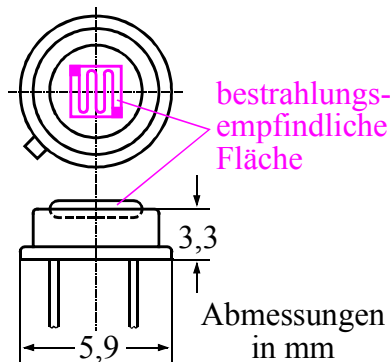


9. Bauelemente der Optoelektronik

Reine Halbleiterwerkstoffe (nicht dotiert) haben eine gewisse Eigenleitfähigkeit. Durch Energiezufuhr (Erwärmung) wird die Leitfähigkeit vergrößert.

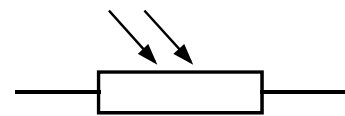
Erhält ein Halbleiterwerkstoff eine Energiezufuhr durch Lichteinstrahlung, so werden ebenfalls Elektronen aus ihren Bindungen befreit. Die Eigenleitfähigkeit von Halbleiterwerkstoffen wird bei Lichteinstrahlung vergrößert. Die Änderung der Eigenleitfähigkeit bei einkristallinen und bei polykristallinen Halbleiterwerkstoffen wird innerer fotoelektrischer Effekt genannt.

9.1 Fotowiderstände



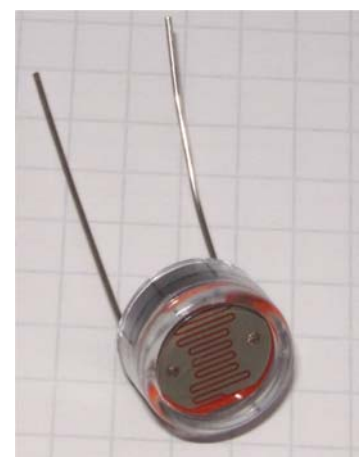
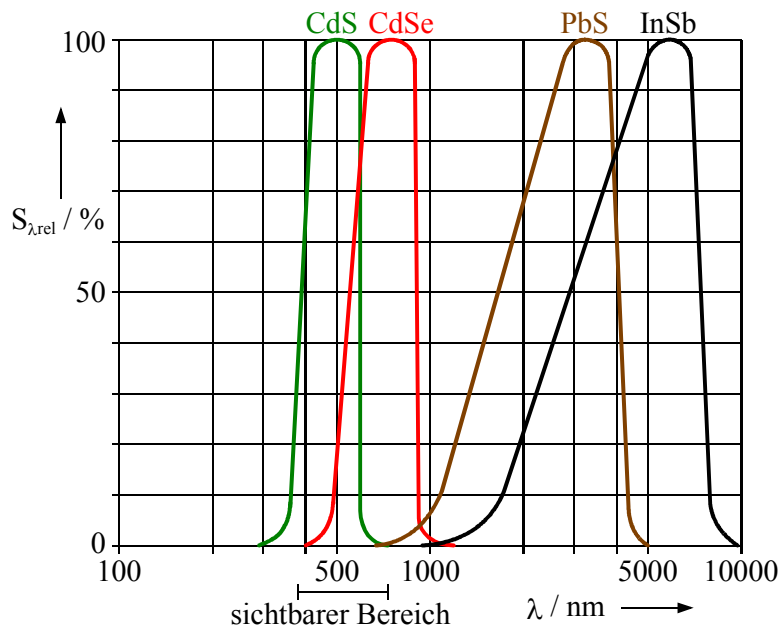
Fotowiderstände sind Halbleiterbauelemente ohne Sperrschicht; ihre aktiven Schichten bestehen aus Halbleiter-Mischkristallen. Durch den inneren Fotoeffekt ändert sich die Leitfähigkeit der Halbleiterschicht abhängig von der Beleuchtungsstärke E_v .

Aufbau, Gehäuseabmessungen und Schaltzeichen eines Fotowiderstandes



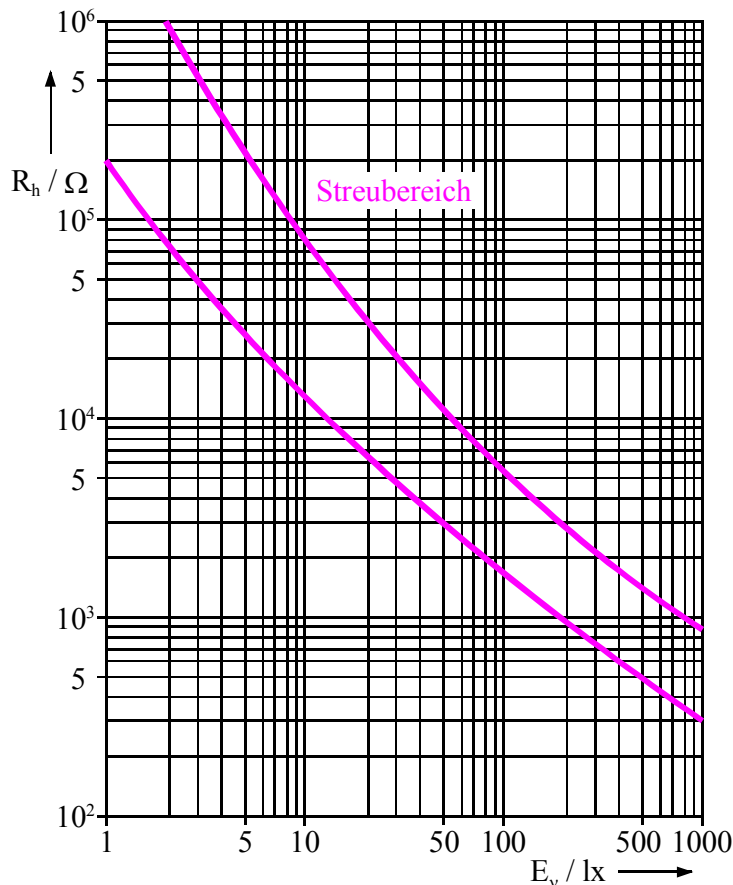
Die spektrale Empfindlichkeit richtet sich nach der Zusammensetzung der Halbleiterverbindung. Cadmiumsulfid-Widerstände (CdS) erfassen den sichtbaren Bereich der optischen Strahlung, Cadmiumselenid-Widerstände (CdSe) den sichtbaren Bereich und den Infrarot-Bereich A, Bleisulfid-Widerstände (PbS) die Infrarot-Bereiche A und B und Indiumantimonid-Widerstände (InSb) die Infrarot-Bereiche B und C.

Man kann Fotowiderstände bauen, die besonders empfindlich sind für grünes, blaues oder oranges Licht.



Cadmiumsulfid-Fotowiderstand NORSP-12

Relative spektrale Empfindlichkeit $S_{(\lambda),rel}$ von Fotowiderständen aus verschiedenen Halbleiterwerkstoffen ($S_{(\lambda),rel} = f\{\lambda\}$)



Wird die Beleuchtung eines Fotowiderstandes geändert, so ändert sich der Widerstandswert mit einer zeitlichen Verzögerung von einigen Millisekunden.

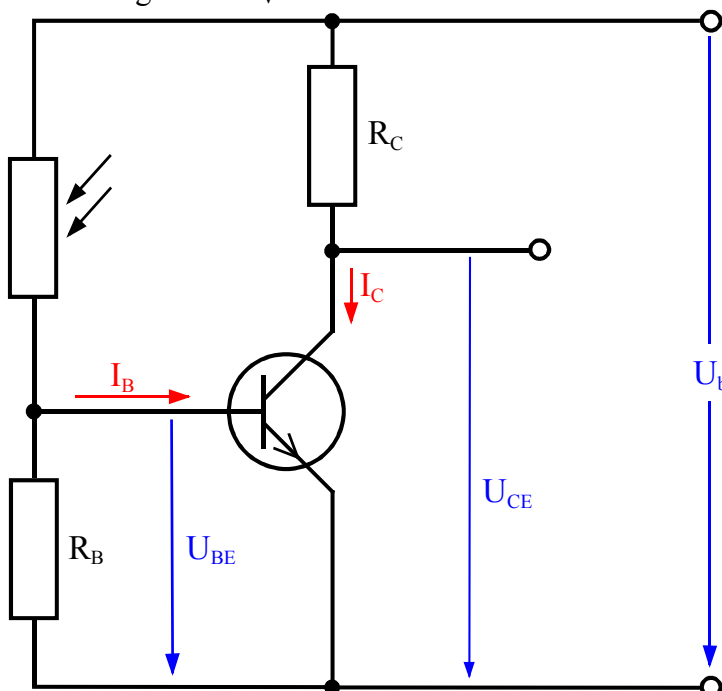
Fotowiderstände haben eine gewisse Temperaturabhängigkeit, die mit wachsender Beleuchtungsstärke abnimmt.

Widerstandsverlauf eines Fotowiderstandes ($R_h = f\{E_v\}$)

Kennwerte und Grenzwerte

Wichtige Kennwerte sind der Dunkelwiderstand R_0 , der Hellwiderstand R_{1000} bei einer Beleuchtungsstärke von 1000 Lux, die Wellenlänge der maximalen Fotoempfindlichkeit λ_{ES} und die Ansprechzeit t_r .

Die Ansprechzeit t_r ist die Anstiegszeit des Fotostromes I_0 auf 65 % des Endwertes bei der Beleuchtungsstärke $E_v = 1000 \text{ lx}$.



Übliche Kennwerte:

- Dunkelwiderstand
 $R_0 \approx 1 \text{ M}\Omega \dots 100 \text{ M}\Omega$
- Hellwiderstand
 $R_{1000} \approx 100 \Omega \dots 2 \text{ k}\Omega$
- Ansprechzeit
 $t_r \approx 1 \text{ ms} \dots 3 \text{ ms}$

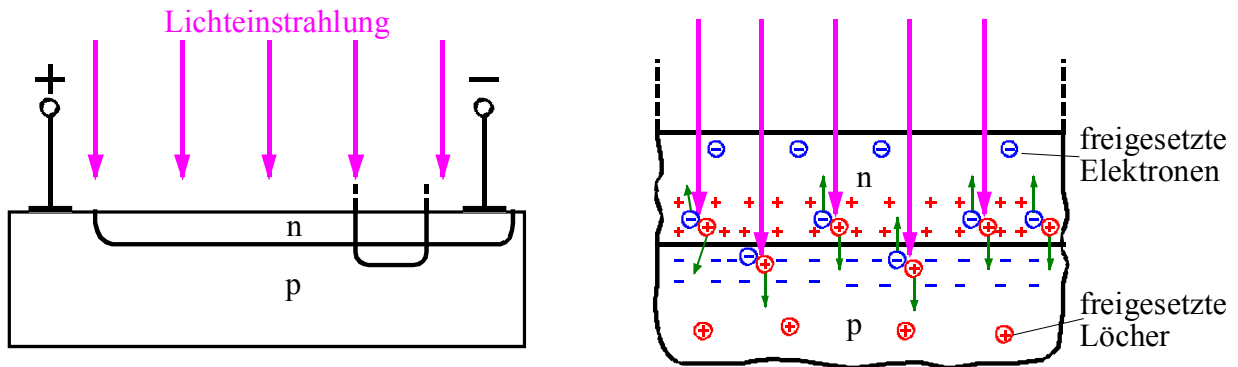
Grenzwerte sind die Verlustleistung P_{tot} (bis 2 W), die sich daraus ergebende höchste zulässige Arbeitsspannung U_a (bis 250 V) und die höchstzulässige Umgebungstemperatur ϑ_{amax} bzw. T_{max} (bis 75°C).

Fotowiderstand und Transistor als Fotoverstärker

9.2 Fotoelemente und Solarzellen

Fotoelemente und Solarzellen wandeln Lichtenergie in elektrische Energie um. Man unterscheidet Selen-Fotoelemente und Silizium-Fotoelemente. Solarzellen sind im Prinzip Silizium-Fotoelemente.

Ein Silizium-Fotoelement besteht aus einem p-leitenden Si-Einkristall, in das eine dünne n-leitende Zone (1 µm bis 2 µm) eindotiert wurde.

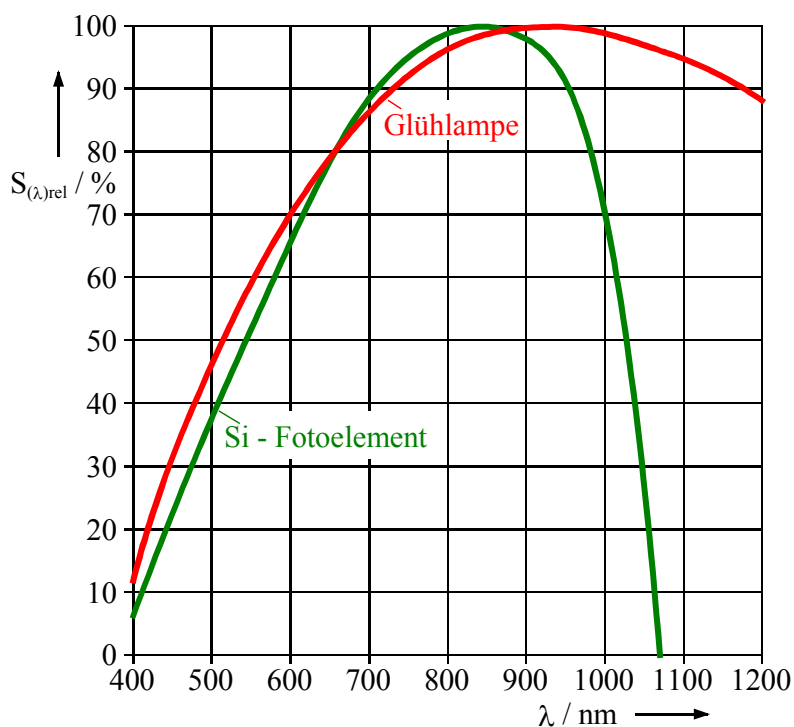


Grundaufbau eines Silizium-Fotoelementes **Kristallausschnitt, Freisetzen von Elektronen und Löchern**

Zwischen P-Zone und N-Zone bildet sich durch Ladungsträgerdiffusion eine Raumladungszone, in der ein elektrisches Feld herrscht.

Da die N-Zone sehr dünn ist, wird sie fast ganz von der Raumladungszone durchsetzt. Die N-Zone ist mit einer dünnen lichtdurchlässigen Schutzschicht abgedeckt. Das Licht fällt auf die N-Zone und setzt in ihr Elektronen frei. Die aus ihren Bindungen befreiten Elektronen werden vom elektrischen Feld beschleunigt und wandern in den sperrschichtfreien Bereich der N-Zone. Dort herrscht Elektronenüberschuss.

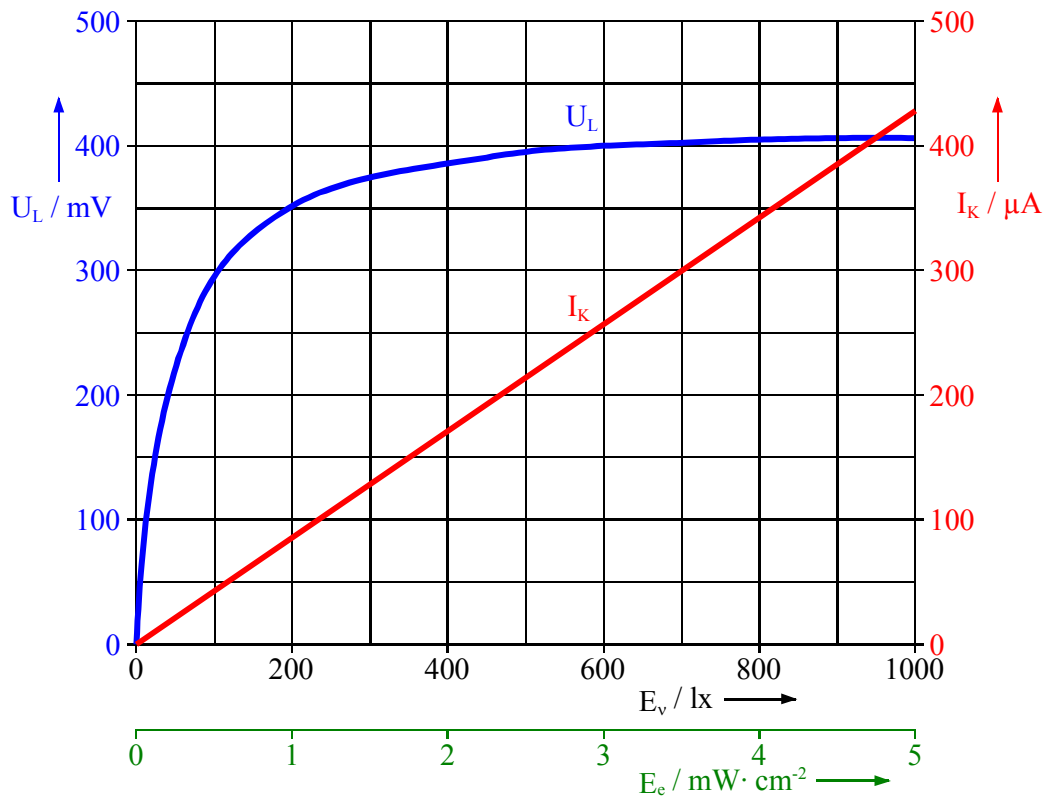
Der sperrschichtfreie Bereich der N-Zone ist der negative Pol des Fotoelementes.



Die bei der Freisetzung von Elektronen entstandenen Löcher wandern in Feldrichtung in den sperrschichtfreien Bereich der P-Zone. Dort herrscht Elektronenmangel. Der sperrschichtfreie Bereich der P-Zone ist der positive Pol des Fotoelementes.

Relative spektrale Empfindlichkeit $S_{(\lambda)rel}$ von Silizium-Fotoelementen und Glühlampen in Abhängigkeit der Wellenlänge ($S_{(\lambda)rel} = f\{\lambda\}$)

Ein Fotoelement hat eine lichtempfindliche Fläche A_L bestimmter Größe. Es ist gekennzeichnet durch eine maximale Leerlaufspannung U_{Lmax} und durch den maximalen Kurzschlussstrom I_{Kmax} . Die höchstmögliche Leistung wird bei Leistungsanpassung abhängig von der Beleuchtungsstärke E_v erzielt.



Abhängigkeit der Leerlaufspannung U_L und des Kurzschlussstromes I_K von der Beleuchtungsstärke E_v bezogen auf Normlicht A und von der Bestrahlungsstärke E_e beim Fotoelement BPY 48 ($A_L = 12,6 \text{ mm} \cdot 6 \text{ mm}$)

Kennwerte und Grenzwerte

Neben der maximalen Leerlaufspannung U_{Lmax} und dem maximalen Kurzschlussstrom I_{Kmax} sind die maximale Leistung P_{max} bei Leistungsanpassung und einer Beleuchtungsstärke $E = 100 \text{ klx}$, die Fotoempfindlichkeit S und die Wellenlänge der maximalen Fotoempfindlichkeit λ_{ES} wichtige Kennwerte von Fotoelementen.

Die Fotoempfindlichkeit ist definiert:

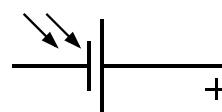
$$S = \frac{I_K}{E_v} \quad (9.1)$$

Als Richtwert für die höchste Leistung gilt:

$$P_{max} \approx 0,7 \cdot U_L \cdot I_K \quad (9.2)$$

Kennwerte eines Silizium-Fotoelementes (Solarzelle):

- $U_{Lmax} \approx 0,58 \text{ V}$
- $I_{Kmax} \approx 130 \text{ mA}$
- $A_L \approx 3,72 \text{ cm}^2$
- $P_{max} \approx 60 \text{ mW}$
- $S \approx 1,3 \mu A/lx$
- $\lambda_{ES} \approx 0,7 \mu m$



Schaltzeichen des Fotoelementes

Der wichtigste Grenzwert ist der Umgebungstemperaturbereich ($-40^\circ\text{C} \dots +125^\circ\text{C}$, selten bis $+200^\circ\text{C}$).

Anwendungen

Fotoelemente werden als Solarzellen für Energieversorgungsanlagen eingesetzt.

Fotoelemente werden in der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik verwendet.

9.3 Fotodioden

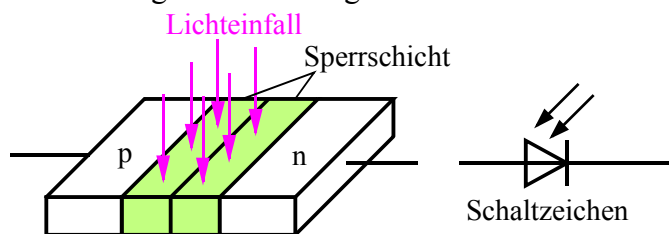
Eine Fotodiode ist eine Halbleiterdiode (Si, Ge), deren PN-Übergang dem Licht gut zugänglich ist. Fotodioden und Fotoelemente haben das gleiche Wirkprinzip.

Fotodioden werden in Sperrrichtung betrieben. Es entsteht eine verhältnismäßig breite Raumladungszone.

Fällt kein Licht auf die Raumladungszone, so kann nur ein sehr kleiner Sperrstrom fließen, der - wie bei allen Dioden - von der Temperatur abhängig ist.

Bei Lichteinfall werden Elektronen aus ihren Bindungen gelöst; es werden in der Sperrschicht freie Ladungsträger erzeugt. Der Sperrstrom steigt um einige Zehnerpotenzen an.

Zwischen Sperrstrom und Lichteinfall besteht ein gut linearer Zusammenhang. Fotodioden eignen sich deshalb besonders gut zur Lichtmessung. Der Sperrstrom ändert sich bei Änderung der Beleuchtungsstärke fast trägheitslos.

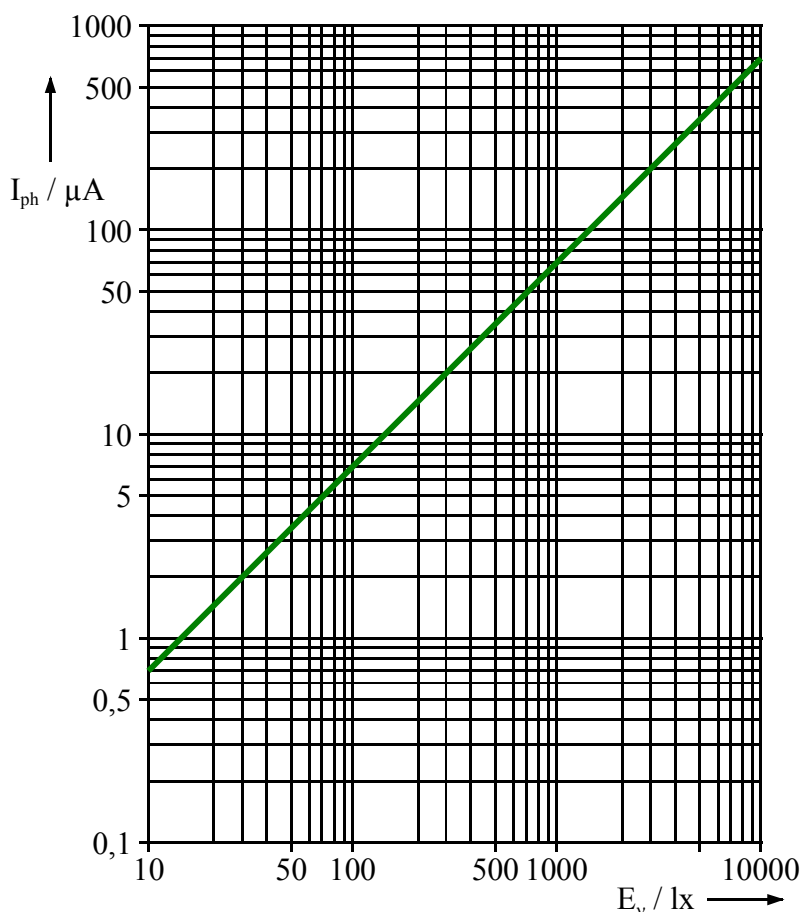


**Fotodiode
CQY 18 IV**



Prinzipieller Aufbau und Schaltzeichen einer Fotodiode

Die spektrale Empfindlichkeit der Fotodiode entspricht der Empfindlichkeit des Fotoelementes.



Der Fotostrom ist nahezu unabhängig von der Arbeitsspannung. Er ist nur abhängig von der Beleuchtungsstärke. Die Fotodiode ist somit eine Stromquelle, die mit der Beleuchtungsstärke gesteuert wird.

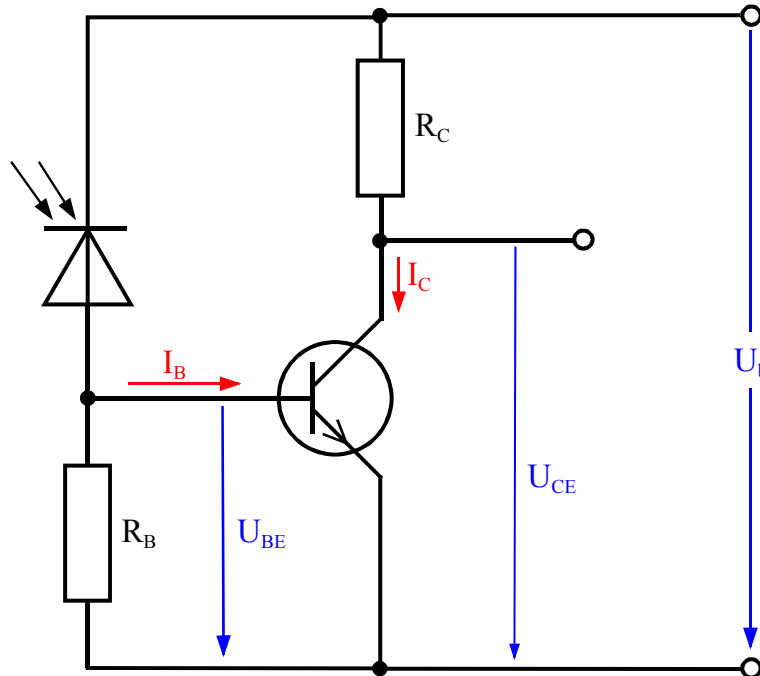
Eine Bestrahlungsstärke von $E_e = 5 \text{ mW/cm}^2$ entspricht bei Normlicht A einer Beleuchtungsstärke $E_v = 1000 \text{ lx}$.

**Abhängigkeit des
Fotostromes I_{ph} von der
Beleuchtungsstärke E_v
bezogen auf Normlicht A bei
der Fotodiode BPW 34
($I_{ph} = f\{E_v\}$)**

Kennwerte und Grenzwerte

Die Hauptkennwerte der Fotodiode sind die Fotoempfindlichkeit S (Gl. 9.1) und die Wellenlänge der maximalen Fotoempfindlichkeit λ_{ES} .

Grenzfrequenz f_g und Sperrschichtkapazität C_s sind weitere Kennwerte. Von besonderem Interesse ist der Dunkelstrom I_d , der für eine bestimmte Sperrspannung angegeben wird.



Übliche Kennwerte:

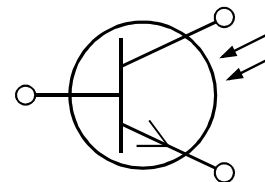
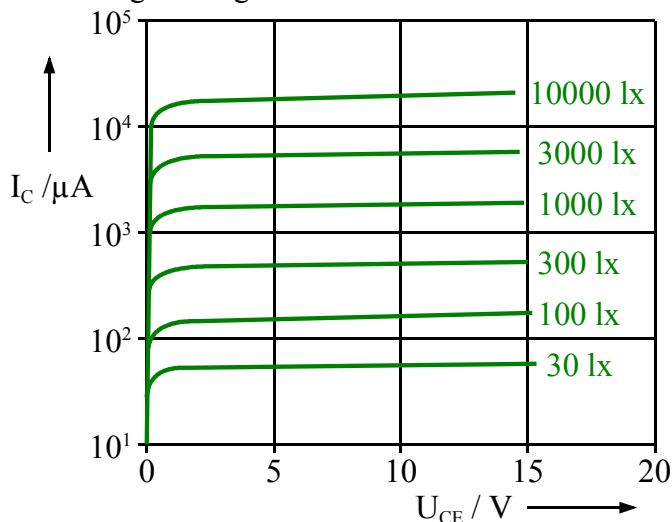
- $S \approx 120 \text{ nA/lx}$
- $\lambda_{ES} \approx 0,85 \mu\text{m}$
- $f_g \approx 1 \text{ MHz}$
- $C_s \approx 150 \text{ pF}$ bei $U_R = 0 \text{ V}$;
 20 pF bei $U_R = 20 \text{ V}$
- $I_d \approx 500 \text{ nA}$

Grenzwerte sind die höchstzulässige Sperrspannung (bis 30 V) und der Umgebungstemperaturbereich (-50°C bis $+100^\circ\text{C}$).

Fotoverstärkerschaltung mit NPN-Transistor

9.4 Fototransistoren

Fototransistoren sind spezielle Si-Transistoren, bei denen Licht auf die Basis-Kollektor-Sperrschicht fallen kann. Der Basisanschluss ist bei einigen Fototransistortypen zur Arbeitseinstellung herausgeführt.



Schaltzeichen des Fototransistors

Die Lichtempfindlichkeit eines Fototransistors ist wesentlich höher als die eines Fotoelementes mit gleicher lichtempfindlicher Fläche, da der Photoeffekt verstärkt wird. Die Empfindlichkeitsverstärkung entspricht dem Gleichstromverstärkungsfaktor B des Fototransistors.

Abhängigkeit des Kollektorstromes I_C von der Kollektor-Emitterspannung U_{CE} bei unterschiedlichen Beleuchtungsstärken E_v

Der Fototransistor kann als eine Zusammenschaltung einer Fotodiode und einer Transistorstufe angesehen werden.

Da sich das Kollektor-Basis-Gleichstromverhältnis B bei unterschiedlichen Kollektorströmen ändert, besteht bei Fototransistoren im Gegensatz zum Fotostrom bei Fotodioden und Fotoelementen keine lineare Abhängigkeit zwischen der Beleuchtungsstärke und dem Kollektorstrom.

Die höchste Stromverstärkung ergibt sich bei offenem Basisanschluss. Wird die Basis über einen Widerstand an den Massepol gelegt, geht die Stromverstärkung zurück, gleichzeitig erhöht sich die Grenzfrequenz.



Fototransistor BPW 42

Kennwerte und Grenzwerte

Die Kennwerte und Grenzwerte von Fototransistoren entsprechen weitgehend den Kenn- und Grenzwerten normaler Transistoren. Zusätzlich werden folgende Kennwerte angegeben:

- Kollektorhellstrom ($E = 1000 \text{ lx}$) $I_{Ch} \approx 0,8 \text{ mA}$
- Kollektordunkelstrom $I_{Cd} \approx 0,2 \mu\text{A}$
- Wellenlänge (max. Empfindlichkeit) $\lambda_{ES} \approx 0,2 \mu\text{m}$
- Fotoempfindlichkeit $S \approx 0,2 \mu\text{A/lx}$

9.5 Leuchtdioden (LED)

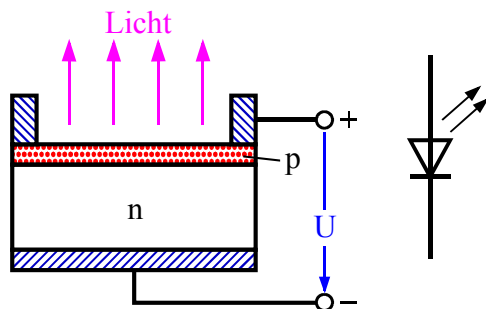
Leuchtdioden werden auch "Licht emittierende Dioden" (LED) genannt. Sie bestehen aus Mischkristallhalbleitern wie Galliumarsenid (GaAs), Galliumarsenidphosphid (GaAsP) und Galliumphosphid (GaP). Sie wandeln elektrische Energie in Lichtenergie um.

Auf N-leitendes Grundmaterial lässt man eine rd. $1 \mu\text{m}$ dicke hochdotierte P-Zone aufwachsen.

Die Diodenstrecke einer Leuchtdiode wird in Durchlassrichtung betrieben. Bei anliegender Spannung wandern die Elektronen von der N-Zone in die P-Zone. Dort kommt es zu häufigen Rekombinationen. Bei jeder Rekombination wird Energie in Form von Licht freigesetzt. Die Wellenlänge λ ist im Wesentlichen abhängig vom Bandenabstand des Halbleitermaterials (ΔW).

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta W} \quad \text{mit } h = 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \text{ und } c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (9.3)$$

Es gibt rot-, gelb-, grün- und blaustrahlende LED's. Besonders wirtschaftlich sind rotstrahlende LED's.

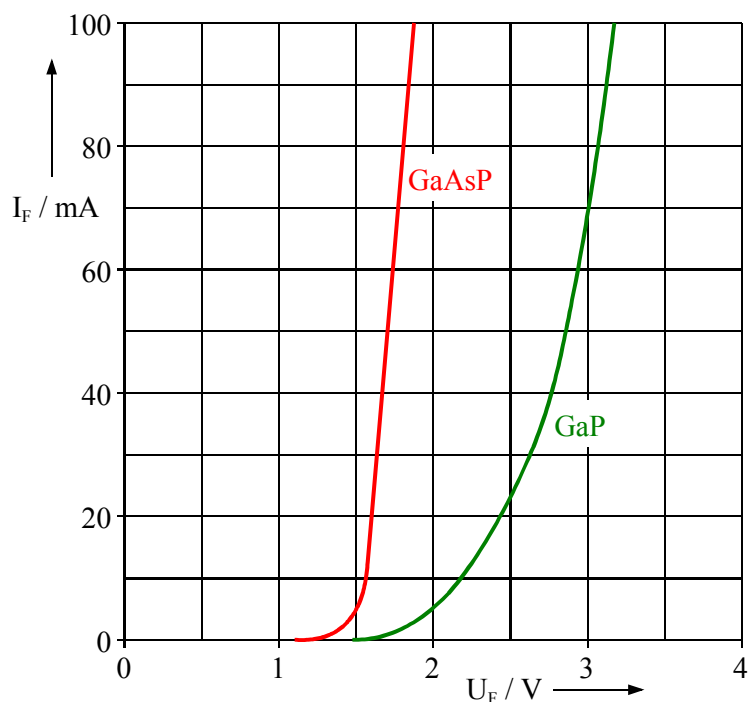


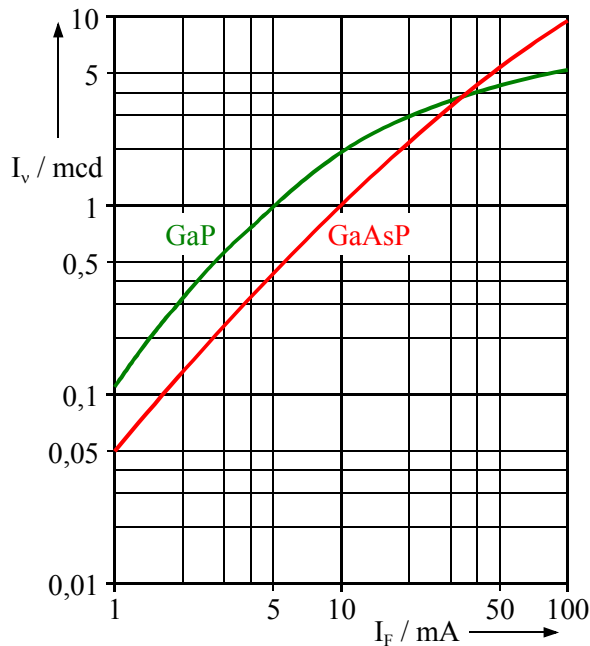
Aufbau und Schaltzeichen einer Leuchtdiode

Die Lichtstärke wächst proportional mit der Stromstärke. Leuchtdioden reagieren fast trägheitslos. Eine Modulation des Lichtstrahls bis in den Megahertzbereich hinein ist möglich.

Vorwärtskennlinien $I_F = f\{U_F\}$ von Leuchtdioden

Den höchsten Wirkungsgrad erreicht man mit Leuchtdioden, die im Infrarotbereich ($\lambda = 0,9 \dots 0,94 \mu\text{m}$) strahlen. Die Strahlungsleistung beträgt gleicher Leistungsaufnahme das 20- bis 50fache der rotstrahlenden LED's.





Galliumarsenid (GaAs) strahlt IR-A, Galliumarsenidphosphid (GaAsP) strahlt rot bzw. gelb und Galliumphosphid (GaP) strahlt grün.



Leuchtdioden
(gelbe + rote LED)

Lichtstärke I_v als Funktion des Vorwärtsstromes

Kennwerte und Grenzwerte

Wichtige Kennwerte sind die Leuchtfläche A , die Lichtstärke I_v und der Lichtstrom Φ , die Wellenlänge der Strahlung λ_p und der Öffnungswinkel α , in dem das Licht abgestrahlt wird.

Elektrische Kennwerte sind die Durchlassspannung U_F und die Sperrschichtkapazität C_s .

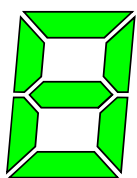
Übliche Kennwerte:

- $A \approx 0,5 \dots 30 \text{ mm}^2$
- $\Phi \approx 2 \text{ mlm}$ bei $I_F = 20 \text{ mA}$
- $I_v \approx 2 \dots 5 \text{ mcd}$ bei $I_F = 20 \text{ mA}$
- $\lambda_p \approx 660 \text{ nm}$
- $\alpha \approx 25^\circ \dots 60^\circ$

Grenzwerte sind der höchstzulässige Durchlass-Gleichstrom $I_{Fmax} \approx 50 \text{ mA}$, die höchstzulässige Sperrspannung $U_{Rmax} \approx 3 \text{ V}$ und die höchstzulässige Verlustleistung $P_{tot} \approx 120 \text{ mW}$.

Als Grenzwerte werden außerdem die größte und die kleinste zulässige Umgebungstemperatur angegeben.

Anwendungen

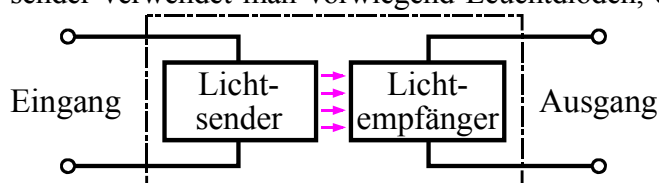


Leuchtdioden werden vorwiegend als Anzeigelämpchen verwendet. Für die Darstellung von Ziffern werden 7 Leuchtdioden zu einem 7-Segment-System gebaut.

Für Lichtschranken werden vorwiegend IR-LED's verwendet.

9.6 Opto-Koppler

Jeder Opto-Koppler besteht aus einem Lichtsender und aus einem Lichtempfänger. Als Lichtsender verwendet man vorwiegend Leuchtdioden, die IR-Licht abstrahlen. Als Lichtempfänger



Prinzip eines Opto-Kopplers

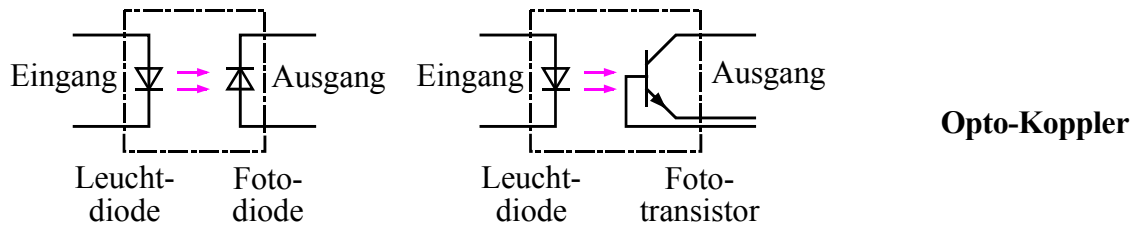
dienen Fotodioden und Fototransistoren und für Anwendungen in der Energietechnik auch Fotothyristoren. Spezielle Opto-Koppler beinhalten integrierte Verstärkerschaltungen.

Opto-Koppler gestatten eine rückwirkungsfreie galvanische getrennte Kopplung von elektronischen Baugruppen.

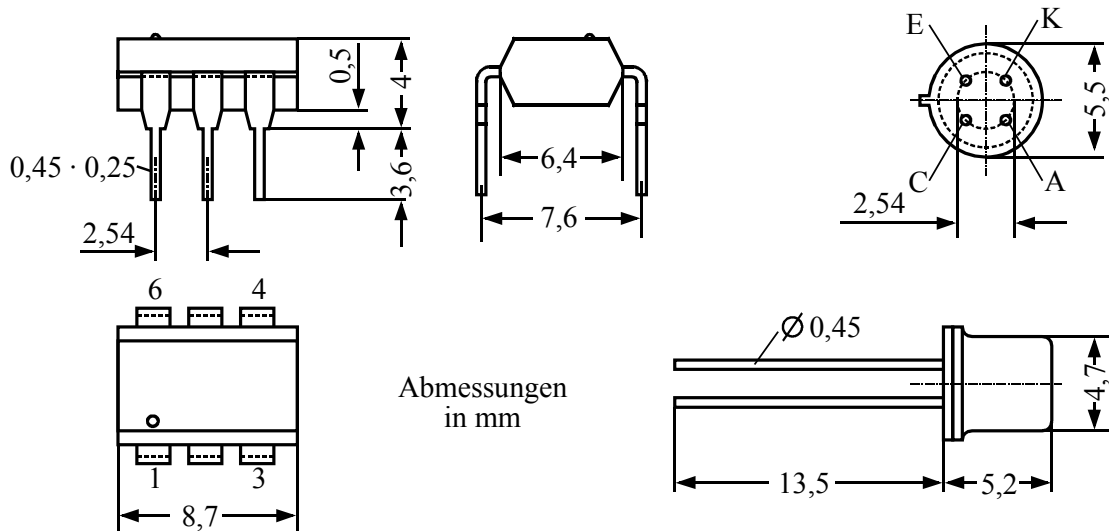
Die Isolation zwischen Eingang und Ausgang des Koppel-elementes ist abhängig von dem Abstand zwischen dem Sender- und Empfänger-Bauelement, der Anordnung und dem Werkstoff des lichtleitenden Isolators zwischen Sender und Empfänger.

Der Isolationswiderstand R_{is} zwischen Eingang und Ausgang beträgt bis zu $10^{11} \Omega$.

Die Grenzfrequenz von Opto-Kopplern beträgt bis zu 10 MHz.



Als Gehäuse verwendet man übliche Transistorgehäuse oder sogenannte Dual-in-line-Gehäuse, wie sie für integrierte Schaltungen üblich sind.



Gehäuseformen von Opto-Kopplern



Opto-Koppler

Die Kennwerte und Grenzwerte des Opto-Kopplers entsprechen den Kennwerten und Grenzwerten, die für Lichtsender und Lichtempfänger gelten. Zusätzlich werden die Isolationsprüfspannung $U_{is} \approx 4 \text{ kV}$ und die Grenzfrequenz $f_g \approx 10 \text{ MHz}$ angegeben.

Optokoppler werden überall dort eingesetzt, wo aus Sicherheitsgründen eine galvanische Trennung zwischen elektronischen Baugruppen gefordert wird. Eine Sonderbauform des Opto-Kopplers sind Reflex- und Gabellichtschranken.



Reflex-Koppler
CNY 70

Gabel-Koppler
3TFK100-TCST2000

