



# Schulbiologiezentrum Hannover

Vinnhorster Weg 2, 30419 Hannover

Tel: 0511-168-47665/7

Fax: 0511-168-47352

Email : schulbiologiezentrum@hannover-stadt.de

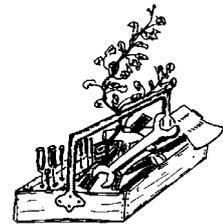
Hannover

## Unterrichtsprojekte Natur und Technik

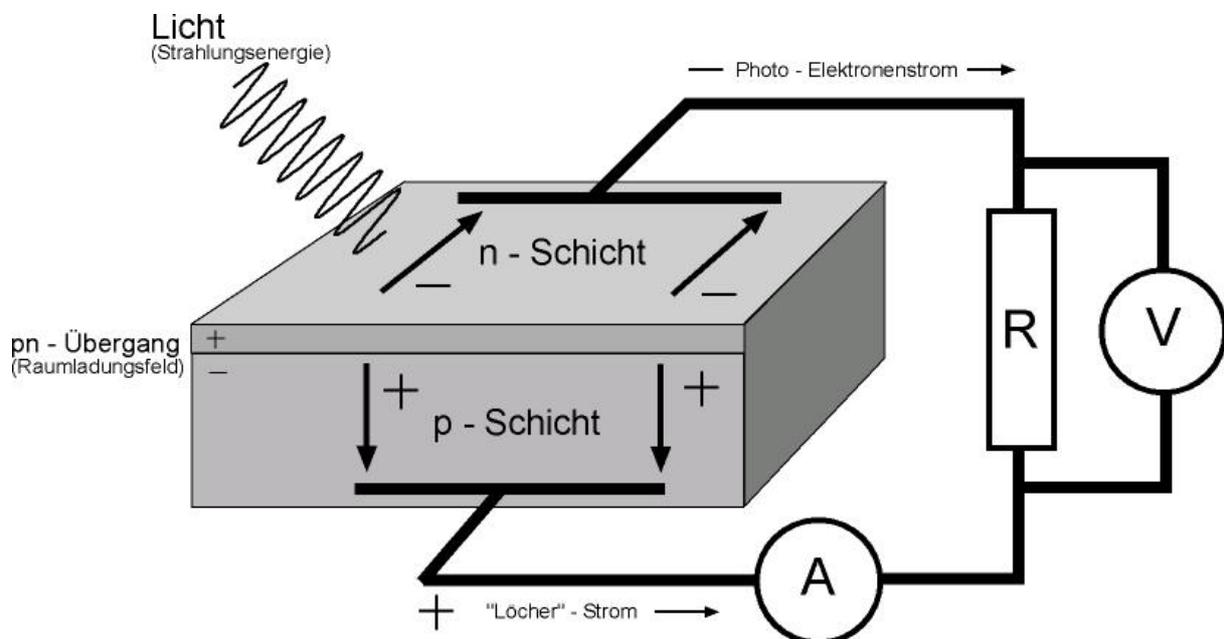
### 19.16

#### Basisinformation

für Arbeitsgemeinschaften und Projektwochen:



## Strom von der Sonne: Wie funktioniert eine Solarzelle?

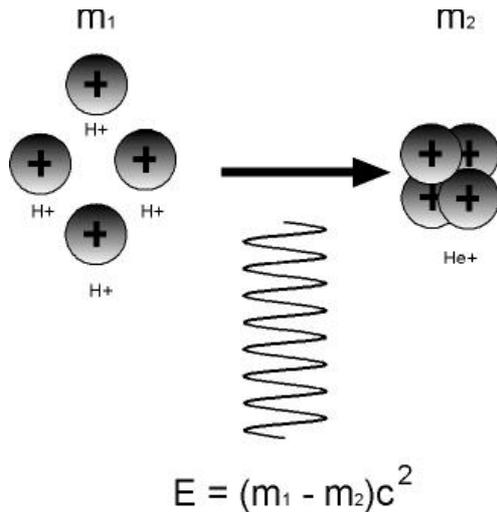


Solarzellen verwandeln Sonnenlicht, also Strahlungsenergie der Sonne, in elektrischen Strom. Zumeist zusammengefasst in Solarmodulen liefern sie heute vom Netz unabhängige Energie für unterschiedliche Anwendungen. Nach wie vor sind sie sehr teuer in Bezug auf die umgewandelte Leistung.

Um das Prinzip einer Solarzelle zu verstehen, müssen wir uns zunächst in einen kleinen Exkurs in die kernphysikalischen Prozesse im Sonneninnern und die Natur der elektromagnetischen Strahlung begeben.

## Fusionsreaktor Sonne und Strahlungsenergie

Die Sonne, genauer gesagt der Sonnenkern, ist ein gigantischer Fusionsreaktor, in dem bei Temperaturen von ca. 15000000 Grad Celsius jeweils vier Wasserstoffkerne in einen Heliumkern verwandelt werden. Die Masse des entstandenen Heliumkerns ( $m_2$ ) ist geringfügig kleiner als die der vier Wasserstoffkerne ( $m_1$ ). Dieser kleine Differenzbetrag ( $m_1 - m_2$ ), der so genannte Massendefekt wird dabei gemäß der Beziehung  $E = m \times c^2$  in Energie verwandelt. Der Faktor  $c$  ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Pro Sekunde gehen der Sonne auf diese Weise 4 Millionen Tonnen Masse in Form von elektromagnetischer Strahlung "verloren", sie wird also ständig leichter. Die Strahlung, also Licht und Wärme, ist die energetische Grundlage allen Lebens auf der Erde.

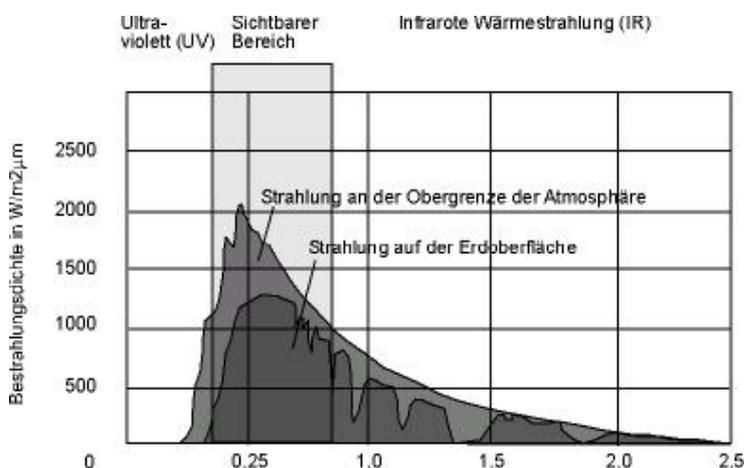


Elektromagnetische Strahlung besteht aus aufeinander senkrecht stehenden elektrischen und magnetischen Feldern, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ( $c$  im Vakuum = 300000 km/s) ausbreiten. Licht ist die kurzwelligere und energiereichere Verwandte der Strahlung, die von Röntgengeräten, Mobilfunkgeräten, Radio-/Fernsehsendern, Mikrowellenherden oder Herdplatten ausgeht. Elektromagnetische Strahlung besitzt, je nach Betrachtungsweise, eine Teilchen- oder eine Wellennatur. Letzteres bedeutet, dass sie durch eine bestimmte Wellenlänge  $\lambda$  (Lambda, gemessen in Metern) und eine Frequenz  $\nu$  (Hertz = Schwingungen pro Sekunde) gekennzeichnet werden kann. Die Verknüpfung zwischen Wellenlänge und Frequenz ist

gegeben durch die Formel  $c = \lambda \times \nu$ .

Die Wellenlänge bzw. Frequenz der emittierten Strahlung ist abhängig von der Temperatur des Strahlers. Bei einer Kerntemperatur von ca. 15 Millionen Grad wird im Sonneninnern extrem kurzwellige, d.h. hochfrequente Gamma- und Röntgenstrahlung erzeugt. Sie wird auf ihrem langen Zick-Zack-Weg in die kühleren Randbereiche durch Absorption und erneute Emission immer langwelliger. Das bedeutet nichts weiteres, als dass sie Energie verloren hat. Die Oberflächentemperatur der Photosphäre liegt bei „nur noch“ etwa 6000 K (Kelvin) oder etwa 5700° Celsius. Das Maximum der Strahlung befindet sich daher im Bereich von etwa 483 nm (Nanometer, ein Milliardstel Teil eines Meters oder ein Millionstel Teil eines Millimeters) oder  $6.25^{15}$  Hertz. Dies wird vom menschlichen Auge, das sich im Laufe der Evolution an das solare Strahlungsspektrum angepasst hat als blaugrün empfunden.

## Spektrale Verteilung der solaren Strahlung



Die Energie ( $E$ ) der elektromagnetischen Strahlung ist abhängig von der Frequenz ( $\nu$ ). Nach der Formel  $E = h \cdot \nu$  (Konstante  $h$  = Plancksches Wirkungsquantum) ist höherfrequente, also kurzwellige Strahlung energiereicher als niederfrequente. Im Bereich der sichtbaren Strahlung zwischen Infrarot (780 nm) und Ultraviolett (380 nm) besitzen die Photonen eine Energie von 1,6 eV (Elektronenvolt) bis 3,2 eV. Das Elektronenvolt ist definiert als Energiezuwachs, den ein Elektron

beim Durchlaufen einer Potentialdifferenz von 1 Volt aufnimmt. 1 eV entspricht ( $1,602 \times 10^{-19}$  Wattsekunden oder Joule).

Das Maximum der Sonnenstrahlung liegt, der Oberflächentemperatur von etwa 6000 K entsprechend, bei 483 nm, also im blaugrünen Bereich. An der kurzwelligen oder höherfrequenten und energiereichen Flanke bricht die Kurve sehr abrupt ab, zum langwelligen oder niederfrequenten und energieärmeren Ende hin läuft sie sehr flach aus. Dargestellt ist die Strahlungskurve an der Obergrenze der Atmosphäre und auf der Erdoberfläche in Meeresspiegelniveau. Das solare Spektrum wird durch die Atmosphäre leicht zum langwelligen Bereich hin verschoben: UV-Strahlung wird durch Ozon, Infrarot Segmentweise durch Wasserdampf und Kohlendioxid absorbiert.

### Einige Daten zur Sonne:

Durchmesser:	1 392 000 km
Masse:	$1,99 \times 10^{33}$ g oder 332270 Erdmassen
Volumen:	$1,412 \times 10^{18}$ km <sup>3</sup> oder das 1301000fache des Erdvolumens
Entfernung Sonne-Erde	147,1 (Perihel) - 152,1 (Aphel) Mill. Km (8,2 Lichtminuten)
Oberflächentemperatur:	ca. 6000 K oder 5700°C
Kerntemperatur:	ca. 15 Mill. K

### Grob vereinfachtes Funktionsprinzip der Solarzelle:

Die Solarzelle besteht aus zwei (unterschiedlich) dünnen Schichten aus hochgereinigtem Silizium (Si). Silizium gehört, was die elektrische Leitfähigkeit angeht, zu den Nichtleitern oder Isolatoren. Die beiden Schichten werden gezielt mit wenigen Fremdatomen verunreinigt (dotiert). Das dotierte Silizium steht zwischen den Leitern (z.B. Kupfer) und den Nichtleitern. Solche Stoffe werden als Halbleiter bezeichnet.

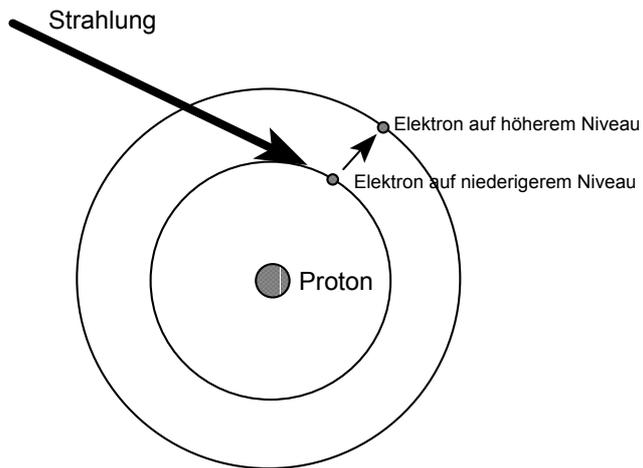
Das Prinzip der Solarzelle besteht (stark vereinfacht) darin, dass Elektronen, die als so genannte Valenzelektronen normalerweise für die wechselseitige Bindung der Siliziumatome im Kristallgitter verantwortlich sind, durch die auftreffende elektromagnetische Strahlung der Sonne „angeregt“, das heißt auf ein höheres Energieniveau angehoben werden und sich damit vom Kern lösen können. Die so "angehobenen" Elektronen können jetzt elektrische Ladungen transportieren. Aus dem Nichtleiter Silizium wird durch Anregung ein Halbleiter (siehe unten).

Die Ladungen (+ und -) werden durch die Eigenschaften und Anordnung der hineindotierten Fremdatome elektrostatisch zur jeweiligen Seite hin "sortiert". Dadurch entsteht an den Anschlüssen der Solarzelle eine elektrische Potentialdifferenz: Auf der einen Seite ein Ladungsüberschuss (-), auf der anderen ein Ladungsdefizit (+). Wird ein Verbraucher angeschlossen, fließt so lange Strom zwischen den Klemmen (von - nach +), wie das Ladungsgefälle aufrechterhalten werden kann. Wird die Solarzelle belichtet, wird diese Potentialdifferenz ständig am Leben erhalten. Dadurch fließt ein Strom, der Solarstrom. Eine Solarzelle liefert ca. 0,6 - 0,8 Volt Gleichspannung (U). Der Solarstrom (I) steigt im Verhältnis der Bestrahlung auf Werte um 2,5 Ampère. Höhere Spannungen werden durch Reihenschaltung einer entsprechenden Anzahl von Zellen erreicht, höhere Stromstärken durch Parallelschaltung. Ein Solarmodul besteht aus einer Kombination von - zur Spannungserhöhung- in Reihe geschalteten und - zur Stromstärkensteigerung - parallel geschalteten Einzelzellen. Handelsübliche Solarmodule sind meist auf eine Spannung von ca. 12 Volt ausgelegt. Die "Leerlaufspannung" im unbelasteten Zustand, also ohne angeschlossenen Verbraucher, liegt bei etwa 17 Volt. Sie sinkt im Belastungsfall ab. Eine wichtige Kenngröße ist der Kurzschlussstrom. Er ergibt sich, wenn der positive und der negative Anschluss direkt, also ohne Verbraucher, verbunden werden. Die Spannung sinkt in diesem Falle auf sehr geringe Werte.

Die Leistung des Moduls ( $P$  in Watt) bemisst sich aus dem Produkt Spannung ( $U$  in Volt) multipliziert mit der Stromstärke ( $I$  in Ampère):  $P = U \times I$ . Diese Rechnung gilt aber nur, wenn die Leistungsaufnahme des Verbrauchers mit dem Leistungsvermögen des Solarmoduls übereinstimmt, d.h. einander gut angepasst sind.

Zum Weiterlesen für diejenigen, die es genauer wissen wollen:

### Anregung durch Strahlung:



Anregung durch Strahlung am Beispiel des Wasserstoffatoms

Was "Anregung" bedeutet, sei zunächst am Beispiel des einfachsten der chemischen Elemente, dem Wasserstoff (H) dargestellt. Das Wasserstoffatom besteht nur aus einem positiv geladenen Proton und einem darum kreisenden Elektron. Dem Elektron stehen mehrere Bahnen zur Verfügung, denen unterschiedlichen Energieniveaus entsprechen. Trifft ein Strahlungsquant auf das Elektron kann es (muss aber nicht!) auf eine "höhere" Bahn angehoben werden. Es nimmt bei diesem

Sprung den Energiebetrag des Strahlungsquants auf und speichert ihn. Die Energie des Quants muss passen, ist sie zu gering, reicht es für den Sprung nicht, ist sie zu groß springt das Elektron über das Ziel hinaus und fällt wieder in den Urzustand zurück. Der Energiegehalt der Strahlung, gemessen in Elektronenvolt (eV, s.u.) steigt mit der Frequenz, also in dem Maß wie das Quant schwingt.

### Leiter, Nichtleiter und Halbleiter

Ein elektrischer Strom fließt, wenn sich Träger elektrischer Ladungen (Elektronen) in einem elektrischen Feld in eine bestimmte Bewegungsrichtung gezwungen werden. Der Stromfluss in metallischen *Leitern* beruht darauf, dass die normalerweise für die Bindung an die Nachbaratome verantwortlichen sogenannten Valenzelektronen so schwach an die Metallkerne gebunden sind, dass die natürlichen Wärmeschwingungen der Atome genügen, um einen großen Teil davon quasi freizusetzen. Im Innern des Metalls liegt dann praktisch ein Elektronengas vor (Bei Kupfer ca.  $10^{23}$  Elektronen pro  $\text{cm}^{-3}$ ). Wird eine elektrische Spannung angelegt, wandern die negativ geladenen Elektronen mit einer Driftgeschwindigkeit von einigen mm/s vom negativen zum positiven Pol der Spannungsquelle. Dabei stoßen sie die vor ihnen liegenden gewissermaßen vor sich her. Die Leitungsgeschwindigkeit für elektrische Ströme erreicht damit fast Lichtgeschwindigkeit: Wenn wir einen Lichtschalter betätigen beginnt die Lampe - ohne merkbaren Zeitverzug - an.

Bei *Nichtleitern* (Isolatoren) sind die Valenzelektronen fest an den Kern gebunden, freie Leitungselektronen sind praktisch nicht vorhanden. Eine Temperaturerhöhung führt jedoch zu einem Schwingen der Atome und dazu, dass einzelne Elektronen aus dem Valenzband herausgeschlagen werden, absolute Nichtleiter gibt es bei steigenden Temperaturen daher nicht.

Ein solcher Nichtleiter ist z.B. der Grundwerkstoff der Solarzellen, das Silizium. Dieses Element ist vierwertig, d.h. die äußere Elektronenschale enthält vier Valenzelektronen, erst mit acht wäre sie komplett. Die fehlenden vier Elektronen werden von jeweils einem Nachbaratom beigesteuert. Im Ergebnis bedeutet das:

Jedes Siliziumatom geht mit vier weiteren Siliziumatomen eine feste Bindung ein. Silizium tritt daher als stabiles Tetraeder-Kristallgitter auf.

Im hochgereinigten Zustand liegt jedes Valenzelektron fest, Leitungselektronen sind nicht vorhanden, die elektrische Leitfähigkeit ist praktisch Null.

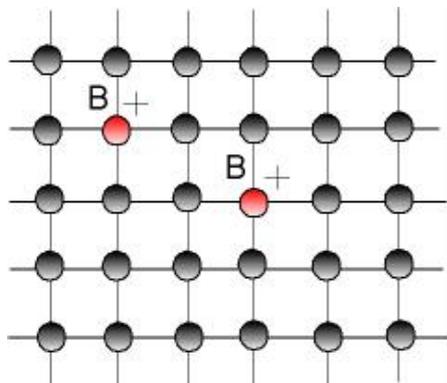
Moderne Kommunikationstechnik und elektronische Datenverarbeitung wären ohne Silizium undenkbar: Dioden, Transistoren, integrierte Schaltkreise (ICs) und Computerchips bestehen aus Silizium, das zu diesem Zweck allerdings erst zum *Halbleiter* gemacht werden muss.

Auch die Solarzelle ist aus derartigen Halbleitermaterialien gefertigt.

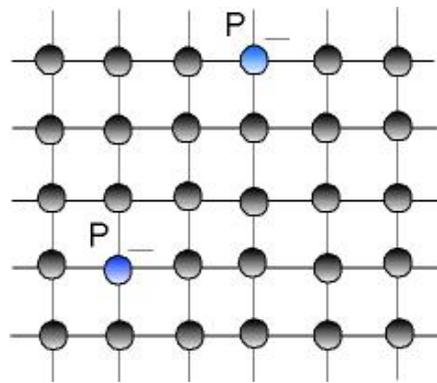
Was ist ein Halbleiter?

### Silizium wird mit Fremdatomen "dotiert"

Hochgereinigtes Silizium wird gezielt mit "Störstellen" verunreinigt, die dem Werkstoff eine definierte Leitfähigkeit verleihen. Dazu werden Fremdatome wie Phosphor oder Bor in kleinsten Mengen eingebracht. Phosphor ist fünfwertig, besitzt also fünf Valenzelektronen, Bor dagegen nur dreiwertig. Phosphor wie Bor werden wie Silizium in das Kristallgitter aufgenommen, allerdings mit dem Unterschied, dass Phosphor ein Elektron zuviel, Bor ein Elektron zuwenig mitbringt.



Mit Bor verunreinigtes (dotiertes) Silizium.



Mit Phosphor verunreinigtes (dotiertes) Silizium.

Beim mit Phosphor dotierten Silizium führt das dazu, dass sobald eine Spannung an das Kristallgitter angelegt wird, dieses überschüssige, nicht gebundene Elektron in Richtung Pluspol wandert. Phosphor besitzt im Normalzustand fünf positiv geladene Protonen im Kern und fünf negativ geladene Elektronen in der Peripherie und ist dadurch, wie jedes natürliche Element elektrisch neutral. Nach Abgabe des Elektrons ist es nicht mehr neutral, sondern besitzt einen positiven Ladungsüberschuss. Es hat jetzt ein positives Proton mehr als negative Elektronen. Hier ist ein "Loch" entstanden, in das ein anderes Elektron - vom überzähligen Proton angezogen "hineinfallen" kann. Dieses Elektron liefert ein benachbartes Siliziumatom, was zur Folge hat, dass hier wieder ein "Loch" entsteht: Das abgebende Siliziumatom besitzt jetzt kurzzeitig ein Elektron zuwenig, erhält dadurch einen positiven Ladungsüberschuss und "versorgt" sich mit einem weiteren Elektron vom Nachbaratom usw. Die im elektrischen Feld wandernden Elektronen bedeuten: Das Material ist leitend geworden. Weil es sich bei Elektronen um negative Ladungsträger handelt, wird es als n-leitend bezeichnet. Gleichzeitig wandern die "Löcher", die etwas weniger umgangssprachlich als "Defektelektronen" bezeichnet werden, in Richtung Minuspol. Das n-leitende Material bleibt in der Gesamtheit elektrisch neutral.

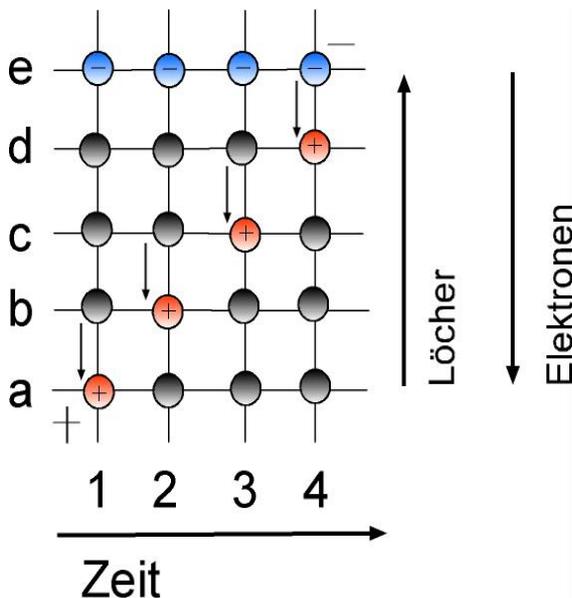
Die Steigerung der Leitfähigkeit durch Dotierung ist gewaltig: Ein fünfwertiges Atom in ein Kristallgitter aus 108 Si-Atomen erhöht die Konzentration der Leitungselektronen um den Faktor 10 gegenüber dem undotierten Zustand.

Mit Bor dotiertes Silizium hat auf der anderen Seite zur Folge, dass p-leitendes Material entsteht: Bor ist chemisch dreiwertig, bringt also drei Valenzelektronen in die Silizium-Bindung ein.

Im Tetraederkristall des Siliziums fehlt daher ein Elektron, hier entsteht ein positiver Ladungsüberschuss, ein "Loch". Legen wir eine Spannung an, wird in Elektron eines benachbarten Atoms dieses Loch auffüllen. Dieser Vorgang reißt ein neues auf, welches wieder aufgefüllt wird usw. Die "Löcher" wandern in Richtung Pluspol. Auch das p-leitende Material ist insgesamt gesehen elektrisch neutral.

In der Solarzelle wird eine Schicht n-leitenden Materials auf eine p-leitende gebracht. Im sogenannten p-n-Übergangsbereich vollzieht sich bereits im dunklen Zustand aufgrund der neutral.

In der Solarzelle wird eine dünne Schicht n-leitenden Materials auf eine etwa zehnmal so dicke p-leitende Schicht gebracht. Im sogenannten p-n-Übergangsbereich vollzieht sich bereits im Dunkeln aufgrund der unterschiedlichen Dotierung eine Wanderung (Diffusion) von Elektronen in die positiv übersättigte p-Schicht bzw. von Löchern in die n-Schicht mit negativem Ladungsüberschuss.



### Grobes Schema der Elektronen- und Löcherwanderung im pn-Übergangsbereich

Die rot gezeichneten Bor- und blau gezeichneten Phosphoratome im dotierten Silizium-Raumgitter unterscheiden sich in ihrer Ladung. Das positiv geladene Bor (a1) entzieht dem neutralen Nachbarsilizium (b1) ein Elektron, b1 wird dadurch positiv und entzieht c3 ein Elektron, c3 wiederum entzieht d4 ein Elektron. Dieses wird durch eine Überschussladung eines Phosphoratoms im n-dotierten Bereich aufgefüllt.

Entlang der horizontalen Zeitachse vollzieht sich eine Wanderung der Löcher mit positiven Ladungsüberschuss von a1 über b2 und c3 nach d4 und damit zum negativ dotierten Bereich.

Die negativen Elektronen wandern gleichzeitig in die positiv dotierte Schicht.

Durch die entgegengesetzte Löcher- und Elektronenwanderung bildet sich bei Dunkelheit im pn-Übergangsbereich ein schmales elektrisches "Raumladungsfeld", das von der n- zur p-dotierten Schicht gerichtet ist. Das Potential zwischen den beiden Schichten beträgt etwa 0,6 Volt. Fällt nun Licht auf diese Anordnung, werden Valenzelektronen angeregt und zu wandernden Leitungselektronen. Dadurch werden ständig neue "Löcher" (Defektelektronen) geschaffen. Beide so entstandenen, negativen wie positiven Ladungsträger werden entlang des p-n-Übergangs von dem elektrischen Raumladungsfeld "sortiert" und diesseits oder jenseits angereichert. Das Ergebnis ist ein negativer Ladungsüberschuss auf der einen, ein positiver auf der anderen Seite.

### Bändermodell und Photoeffekt

Atome bestehen aus positiv geladenen Protonen und, bei Elementen die schwerer sind als Wasserstoff (s.o.), elektrisch neutralen Neutronen. Sie werden von einer, der Menge der Protonen entsprechenden Zahl negativ geladenen Elektronen umkreist. Diese bewegen sich auf bestimmten Bahnebenen, so genannten „Schalen“. Diese Schalen entsprechen bestimmte Energieniveaus. Springt ein Elektron auf eine niedrigere Energiestufe, wird der Differenzbetrag als elektromagnetische Strahlung abgegeben. Die Frequenz der Strahlung entspricht  $\Delta E$ . Umgekehrt führt die Absorption energetisch (also frequenzmäßig) "passender" Strahlung zur Anregung von Elektronen: Sie werden auf eine höhere Energiestufe gehoben. Die Anregung durch Licht wird als Photoeffekt bezeichnet. Die Energiebeträge zwischen den Elektronenbahnen sind, soweit wir das Atom isoliert betrachten eindeutig definiert (vergleiche die Verhältnisse beim Wasserstoff).

Veränderte Verhältnisse liegen beim Atomverband vor, so im Kristallgitter des Siliziums: Durch die große Atomdichte (etwa  $10^{23}$  Atome je  $\text{cm}^3$  im Kristall) spalten sich die scharf begrenzten Energieniveaus des Einzelatoms auf in sog. Energiebänder. Diese Bänder stellen "erlaubte" Energiebereiche dar, innerhalb derer sich eine bestimmte Anzahl Elektronen aufhalten kann.

Zwischen den Bändern liegen "verbotene" Bereiche, Bandlücken also, in denen keine Elektronen vorhanden sind.

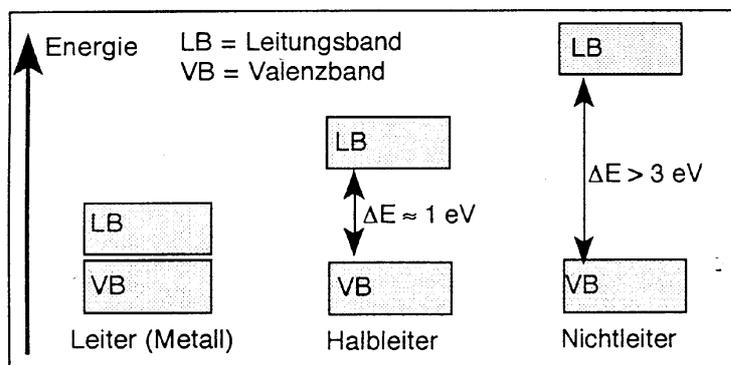
Für die Bindung der Atome untereinander sind die Elektronen im Valenzband verantwortlich, Träger der negativen elektrischen Ladungen halten sich im weiter vom Kern entfernten Leitungsband auf. Das Leitungsband hat eine höhere Energiestufe als das Valenzband.

### Absorption und Anregung

Durch Absorption eines Quants Energie wird ein Elektron angeregt, d.h. aus dem Valenzband auf eine höhere Niveaustufe, hier in das Leitungsband gehoben. Erst im Leitungsband kann es als Träger elektrischer Ladung wirksam werden. Da zwischen den Bändern sog.

"verbotene Zonen" existieren, in denen sich aus quantenphysikalischen Gründen keine Elektronen aufhalten können, muss das absorbierte Photon ausreichend Energie besitzen, um das Elektron in das Leitungsband heben zu können. Ein Halbleiter, der eine Bandlücke von mehr als 3 eV besitzt, kann kein sichtbares Licht (1,6 - 3,2 eV) absorbieren, die Quantenenergie der Strahlung reicht nicht aus. Die Siliziumzelle weist eine Bandlücke von 1,15 eV auf, sie absorbiert damit auch einen erheblichen Teil des infraroten Bereichs.

Die Quanten des kurzwelligigen, an den UV-Bereich grenzenden Lichtes heben die Elektronen im Falle des Siliziums über das Leitungsband hinaus, sie fallen zurück auf eine niedrigere Energiestufe und führen zu Wärme. Wärme wirkt sich auf den Wirkungsgrad der Solarzelle nachteilig aus.



Optimal wären Halbleiter mit Bandlücken von 1,4 - 1,5 eV (z.B. Galliumarsenid oder Cadmiumtellurid), sie hätten den größten Wirkungsgrad. Silizium ist als zweithäufigstes Element der Erdkruste aber der z. Z. beste Kompromiss zwischen Wirkungsgrad und Kosten.

Vergleich der drei verschiedenen Bändermodelle für Metall, Halbleiter und Isolator

### Elektronen, Löcher und der Parksuchverkehr:

Stellen wir uns den Querschnitt der Solarzelle als Straße vor, die zum Strand führt. Alle wollen einen Parkplatz und jeder möchte wenig laufen.

Die Plätze in der Nähe des Strand sind natürlich die attraktivsten. Das Attraktivitätsgefälle zwischen Hinterland und Strand entspricht der elektrischen Spannung. Fährt jemand aus einer Lücke heraus tut er es natürlich nur, um eine andere, weiter vorn gelegene zu besetzen. Wird eine Lücke frei, wird sie sofort wieder gefüllt. Die Autos (Elektronen) bewegen sich also zum Strand, die Parklücken (Löcher, Defektelektronen) "wandern" durch die Bewegung der Autos immer weiter zurück. Irgendwann gibt es einen (Elektronen-) Stau am Ende der Straße, der nur abgebaut werden kann, wenn ein Seitenweg geöffnet wird, der den Verkehr zurückfließen lässt. Der rückfließende Verkehr steht für den Stromfluss. Die entnervten Autofahrer können sich dann am Beginn der Strandstraße erneut auf Parkplatzsuche begeben.

## **Verschiedene Typen Solarzellen:**

### Monokristallines, polykristallines und amorphes Silizium:

Die Leitungselektronen und "Löcher" wandern umso ungehinderter, je ungestörter die Kristallstruktur des Halbleiters ist.

Monokristalline, d.h. aus einem einzigen Kristall geschnittene Halbleiterscheiben haben infolgedessen mit ca. 15% einen erheblich höheren Wirkungsgrad als polykristalline, aus mehreren Kristallen zusammengesetzte (10%) oder gar nur amorphes Silizium, welches überhaupt keine Struktur aufweist.

### Herstellung:

Ausgangsmaterial ist  $\text{SiO}_2$ , das aus Quarzsand oder Bergkristallen gewonnen wird. Durch Reduktion mit Kohle im Schmelzofen wird das sog. metallurgische Silizium hergestellt, das noch ca. 2% Verunreinigungen enthält. Durch Reduktion mit Salzsäure (HCl) ergibt sich Trichlorsilan ( $\text{SiHCl}_3$ ), eine Flüssigkeit, die bei  $31,8^\circ\text{C}$  siedet. Durch Destillation können Verunreinigungen ausgeschieden werden. Daraus werden hochreine Siliziumstäbe, die zunächst eine polykristalline Struktur aufweisen (s.u.). Das Silizium wird anschließend in einem Tiegel aufgeschmolzen.

Monokristallines Silizium wird im sog. Ziehverfahren hergestellt. Dabei wird aus der flüssigen und mit wenigen Fremdatomen Bor dotierten Schmelze ein Kristall gezogen, der dann in 0,4 mm dicke Scheiben zersägt wird. Im sog. Diffusionsofen wird bei ca.  $850^\circ\text{C}$  die Oberflächen der Scheiben mit Phosphor bedampft, welche drei bis vier tausendstel Millimeter in den Kristall eindringen. Anschließend wird Aluminium aufgedampft, auf der Rückseite als durchgängige Schicht, auf der dem Licht zugewandten Vorderseite als Kamm, der höchstens 10% der Fläche abdecken darf.

Nachteile: Hohe Temperaturen beim Schmelz- und Ziehvorgang, ca. 50% Verlust beim Zersägen der Blöcke.

Polykristallines Silizium wird gewonnen, indem die heiße Schmelze in Blöcke gegossen wird. Beim Erstarren bilden sich viele Kristalle. Nachteile: Kristallgrenzen setzen die Beweglichkeit der Leitungselektronen herab, daher geringerer Wirkungsgrad. Vorteil: Deutlich geringere Herstellungskosten.

Amorphes Silizium ist in sog. Dünnschichtzellen verarbeitet. Das Silizium wird auf eine Trägerschicht, z.B. Glas aufgedampft. Nachteil: Noch geringerer Wirkungsgrad und mechanische Empfindlichkeit. Vorteile: Nur 1/500 des Materialbedarfs, beliebige Größen und Formen herstellbar, geringste Herstellungskosten.

Die Herstellung von Solarzellen erfordert einen recht hohen Energieeinsatz und gilt vorläufig noch als relativ umweltbelastend. Die Frage, nach welcher Zeit sich eine Solarzelle energetisch und ökologisch "amortisiert" hängt sehr stark vom Typ, vom Einsatzort und der Nutzung ab und wird sehr unterschiedlich beantwortet. Bessere Verfahrenstechniken und höhere Energieausbeuten werden diesen Zeitraum erheblich drücken können.

## **Das Schulbiologiezentrum leiht zu Experimentierzwecken in der Schule ein 52-Watt-Solarmodul aus.**

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht sind in weiteren Arbeitshilfen beschrieben.

Ingo Mennerich, August 1994  
Leicht veränderte Neuauflage März 2005