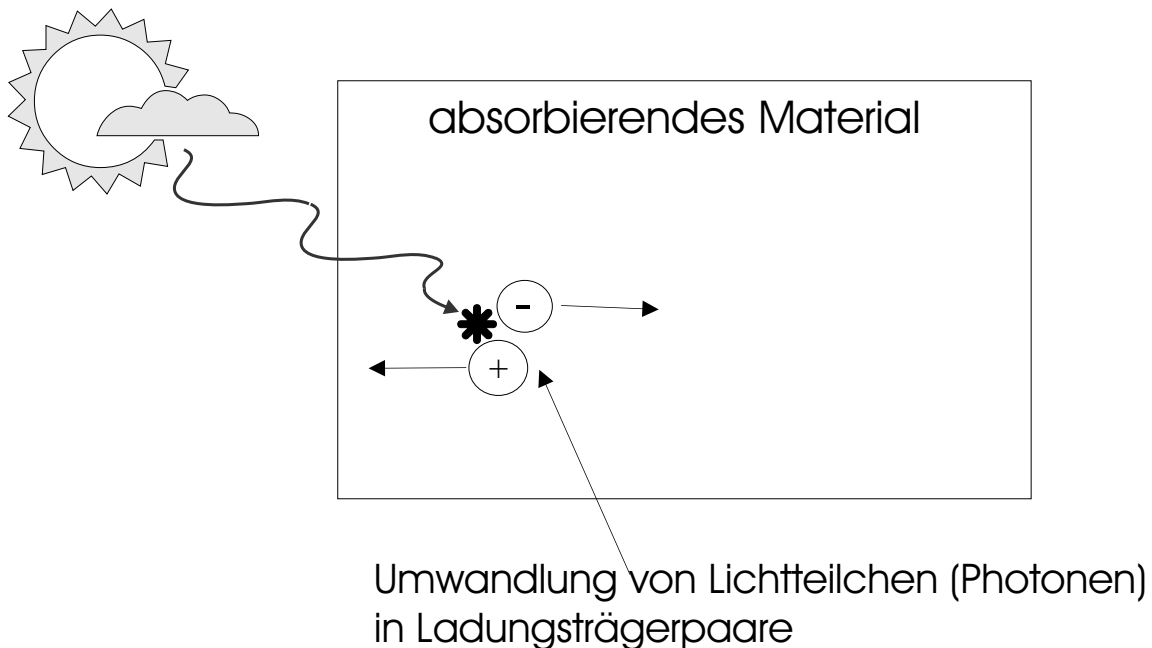


Die Physik der Solarzelle

Bedingungen für die direkte Umwandlung von Strahlung in elektrische Energie:

- 1) Die Strahlung muß eingefangen werden (Absorption)
- 2) Die Lichtabsorption muß zur Anregung beweglicher negativer und positiver Ladungsträger führen
- 3) Die Ladungen müssen getrennt werden



Halbleiter (z.B. Silizium oder GaAs) erfüllen Bedingung 1) und 2)

Zur Ladungstrennung wird ein Übergang zwischen zwei verschiedenen Halbleitern benötigt (pn-Übergang)

Ladungsträger in Halbleitern

Charakteristische Eigenschaften von Halbleitern:

Geringere elektrische Leitfähigkeit (kleiner als Metall, größer als z.B. Plastik)

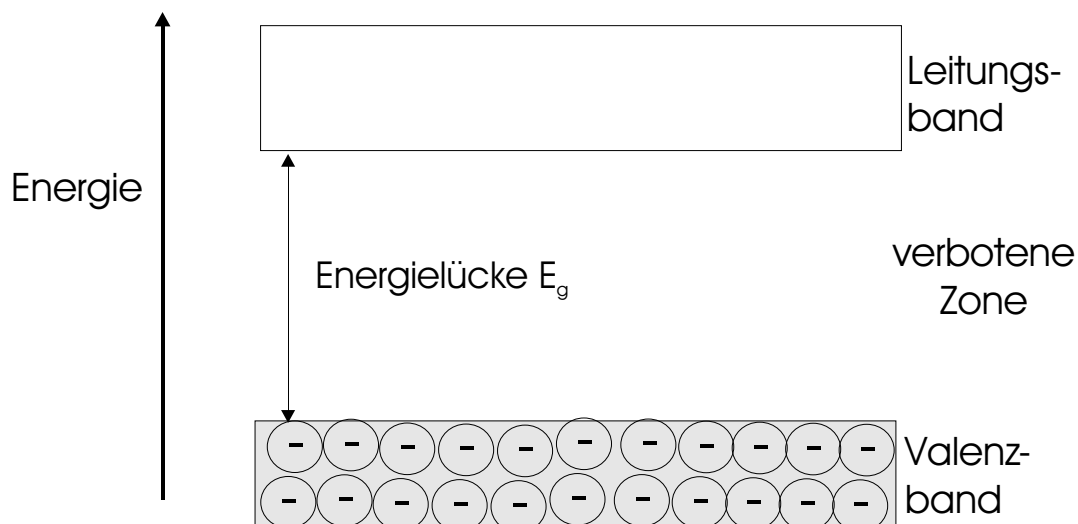
Leitfähigkeit sinkt bei sehr niedrigen Temperaturen auf Null ab

Leitfähigkeit steigt tendenziell mit der Temperatur und bei Beleuchtung (Photoleitung)

Es wird thermische Energie oder Lichtenergie benötigt, um bewegliche Ladungsträger zu erzeugen

Erklärung:

- Leitung in zwei "Stockwerken" (Valenz- und Leitungsband), die durch Energielücke (verbotener Energiebereich für Ladungsträger) getrennt sind
- Valenzband bei $T=0$ K voll gefüllt mit Elektronen; keine effektive Bewegung von Ladung möglich (vergleiche geschlossenes Rohr voll Wasser ohne Luftblasen)
- Leitungsband enthält bei $T=0$ K keine Elektronen



Ladungsträger in Halbleitern

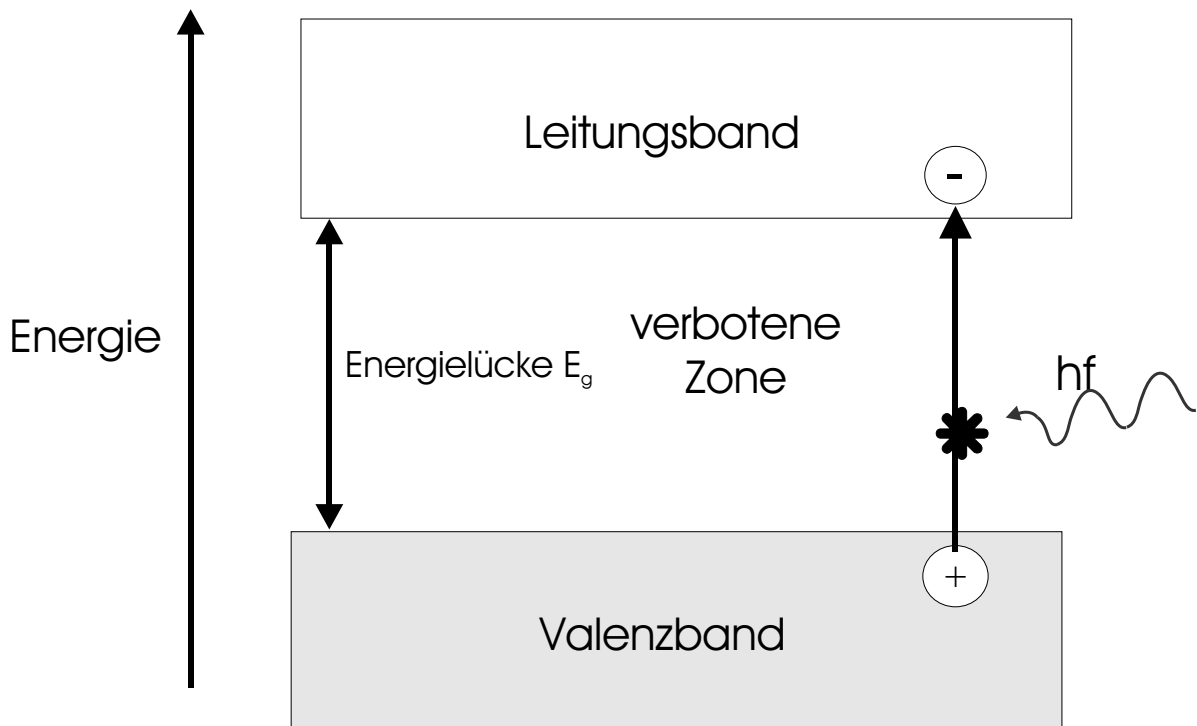
Erzeugung von Elektronen und Löchern

Durch Absorption eines Lichtteilchens (Photons) kann ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben werden

Das Elektron kann sich als negative Ladung im Leitungsband bewegen

Im Valenzband fehlt nun ein Elektron. Diese Fehlstelle verhält sich wie ein positiv geladener Ladungsträger (vgl. Luftblase im Wasserrohr). Sie wird als Loch bezeichnet

Beleuchtung führt zur Anregung von Elektron-Loch-Paaren



Ladungsträger in Halbleitern

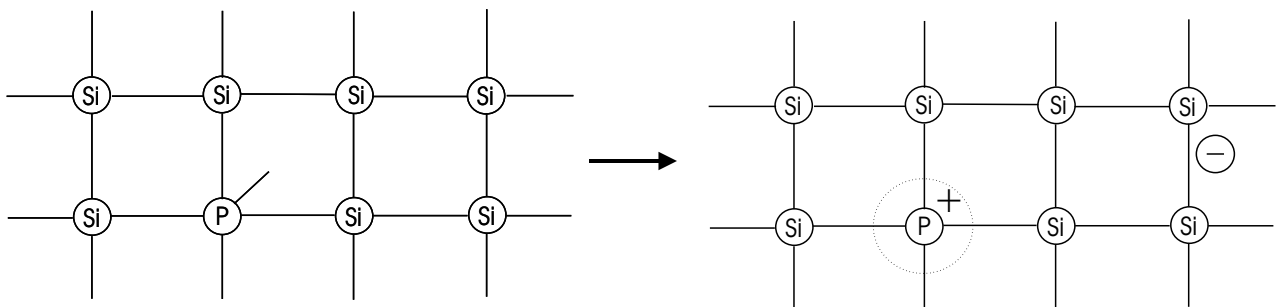
Erhöhung der Leitfähigkeit durch Dotierung

Silizium hat vier Elektronen in seiner äußersten Schale

Im Siliziumkristall bildet jedes Außenelektron ein Elektronenpaar mit einem Außenelektron des Nachbaratoms

n-Dotierung:

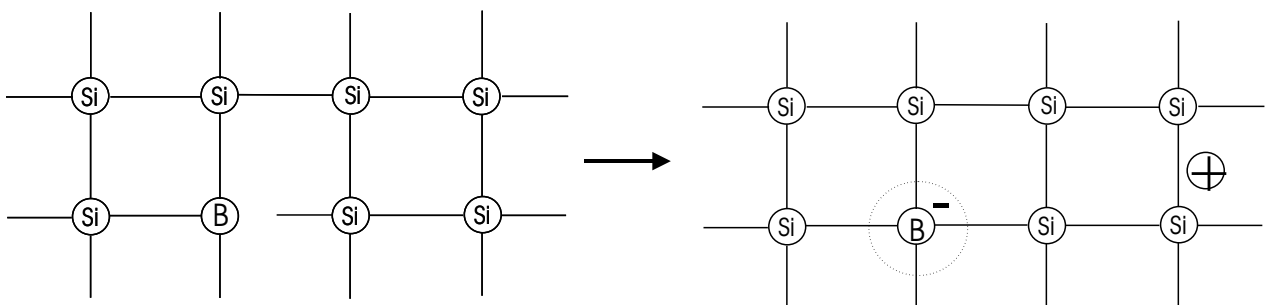
- Einbau von Atomen mit fünf Außenelektronen (z.B. Phosphor) in den Siliziumkristall
 - Das überzählige Elektron kann sich leicht vom Phosphor-Atom lösen und bildet ein frei bewegliches Elektron
 - Das Phosphor bleibt in positiv geladener Form zurück, denn es ist nur mit fünf Außenelektronen elektrisch neutral. Diese positive Ladung ist nicht beweglich, trägt also nicht zur Leitfähigkeit bei
- Die Leitfähigkeit in Phosphor-dotiertem Silizium beruht fast ausschließlich auf beweglichen Elektronen; man spricht von n-Dotierung und Elektronenleitung



Ladungsträger in Halbleitern

p-Dotierung:

- Einbau von Atomen mit drei Außenelektronen (z.B. Bor) in den Siliziumkristall
 - Das bei Bor fehlende Elektron wird vom Siliziumkristall nachgeliefert; dabei entsteht ein frei bewegliches Loch im Siliziumkristall
 - Das Bor bleibt in negativ geladener Form zurück, denn es ist nur mit drei Außenelektronen elektrisch neutral. Diese negative Ladung ist nicht beweglich, trägt also nicht zur Leitfähigkeit bei
- Die Leitfähigkeit in Bor-dotiertem Silizium beruht fast ausschließlich auf beweglichen Löchern; man spricht von p-Dotierung und Löcherleitung



Neutralitätsbedingung:

Auch dotierte Halbleiter sind als ganzes elektrisch neutral

Im n-dotierten Halbleiter ist z.B. die Zahl von freien Elektronen gleich der Zahl positiv geladener Dotierungs-Atome; die Zahl freier Löcher ist dagegen vernachlässigbar klein

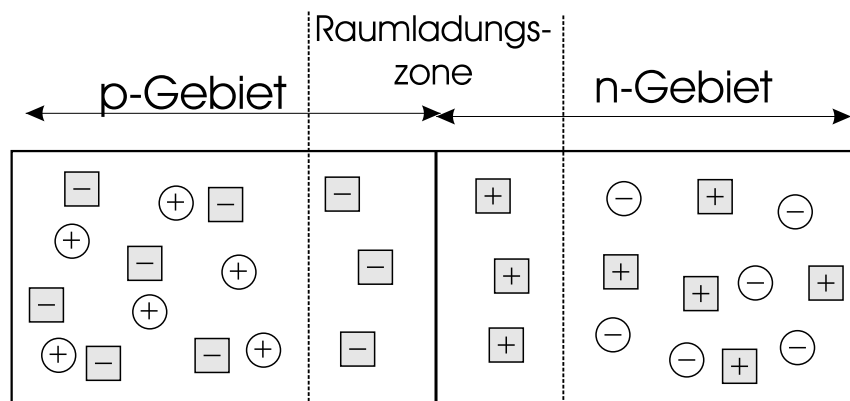
Der p/n-Übergang

p-Halbleiter und n-Halbleiter im Kontakt

Elektronen aus dem n-Gebiet und Löcher aus dem p-Gebiet mischen sich im Grenzgebiet (*Diffusion*) und löschen sich gegenseitig aus (*Rekombination*)

Es entsteht ein Bereich nahe des Übergangs, der wesentlich weniger freie Ladungsträger enthält als die Gebiete weit entfernt vom Übergang (*Verarmungszone*)

In der Verarmungszone bleiben die geladenen Dotierungsatome (z.B. Bor bzw. Phosphor) zurück und es entsteht ein positiv geladener Bereich im n-Halbleiter und ein negativ geladener Bereich im p-Halbleiter
Verarmungszone = Raumladungszone



neutrale Gebiete:
gleiche Zahl an freien
Ladungsträgern (Kreise)
und ortsfesten,
geladenen Dotanden

Raumladungszone:
nur ortsfeste, geladene
Dotanden

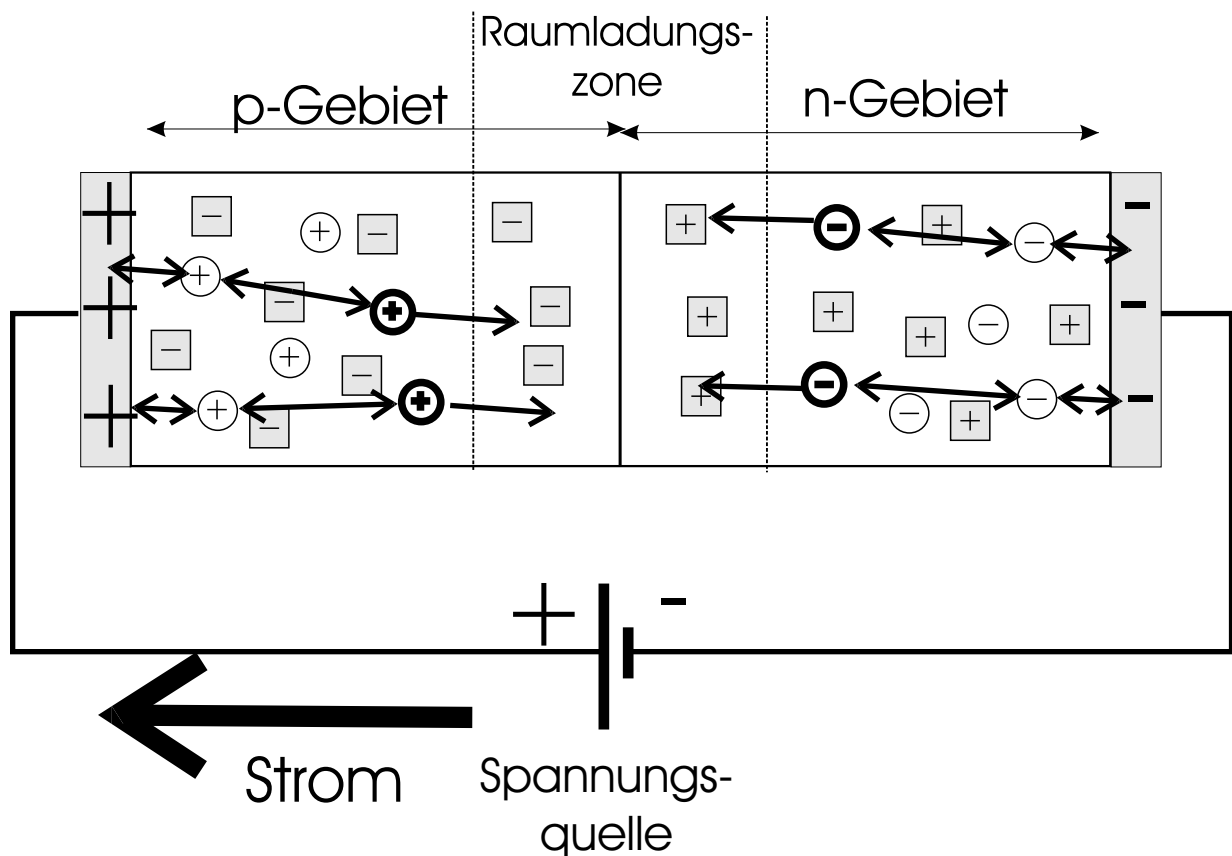
Der p/n-Übergang

Diodenverhalten des p/n-Übergangs (I)

Anlegen einer äußeren Spannung an den p/n-Übergang

Durchlaßrichtung: plus an p-Halbleiter, minus an n-Halbleiter

Gleichnamige Ladungsträger stoßen sich ab
Aus beiden Richtungen werden freie Ladungsträger in die Verarmungszone gedrückt; ein **Stromfluß durch die Verarmungszone wird möglich**



Der p/n-Übergang

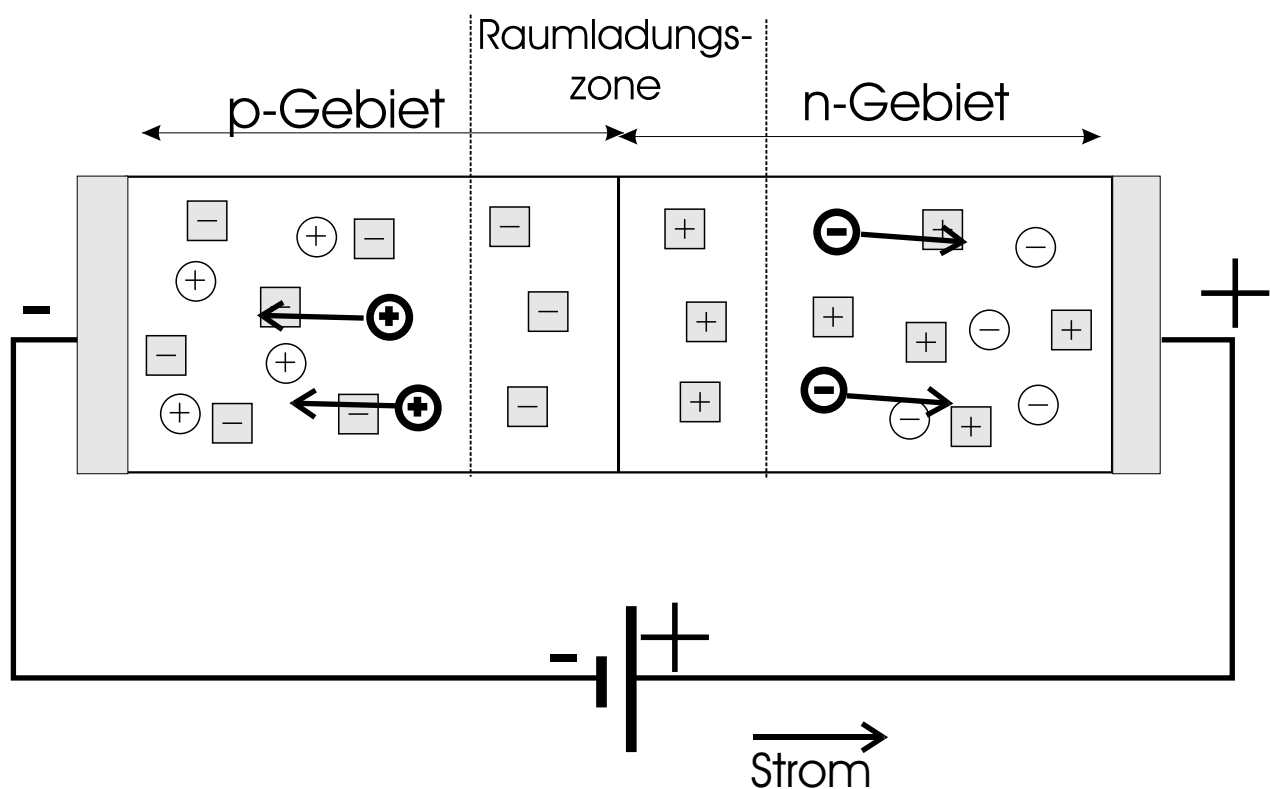
Diodenverhalten des p/n-Übergangs (II)

Sperrrichtung: minus an p-Halbleiter, plus an n-Halbleiter

Ladungsträger aus der Nähe der Verarmungszone werden zu den Kontakten gezogen

Die Dicke der Verarmungszone steigt weiter

Es können keine neuen Ladungsträger mehr nachgeliefert werden; **es fließt nahezu kein Strom**



Der p/n-Übergang

Entstehung des Photostroms (I)

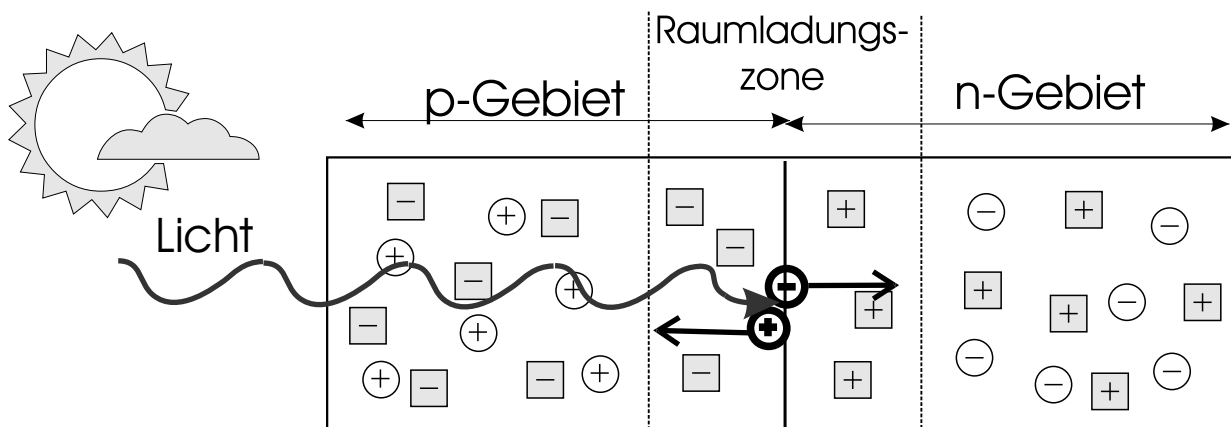
Keine äußere Spannung angelegt; statt dessen Stromfluß durch Beleuchtung

Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares in der Verarmungszone

Elektron wird von positiver Raumladung Richtung n-Gebiet gezogen

Loch wird von negativer Raumladung Richtung p-Gebiet gezogen

Das **Elektron-Loch-Paar** wird also in der Raumladungszone **getrennt**



Ladungstrennung in der Raumladungszone

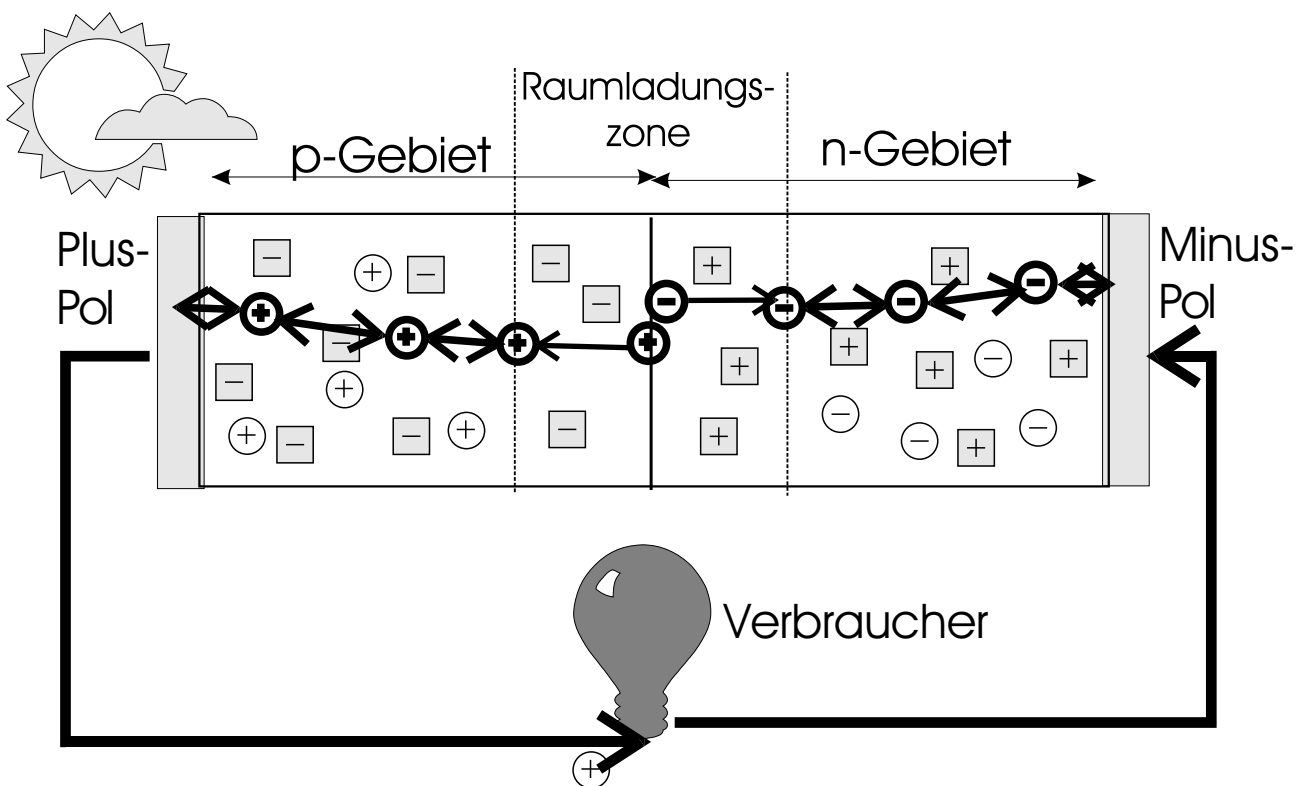
Entstehung des Photostroms (II)

Angeregte Ladungsträger wurden in der Raumladungszone getrennt

Haben die Ladungsträger den Rand der Raumladungszone erreicht, so schieben sie andere Ladungsträger derselben Sorte vor sich her

Ist kein Verbraucher angeschlossen, dann stauen sich die Ladungen an den Kontakten, d.h. die Solarzelle erzeugt eine Spannung (vgl. Batterie)

Wird ein Verbraucher angeschlossen, dann fließt ein Strom durch die gesamte Zelle und den Verbraucher hindurch



Stromfluß, der von Ladungsträgern verursacht wird, die den Rand der Raumladungszone erreicht haben

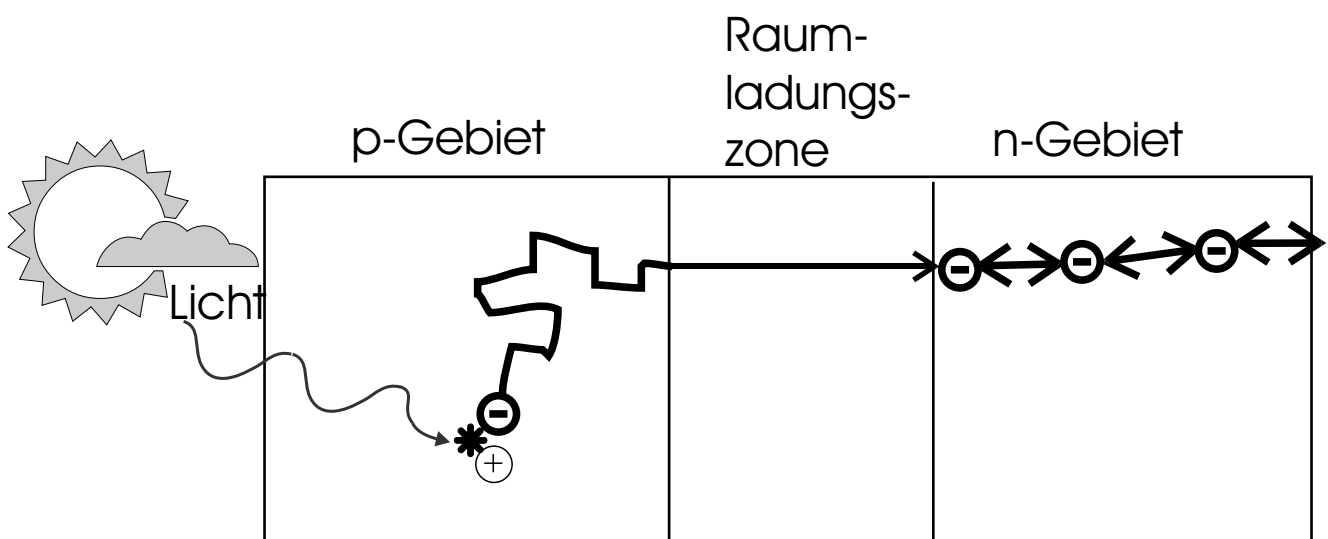
Der p/n-Übergang

Entstehung des Photostroms (III)

Wird ein **Photon außerhalb der Verarmungszone absorbiert**, entsteht dort ein Ladungsträgerpaar, auf das zunächst keine Kraft wirkt

Die Ladungsträger werden durch die thermischen Schwingungen des Halbleiterkristalls umhergestoßen, d.h. sie **führen willkürliche Bewegungen** aus

Gelangen sie dabei **zufällig in die Raumladungszone**, dann werden sie **dort getrennt** und tragen auch zum Photostrom bei.



Entscheidend für den Wirkungsgrad der Solarzelle ist, daß **die angeregten Ladungsträger auf ihrem Weg in die Verarmungszone keine Störstellen** (z.B. Fremdatome, Baufehler im Kristallgitter...) **antreffen**, von denen sie eingefangen werden können.

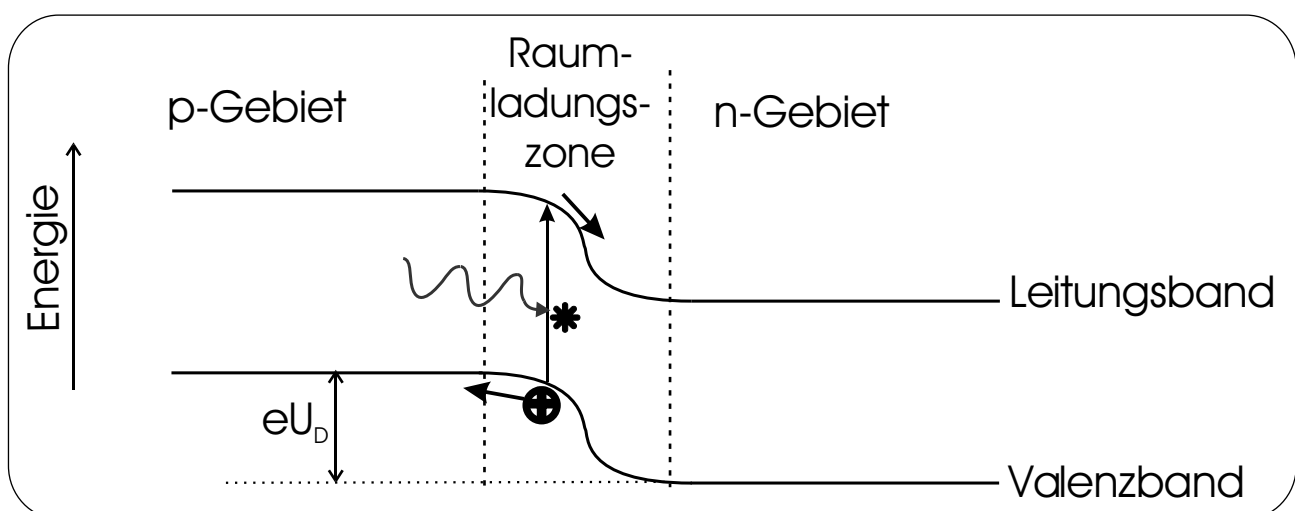
Der p/n-Übergang

Erklärung des Photostroms am Energieniveauschema (I)

Dargestellt ist die Energie, die Elektronen an der Kante von Valenz- und Leitungsband an verschiedenen Orten im p/n-Übergang haben.

Das Gefälle der Bänder in der Raumladungszone veranschaulicht das elektrische Feld, d.h. die Kraft, die auf die Ladungsträger wirkt.

Die Gesamthöhe des Gefälles symbolisiert die eingebaute Spannung U_D in der Raumladungszone des p/n-Übergangs (multipliziert mit der Elementarladung e)



Elektronen verhalten sich in einem Energieniveauschema wie Steine, d.h. sie rollen nach unten; Löcher verhalten sich wie Luftblasen, d.h. sie steigen nach oben.

Elektron-Loch Paare, die in der Raumladungszone erzeugt werden, werden durch das Gefälle sofort getrennt

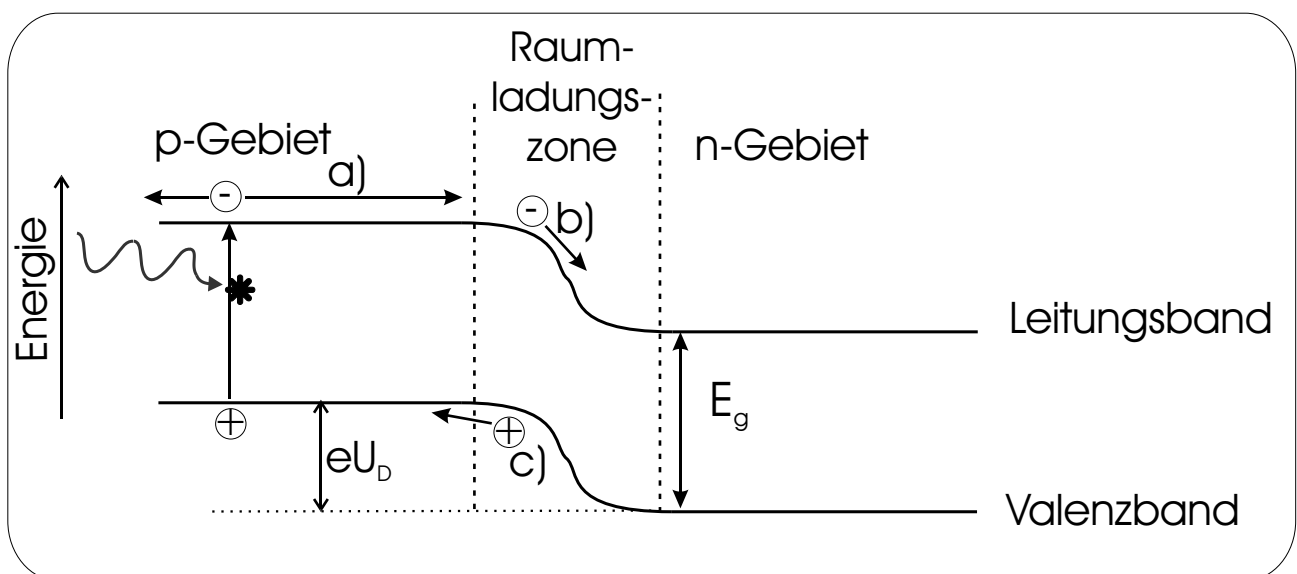
Der p/n-Übergang

Erklärung des Photostroms am Energieniveauschema (II):

Photostrom bei Absorption außerhalb der Raumladungszone

Im inneren des p-Gebiets liegt kein Gefälle vor; die Ladungsträger bewegen sich willkürlich (a), bis sie zufällig die Raumladungszone erreichen

Photogenerierte Elektronen aus dem n-Gebiet (Minoritäten) werden von der Raumladungszone abgesaugt (b), Löcher aus dem p-Gebiet (Majoritäten) dagegen können nicht in die Raumladungszone eindringen (c).



Eingebaute Spannung und Photospannung

Die eingebaute Spannung U_D (genauer: eU_D) ist immer etwas kleiner als die Energielücke E_g .

Die eingebaute Spannung des p/n-Übergangs wird bei Beleuchtung größtenteils in eine außen an der Zelle abgreifbare Spannung (Photospannung) umgesetzt.

Bei geringer Beleuchtung oder hohen Temperaturen ist die Photospannung etwas kleiner als die eingebaute Spannung, da die Diffusion von Majoritätsladungsträgern (z.B. Löcher aus dem p-Gebiet Richtung n-Gebiet) gegen den Photostrom arbeitet.

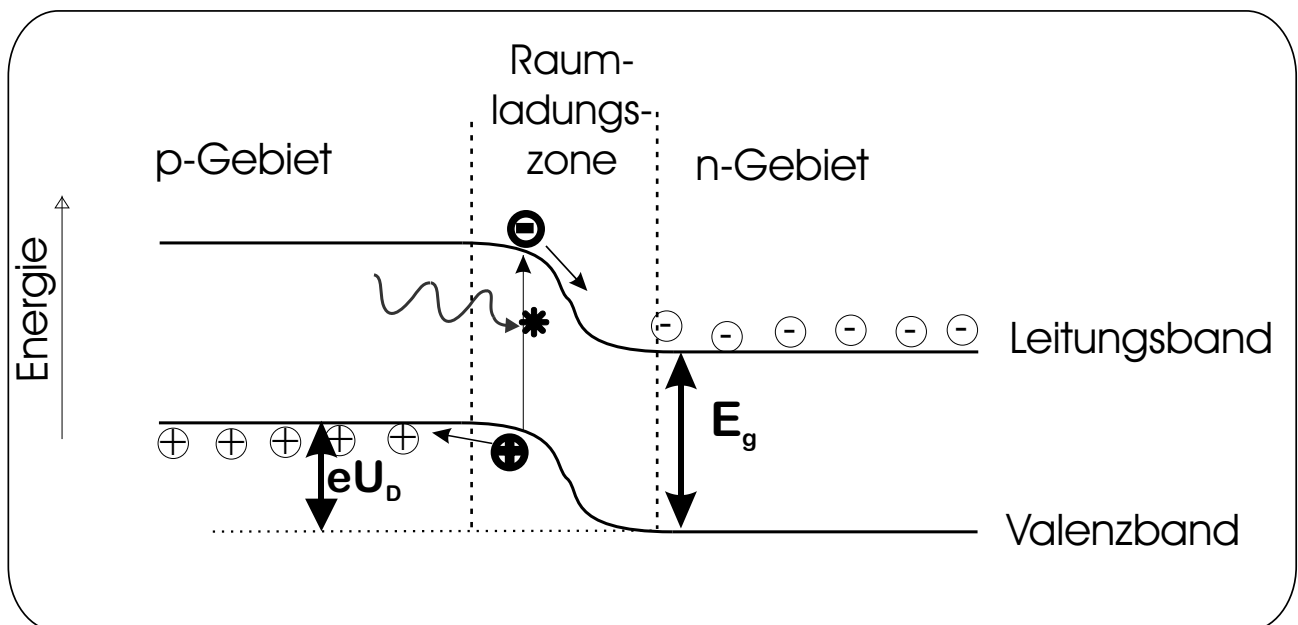
Der p/n-Übergang

Eingebaute Spannung und Photospannung

Die **eingebaute Spannung** U_D (genauer: eU_D) ist immer etwas **kleiner als die Energielücke** E_g

Ohne Beleuchtung befindet sich die Zelle im Gleichgewicht. Die Spannung U_D der Zelle fällt daher ausschließlich über die Raumladungszone ab (Verbiegung der Bänder) und kann nicht außen abgegriffen werden.

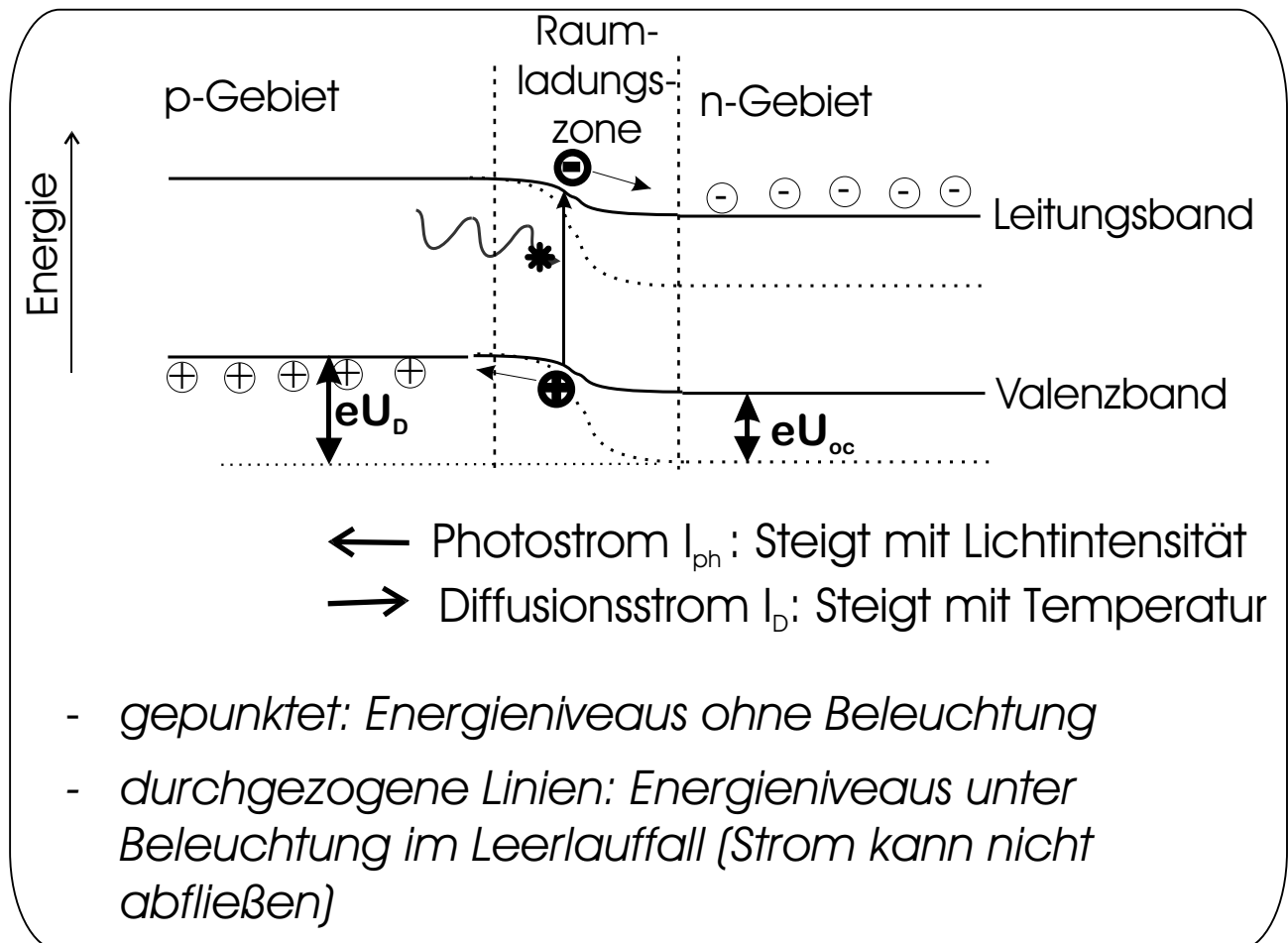
Die eingebaute Spannung des p/n-Übergangs wird bei Beleuchtung größtenteils in eine außen an der Zelle abgreifbare Spannung (Photospannung) umgesetzt.



Der p/n-Übergang

Abhängigkeit der Photospannung von der Lichtintensität und der Temperatur

Bei **geringer Beleuchtung** oder **hohen Temperaturen** ist die **Leerlauf-Photospannung U_{oc}** deutlich kleiner als die **eingebaute Spannung U_D**



Erklärung:

Die Diffusion (Stromfluß aus einem Gebiet mit hoher Ladungsträgerkonzentration in ein Gebiet geringer Konzentration) arbeitet stets gegen den Photostrom

Entscheidend für die nutzbare Photospannung ist das Verhältnis aus Photostrom und Diffusionsstrom

Je niedriger die Temperatur und je höher die Lichtintensität, desto günstiger ist dieses Verhältnis.

Abhängigkeit der Photospannung von der Lichtintensität und der Temperatur

Erklärung für Fortgeschrittene:

Ohne Beleuchtung befindet sich die Zelle im Gleichgewicht. Die Spannung U_D der Zelle fällt daher ausschließlich über die Raumladungszone ab und kann nicht außen abgegriffen werden.

Wird die Zelle beleuchtet und kein Verbraucher angeschlossen, stauen sich die Ladungsträger in der Zelle. Sie neutralisieren dabei die Raumladung in der Raumladungszone teilweise. Dadurch wird das Gefälle in der Raumladungszone verringert.

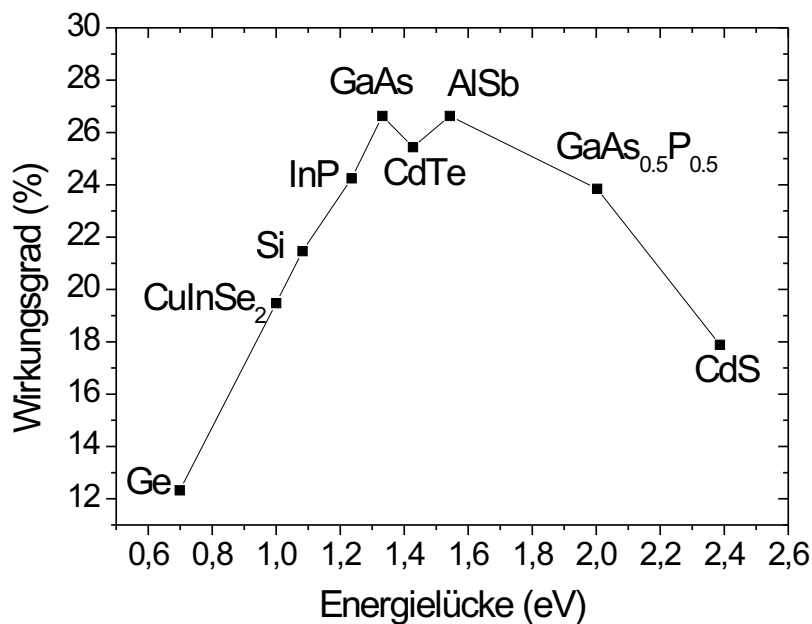
Die Verschiebung der Energieniveaus, die damit verbunden ist (Differenz zwischen durchgezogener und gepunkteter Kurve), ist jetzt als äußere Spannung nutzbar. Das bedeutet, daß nur *der Teil des Gefälles, der bei Beleuchtung in der Zelle abgebaut wird*, sich auf den Verbraucher überträgt.

Das Gefälle in der Raumladungszone wird nie komplett abgebaut, da die Diffusion von Majoritätsladungsträgern (z.B. Löcher aus dem p-Gebiet Richtung n-Gebiet) gegen den Photostrom arbeitet (Im Leerlauf, also ohne Stromfluß, muß gelten: $I_{ph} = -I_D$).

Die Differenz zwischen nutzbarer Spannung U_{oc} und eingebauter Spannung U_D ist genau durch dieses Restgefälle bei Beleuchtung gegeben. Mit zunehmender Beleuchtung wird das Restgefälle immer kleiner, da der Photostrom über den Diffusionsstrom dominiert. Mit zunehmender Temperatur ist es umgekehrt, da der Diffusionsstrom immer größer wird.

Photospannung, Photostrom und Energielücke (I)

Halbleitermaterialien mit einer Energielücke von ca. 1,5 eV sind für Solarzellen optimal geeignet. Für größere und kleinere Werte nimmt der theoretisch mit einem Material erreichbare Wirkungsgrad ab



Theoretisch erreichbarer Wirkungsgrad für verschiedene Halbleitermaterialien

Die Energie der einzelnen Lichtteilchen hängt von der Farbe des Lichts ab

Weißes Licht (z.B. Sonnenlicht) setzt sich aus Lichtteilchen mit verschiedenen Farben zusammen (vgl. Regenbogen oder Zerlegung von weißem Licht in buntes Spektrum am Prisma)

Ein Halbleitermaterial kann mehr oder weniger gut auf die Farbverteilung (Spektrum) des Sonnenlichts abgestimmt sein (vgl. folgende Folien)

Photospannung, Photostrom und Energielücke (II)

Halbleiter mit kleiner Energielücke E_g

Nahezu alle Lichtteilchen (Photonen) haben ausreichend Energie $hf > E_g$, um ein Elektron-Loch-Paar erzeugen zu können; nur Infrarot-Licht durchdringt den Halbleiter ungenutzt

Der Photostrom ist hoch

Die Energie vieler Photonen des Sonnenlichts ist größer als die Energielücke E_g . Die überschüssige Energie geht sofort wieder verloren, da die Ladungsträger schnell an die Bandkanten rutschen.

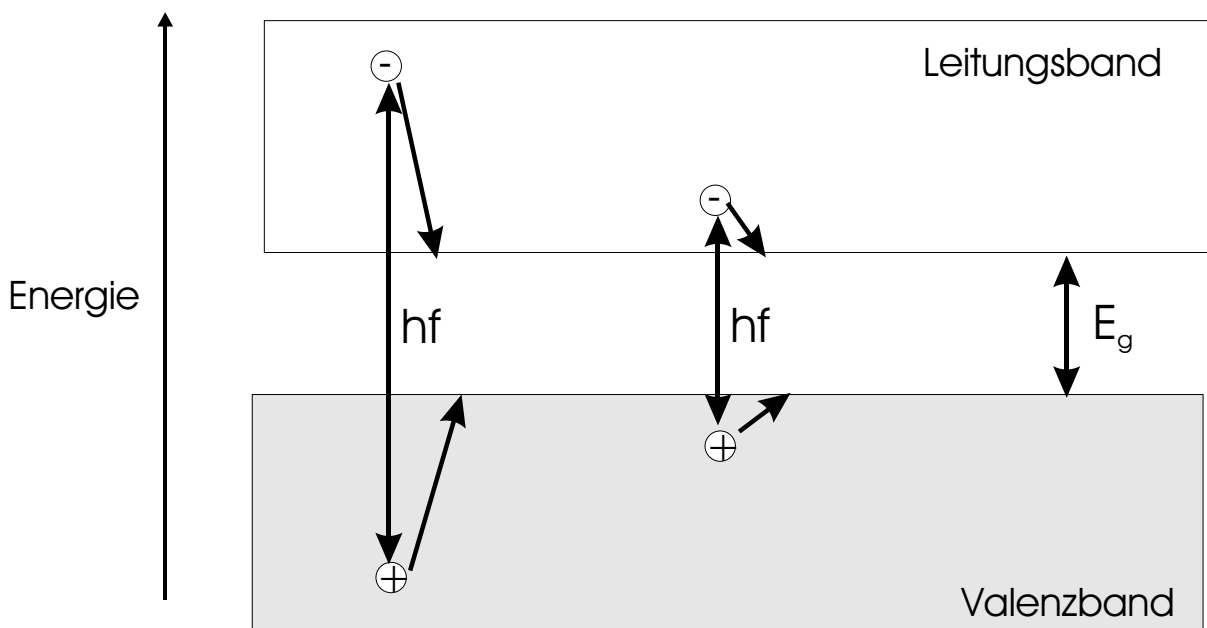
Pro Photon kann maximal die Energie E_g in eine Photospannung umgesetzt werden

Die Leerlauf-Photospannung U_{oc} ist klein:

$eU_{oc} < eU_D < E_g$ (oc=open circuit=offener Stromkreis ohne Verbraucher)

hochenergetisches
Licht (z.B. violett)

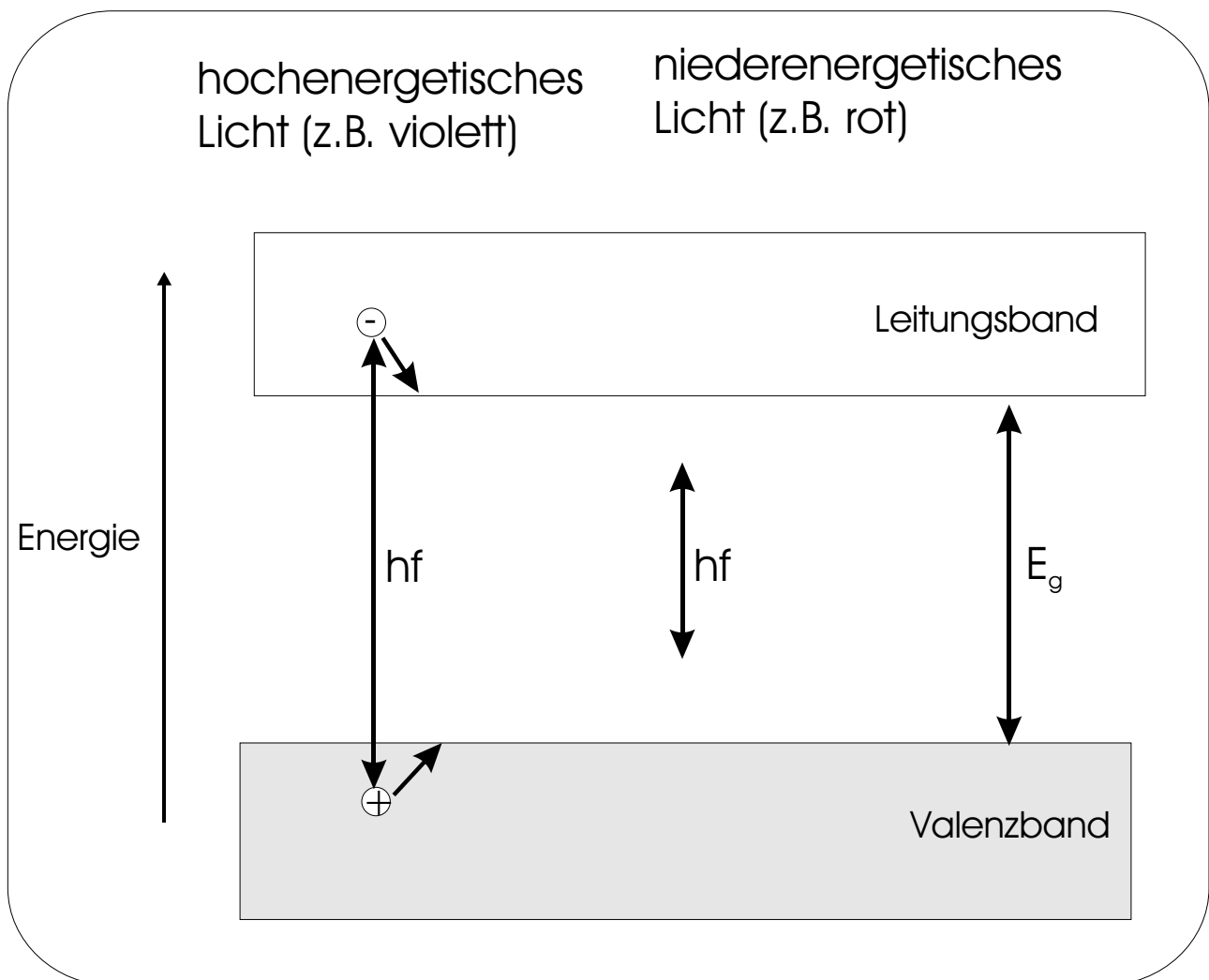
niederenergetisches
Licht (z.B. rot)



Photospannung, Photostrom und Energielücke (III)

Halbleiter mit großer Energielücke:

Die **Photospannung ist hoch**, aber der **Photostrom ist gering**, da viele Photonen nicht ausreichend Energie besitzen, um ein Elektron Loch-Paar anzuregen

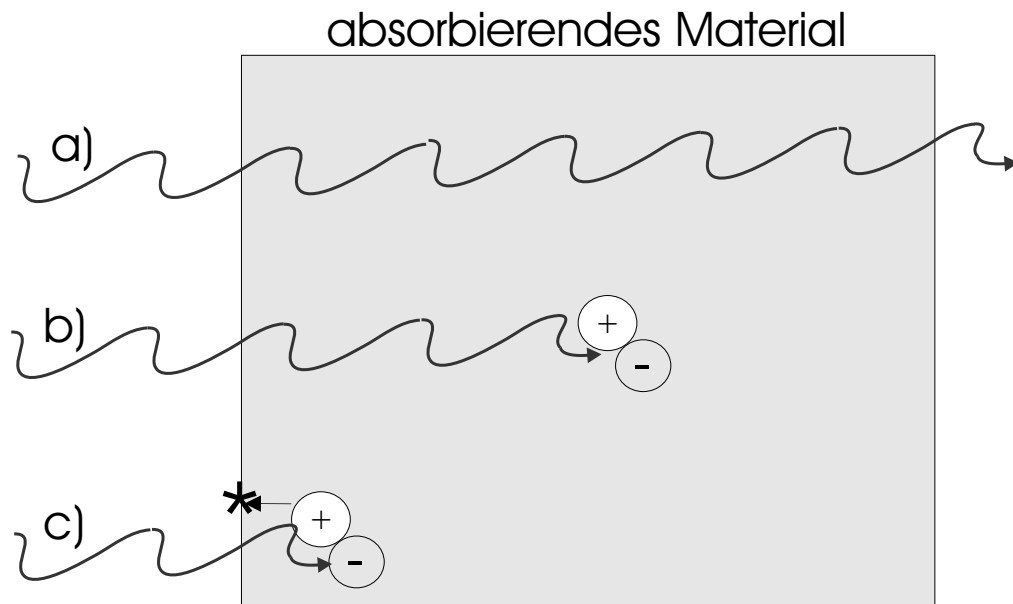


Eine gute Solarzelle muß eine hohe Photospannung *und* einen hohen Photostrom abgeben (Leistung=Spannung*Strom). Deswegen darf die Energielücke des Materials nicht zu groß oder zu klein sein und es gibt eine **ideale Energielücke für Solarzellenmaterialien (ca. 1,5eV)**.

Rekombination an Oberflächen, Absorptionsspektrum und spektrale Empfindlichkeit

Die Eindringtiefe des Lichts hängt von dessen Farbe ab:
In Silizium nimmt der Absorptionskoeffizient mit
zunehmender Photonenenergie (also von rot über grün
und blau bis violett) zu

- a) sehr schwach absorbiertes Licht: durchdringt Solarzelle ohne Ladungsträger zu generieren
- b) *Optimale Eindringtiefe: Licht wird tief im Material absorbiert*
- c) Extrem starke Absorption / geringe Eindringtiefe: Ladungsträger werden nahe der Oberfläche erzeugt und sind in Gefahr, an der Oberfläche zu



Die spektrale Empfindlichkeit von Siliziumsolarzellen steigt zusammen mit der Absorption nur bis zu einem Maximum und fällt dann wieder ab.

Verlustmechanismen in Solarzellen

