sind hier sogar mehr Zustände als im Grundzustand besetzt. Das Erreichen einer solchen *Besetzungsinversion* ist Voraussetzung für den folgenden Mechanismus: Wenn doch ein Zustand *spontan* in den Grundzustand übergeht und dabei einen Lichtquant aussendet, *stimuliert* dies auch die anderen Zustände. Lawinenartig wächst die Zahl der in den Grundzustand übergehenden Teilchen an, wodurch ein intensiver Lichtblitz ausgesendet wird. Damit die spontane Emission wirksam stimulieren kann, ist ein *optischer Resonator* notwendig. Dieser besteht aus zwei planparallelen Spiegeln, zwischen denen sich eine stehende Welle aufbaut, sofern der doppelte Spiegelabstand einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge entspricht.

<sup>66</sup> Theodore MAIMAN (1927-2007) US-am. Physiker; Rubinlaser, nichtlineare Optik

<sup>67</sup> Nikolai G. BASSOV (1922-2001) russ. Physiker; LASER, MASER (64 NP mit PROCHOROV und TOWNES), thermonukleare Fusion

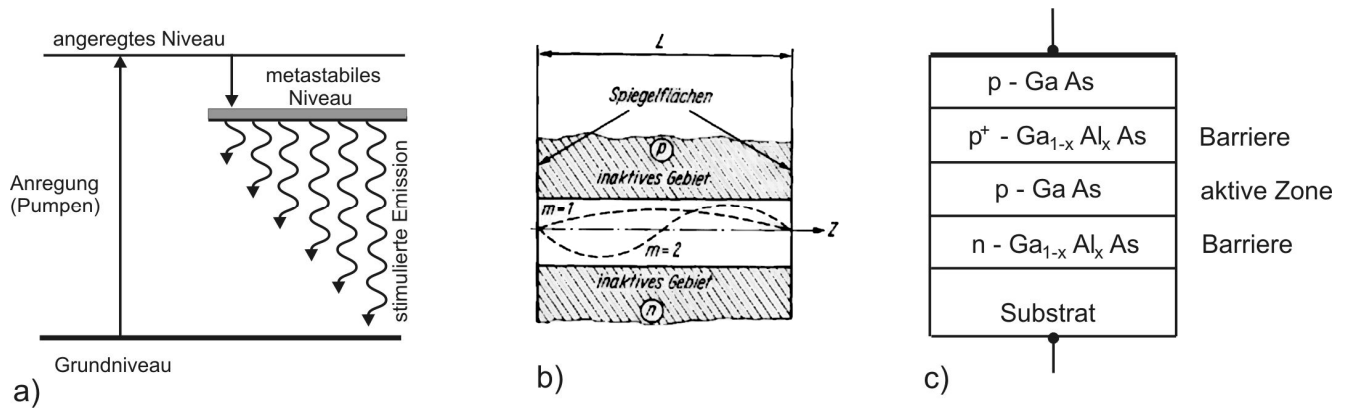


Abb. 6.20 Laserprinzip a) 3-Niveau-Schema; b) Prinzip des Halbleiterlasers; c) Doppelheterolaser

Auf Abb. 6.20b sind die beiden langwelligsten *Moden* zwischen beiden Spiegeln eingezeichnet. Wegen der kurzen Wellenlänge von Licht im Vergleich mit den Abmessungen optischer Resonatoren sind die praktisch relevanten Moden von sehr hoher Ordnung. Die Besetzungsinversion bei HL-Lasern erreicht man durch einen sehr hoch dotierten (sog. *entarteten*) *pn*-Übergang, der stark in Flussrichtung betrieben wird. Hierdurch werden in sehr hohem Maße Minoritätsladungsträger erzeugt. Der optische Resonator wird dadurch realisiert, dass zwei gegenüberliegende Flächen des *pn*-Übergangs planparallel geschliffen werden. An diesen Spiegelflächen wird ein Teil der in *z*-Richtung laufenden Wellen reflektiert, der dann zum „Aufschaukeln“ der passenden Schwingungsmode führt. Ein anderer Teil geht durch die Spiegelflächen hindurch und verlässt als kohärente Lichtstrahlung das Bauelement. Bei der technischen Realisierung haben sich besonders gestufte Heteroübergänge bewährt. Dabei ändert sich die Kristallstruktur benachbarter Schichten geringfügig, verbunden mit einer Änderung des Brechungsindex. Durch diese Abstufung der Brechungsindizes sowie der Absorptionskoeffizienten (Bandlücken) kann die stimulierte Emission auf eine eng begrenzte aktive Schicht konzentriert werden, was den Wirkungsgrad erhöht.

Der besondere Vorteil von Laserdioden beruht darauf, dass der Laserstrahl eine geringe Divergenz aufweist und nur eine geringe spektrale Breite hat. Beide Eigenschaften ermöglichen eine sehr gute Fokussierbarkeit des Lichtstrahls. Dies ist Voraussetzung für die hohe Informationsdichte der optischen Datenträger wie CD und DVD. Da die Laserdioden sehr klein sind und nur geringen Energiebedarf haben, lassen sich damit ausgerüstete Laptops auch nicht so schwer tragen.

### 6.2.11 Optokoppler

Eine LED und ein darauf abgestimmter Fotodetektor (Fotodiode, Fototransistor, Fotothyristor) können zusammen in ein Gehäuse eingebaut werden und bilden einen *Optokoppler*. Es gibt keine elektrische Verbindung zwischen Ein- und Ausgang eines solchen Vierpols, auch keine Masseverbindung. Optokoppler sind eine ideale galvanische Trennung und können zur Übertragung von Signalen zwischen Schaltungen auf sehr hohem Potential (einige kV) und solchen auf niedrigem Potential verwendet werden. Sie werden auch zur Kopplung von Logikfamilien mit unterschiedlichen Betriebsspannungen eingesetzt. Schnelle Optokoppler haben Schaltzeiten von wenigen ns und können damit zur Hochgeschwindigkeits-Datenübertragung eingesetzt werden.

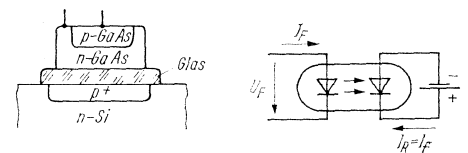


Abb. 6.21 Aufbau und Wirkungsweise eines Optokopplers

**Übungen**

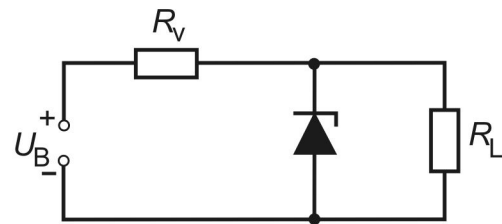
**6.1.** Erklären Sie in Stichpunkten die Entstehung der Sperrschicht eines pn-Überganges (Querschnittsskizze, Ladungsträgerarten, Ladungsträgerdichten, inneres Feld, Diffusionsspannung).

**6.2.\*** Eine Einweggleichrichterschaltung wird mit einer Si - Diode und einem Glättungskondensator realisiert. Es liegt eine Wechselspannung (50 Hz) von 4V am Eingang an. Der Lastwiderstand beträgt 20Ω.

- a) Geben Sie eine Schaltung für die beschriebene Einweggleichrichtung an.
- b) Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf von Eingangsspannung und Spannung am Lastwiderstand.
- c) Wie groß muss die Kapazität des Kondensators mindestens sein, damit die Welligkeit der Spannung (Brummspannungsamplitude) am Lastwiderstand 5% des Effektivwertes der Ausgangsspannung nicht überschreitet?
- d) Wie groß ist die am Lastwiderstand umgesetzte elektrische Leistung?

**6.3.\*** Ein Verbraucher mit einem Widerstand von  $R_L = 30 \Omega$  soll mit einer möglichst konstanten Gleichspannung von 6,8 V betrieben werden. Zur Verfügung steht ein Netzteil mit einer Ausgangsspannung von  $U_B = 12 V$ . Zur Spannungstabilisierung soll eine Leistungszenerdiode SZ 600/6,8 eingesetzt werden, die an ihrem Arbeitspunkt bei  $I_Z = 100 mA$  und  $U_Z = 6,8 V$  einen differentiellen Widerstand von  $R_{diff} = 2 \Omega$  aufweist. Berechnen Sie den zur Arbeitspunkteinstellung notwendigen Widerstand  $R_V$  und die an diesem Widerstand anfallende Leistung! Wie groß ist die Spannungsschwankung am Lastwiderstand, wenn sich die Eingangsspannung um 0,1 V ändert?

*Hinweis:*  $R_Z$  sowie  $R_L$  liegen parallel am Ausgang und bilden mit  $R_Z$  einen (unbelasteten) Spannungsteiler. Bezüglich der Spannungsschwankungen am Eingang ist nur der *differentielle* Widerstand der Z-Diode wirksam, der wegen seiner Kleinheit diesen Wechselspannungsanteil praktisch kurzschließt. Bilden Sie  $\frac{U_Z}{U_E}$  und daraus die



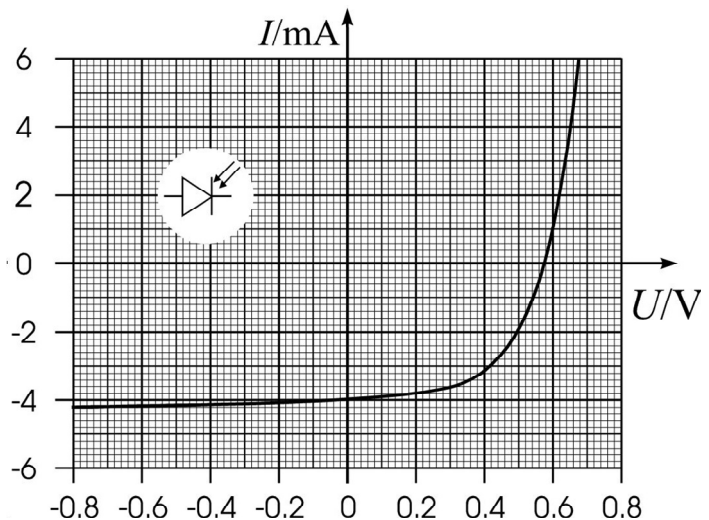
Ableitung  $\frac{dU_Z}{dU_E}$ .

**6.4.** Skizzieren Sie den Aufbau einer Solarzelle (Angabe des Grundmaterials, von Dotierungen, Leiterbahnen, Richtung des Lichteinfalls), beschalten Sie die Solarzelle so (Leiterzüge, Messgeräte, ggf. Widerstände,...), dass deren abgegebene Leistung messbar ist und geben Sie die Richtung von Strömen und Spannungen an, die bei Lichteinfall gemessen werden!

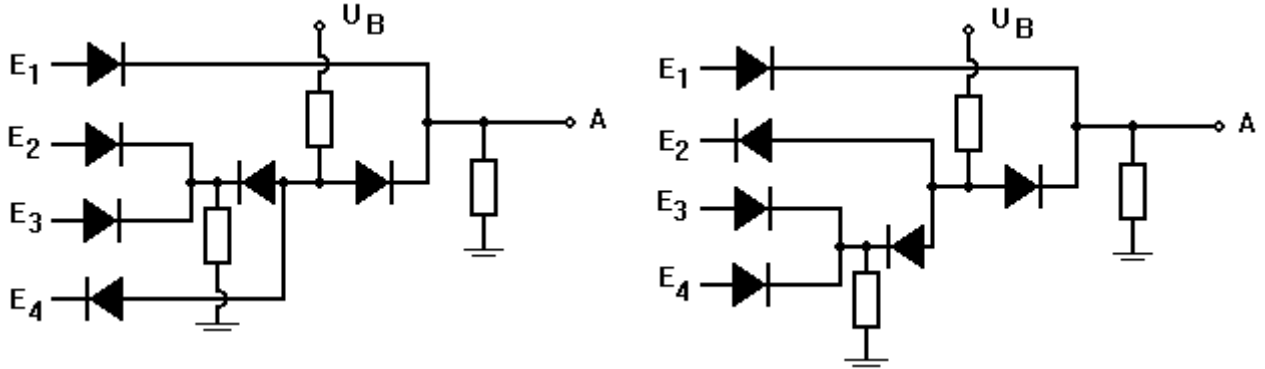
Skizzieren Sie die Kennlinie der beleuchteten Solarzelle und geben Sie die Lage des Arbeitspunktes an, bei dem etwa die maximale Leistung auftritt!

**6.5.** Auf nebenstehendem Diagramm ist die Strom-Spannungs-Charakteristik einer beleuchteten Photodiode dargestellt.

- a) In welchen Bereichen befindet sich der Arbeitspunkt bei Betrieb als Photodiode sowie als Solarzelle?
- b) Wie groß sind Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung der Solarzelle?
- c) Bestimmen Sie einen annähernden Wert für die Maximalleistung als Solarzelle!
- d) Ein Lichtimpuls soll unter Verwendung einer Photodiode in einen Spannungsimpuls umgewandelt werden. Geben Sie hierzu eine Schaltung an (es stehen neben der Photodiode eine Spannungsquelle, Widerstände und ein Voltmeter sowie Kupferdraht zur Verfügung).



6.6. Geben Sie die logischen Funktionen (oder Schalttabellen) für die folgenden logischen Schaltungen an!



6.7.\* Nachfolgend sind die mit dem Oszilloskop aufgezeichneten Zeitabhängigkeiten von Generatorspannung  $U_G(t)$  und der Spannungsabfall  $U_R(t)$  über einem mit der Diode in Reihe geschalteten Widerstand von  $1\text{k}\Omega$  dargestellt. Der Zeitmaßstab beträgt  $10\mu\text{s}$  je Teilstrich (Abstand zweier durchgezogener Linien), die Potentialdifferenz analog  $1,5\text{V}$  je Teilstrich.

a) Bestimmen Sie näherungsweise Werte für Speicherzeit  $t_s$  und Abfallzeit  $t_f$  aus der Grafik (zur besseren Ablesbarkeit ist der hierfür interessante Teil der Grafik zusätzlich vergrößert als Ausschnitt dargestellt).

b) Wie groß ist (unter Vernachlässigung des vergleichsweise kleinen Bahnwiderstands  $R_B$  der Diode) die mittlere Sperrschichtkapazität  $\bar{C}_S$  der Diode?

