

1. Aufgabenstellung

- 1.1 Messen Sie die Beleuchtungsstärke für vorgegebene Abstände zur Lichtquelle und an der Lichtquelle angelegte Spannungen.
- 1.2 Bestimmen Sie die Leistung verschieden geschalteter Solarzellen in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke.
- 1.3 Ermitteln Sie Arbeitspunkt, Füllfaktor und Wirkungsgrad der Solarzelle.

2. Theoretische Grundlagen

Stichworte:

Aufbau und Funktionsweise einer Solarzelle, innerer Photoeffekt, Luxmeter, Reihen- und Parallelschaltung von Spannungsquellen, Leistungsanpassung, Beleuchtungsstärke, Füllfaktor, Wirkungsgrad, Halbleiterdiode, U - I -Kennlinien
Dotierung, pn-Übergang, Fotozellen

Literatur:

- A. Goetzberger: Sonnenenergie: Photovoltaik
Physik und Technologie der Solarzelle
Teubner-Verlag 1997
- H. K. Köthe: Stromversorgung mit Solarzellen:
Methoden und Anlagen für die Energieaufbereitung
Kap. 2/3, Franzis-Verlag 1996
- U. Rindelhardt: Photovoltaische Stromversorgung
Kap. 3, Teubner-Verlag 2001
- H. Ladener: Solare Stromversorgung:
Grundlagen, Planung, Anwendung
Kap. 2, Ökobuch-Verlag 1995
- U. Muntwyler: Praxis mit Solarzellen:
Kennwerte, Schaltungen und Tips für Anwender
Franzis-Verlag 1992

2.1 Charakteristik der Leuchtquelle

Als Lichtquellen werden Orte bezeichnet, von denen elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Bereich (Licht) ausgeht. Dabei können Lichtquellen sehr verschiedenen Ursprungs sein und unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Neben natürlichem Licht und künstlichem Licht unterteilt man Lichtquellen nach ihrer räumlichen Ausdehnung in Punktlichtquellen oder diffuse Lichtquellen sowie nach ihrer jeweiligen Abstrahlcharakteristik in rundumstrahlend oder gerichtet strahlend.

Punktlichtquellen zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Ausdehnung sehr viel kleiner ist als die Entfernung zwischen der Lichtquelle und einem beleuchteten Objekt. Dadurch scheinen am Ort des Objekts die Lichtstrahlen von einem "Punkt" auszugehen. Die perfekte Punktlichtquelle besitzt die Ausdehnung 0 und ist in dieser Weise nur als Modell denkbar. Alle realen Lichtquellen können bestenfalls gute Näherungen zu einer Punktquelle darstellen. Von der Lichtquelle breitet sich das Licht strahlenförmig in alle Richtungen gleich aus (isotrope Lichtquelle). Physikalisch gesehen ist daher ein Stern eine gute Näherung einer Punktlichtquelle.

Lichtintensität bedeutet Energie pro Zeiteinheit und pro Fläche oder Leistung pro Fläche und ist somit ein Begriff für den Energiefluss. Demzufolge besitzt alles, was Energie transportiert, eine damit verbundene Intensität I . Betrachtet man Licht als Welle so ist die Intensität des Lichts proportional zum Amplitudenquadrat des elektrischen Feldes (Licht ist eine elektro-magnetische Welle).

Strahlt eine Punktquelle, beispielsweise eine Kerze, Energie in alle drei Raumrichtungen aus und gibt es keinen Energieverlust, dann fällt die Intensität mit dem Abstand r von der Quelle mit $1/r^2$ ab (siehe Abbildung 1). Dieses hat einen einfachen geometrischen Grund: Die abgestrahlte Gesamtleistung P der Lichtquelle ist konstant. Im Abstand r zu einer Punktquelle verteilt sich diese Leistung isotrop auf eine Kugeloberfläche der Größe $4\pi r^2$. Verdoppelt sich der Abstand r so vervierfacht sich die Fläche, auf die die Leistung aufgeteilt wird. Da die Intensität I gleich Leistung pro Fläche ist, ergibt sich:

$$I(r) = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (1)$$

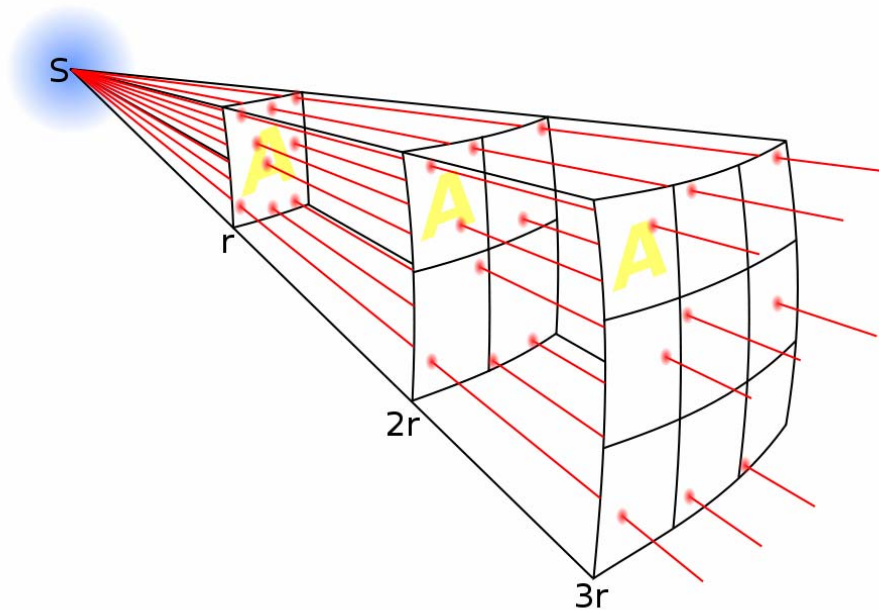


Abb. 1: Illustration des Abstandsgesetzes

2.2 Der pn-Übergang

Eine Solarzelle wandelt Lichtenergie in elektrische Energie um. Grundlage dafür bildet photovoltaische Effekt, ein Spezialfall des inneren photoelektrischen Effektes. Eine Solarzelle ist im Prinzip eine Halbleiterdiode und besitzt wie diese einen pn-Übergang. Das typische Halbleitermaterial ist das 4-wertige Silizium.

Ein pn-Übergang entsteht, wenn man eine p-dotierte Halbleiterschicht und eine n-dotierte Schicht in Kontakt bringt. Dabei bedeutet Dotieren das gezielte Einbringen von Fremdatomen in den Halbleiter. In Silizium erreicht man eine p-Dotierung, indem in den Siliziumkristall 3-wertige Atome (z.B. Bor oder Aluminium) eingebaut werden. Die Bor- bzw. Aluminiumatome besitzen ein Bindungselektron zu wenig, diese Art wird als Akzeptor bezeichnet. Das fehlende Bindungselektron wird auch Fehlstelle oder Loch genannt und oft wie ein einfach positiv geladenes Teilchen behandelt, obwohl es sich in Wirklichkeit um kein reales Teilchen handelt. Entsprechend haben die 5-wertigen Atome (als Donator bezeichnet, z. B. Phosphor) der n-dotierten Schicht ein Bindungselektron zu viel (Abbildung 2). Es folgt daraus, dass in einer n-dotierten Halbleiterschicht ein Elektronenüberschuss existiert und in einem p-Halbleiter ein Elektronenmangel bzw. Löcherüberschuss. Im n-Halbleiter sind demzufolge die Elektronen die Majoritätsladungsträger (Mehrheit) und die Löcher die Minoritätsladungsträger (Minderheit). Dies bedeutet allerdings nicht, dass ein n-Halbleiter elektrisch negativ und ein p-Halbleiter elektrisch positiv geladen ist,

sondern lediglich, dass sich im Gitterverband eines n-Halbleiters überschüssige, nicht gebundene Elektronen und im p-Halbleiter Löcher befinden.

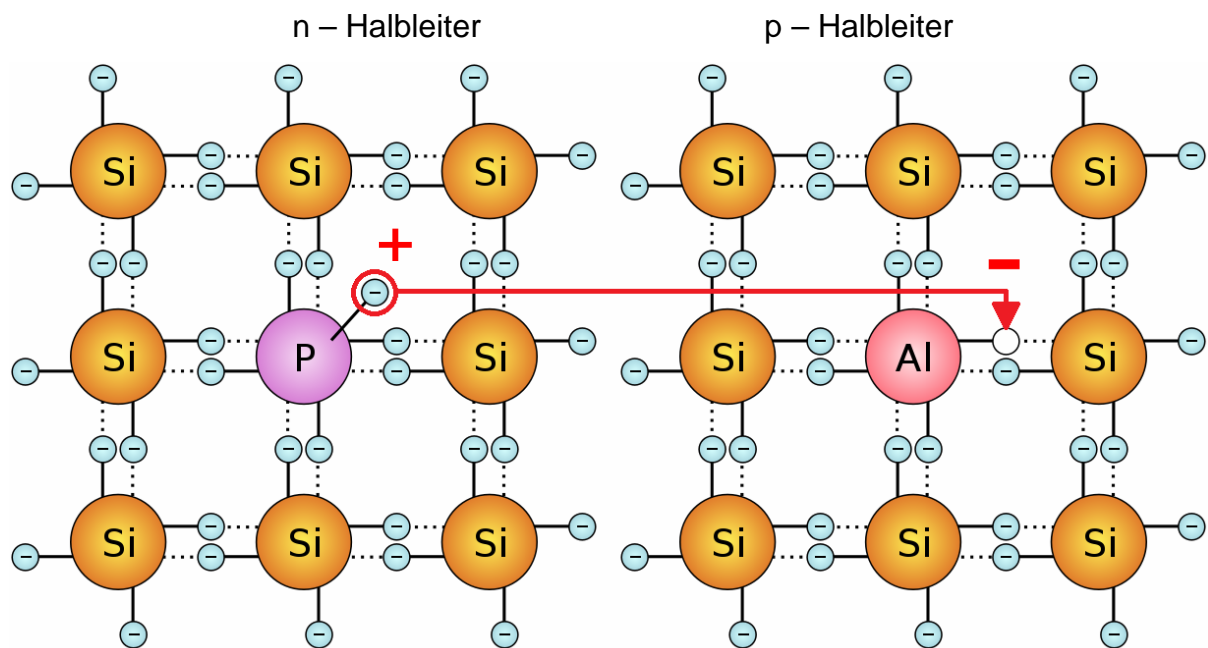


Abb. 2: Modellvorstellung eines pn-Übergangs. Nach der Diffusion der überschüssigen Elektronen des n-dotierten Bereichs in den p-Halbleiter entsteht ein inneres elektrisches Feld, die sog. Raumladungszone.

Bringt man eine p- und eine n-Schicht in Kontakt, diffundieren die freien Donatorelektronen vom n- in den p-Halbleiter und besetzen dort die Fehlstellen. Dadurch werden der p-Bereich negativ und der n-Bereich positiv geladen. An der Diffusion sind nur die Majoritätsladungsträger beteiligt. Der Übergangsbereich, in dem diese Aufladung erfolgt, heißt Raumladungszone. Innerhalb dieser Zone entsteht ein elektrisches Feld, welches einen Driftstrom (der Minoritätsladungsträger) zur Folge hat, welcher dem Diffusionsstrom entgegenwirkt. Der Diffusionsprozess kommt zum Erliegen, wenn der Driftstrom auf die Größe des Diffusionsstroms gewachsen ist. Typische Werte für die Spannung im resultierenden elektrischen Feld sind in Silizium 0,5 - 0,7 V.

Wird an einen pn-Übergang (Diode) eine Spannung angeschlossen, so ist das resultierende Verhalten abhängig von der Polung. Wird die n-Schicht an den Pluspol der Spannungsquelle angeschlossen, wird der Diffusionsstrom kleiner, die Raumladungszone wächst und ein Stromfluss wird weitgehend unterdrückt (Sperrrichtung der Diode). Ist die n-Schicht jedoch an den Minuspol angeschlossen und ist die äußere Spannung der Quelle groß genug, um das innere elektrische Feld der

Raumladungszone zu überwinden, so entsteht ein kontinuierlicher Stromfluss (Durchlassrichtung).

2.3 Die Solarzelle

In einem Halbleiter entstehen freie Ladungsträger (Elektronen und Löcher) durch Anregung gebundener Elektronen. Erhält ein Elektron genügend Energie, so kann es sich aus dem Atomgitter lösen und hinterlässt ein Loch. Solche Elektron-Loch-Paare können z. B. durch thermische Anregung erzeugt werden. Fällt Licht auf den Halbleiter, entstehen durch Absorption der Photonen zusätzliche Elektronen-Loch-Paare, die einen Photostrom I_{ph} hervorrufen.

In einem n-dotierten Halbleiter ist die Anzahl der optisch angeregten freien Elektronen sehr gering gegenüber der Zahl der freien Donatorelektronen (Majorität). Dagegen wächst die Anzahl der Löcher im n-Halbleiter (Minoritätsladungsträger), die ohne Anregung praktisch null ist, enorm. Analog dazu wächst die Elektronenzahl im p-Halbleiter. Die Folge ist, dass sich der Diffusionsstrom der Majoritätsladungsträger kaum ändert, aber der Driftstrom stark ansteigt (z. B. Abb.3: Änderung um I_{ph}).

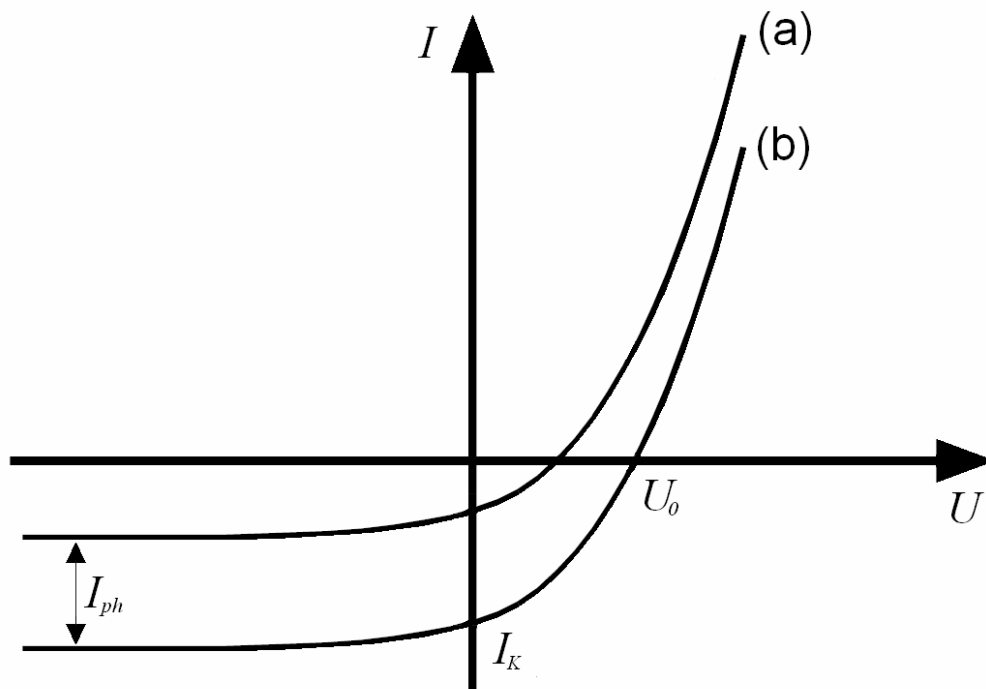


Abb: 3: Kennlinien im Vergleich: (a) unbeleuchtete Solarzelle, (b) beleuchtete Solarzelle

Die U - I -Kennlinie lässt sich mit Gl. (2) beschreiben.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{nk_B T}\right) - 1 \right] - I_{ph} \quad (2)$$

Wird der Driftstrom größer als der Diffusionsstrom, entsteht ein Gesamtstrom in Sperrrichtung ($I < 0$), der die Solarzelle in Flussrichtung polt ($U > 0$), da sich Elektronen im n-Gebiet und Löcher im p-Gebiet ansammeln. Der Bereich in dem die Solarzelle als Spannungsquelle wirkt liegt also im 4. Quadranten des Kennliniendiagramms. Die anderen Bereiche sind dann von Bedeutung, wenn an die Solarzelle eine äußere Spannung angelegt wird.

Die Solarzellenkennlinie wird in der Regel durch drei Größen charakterisiert (Abb. 4): Den Kurzschlussstrom I_K , die Leerlaufspannung U_0 und den Füllfaktor FF .

Der Kurzschlussstrom ist der maximale Strom der aus einer kurzgeschlossenen Solarzelle entnommen werden kann. Er entspricht also dem Photostrom I_{ph} und steigt wie dieser linear mit der Lichtleistung an. Die Leerlaufspannung ist die Spannung, die sich an der Diode aufbaut, wenn kein Strom entnommen wird ($I = 0$).

$$U_0 = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \propto \ln(I_{ph}) \quad \text{für } I_{ph} \gg I_0 \quad (3)$$

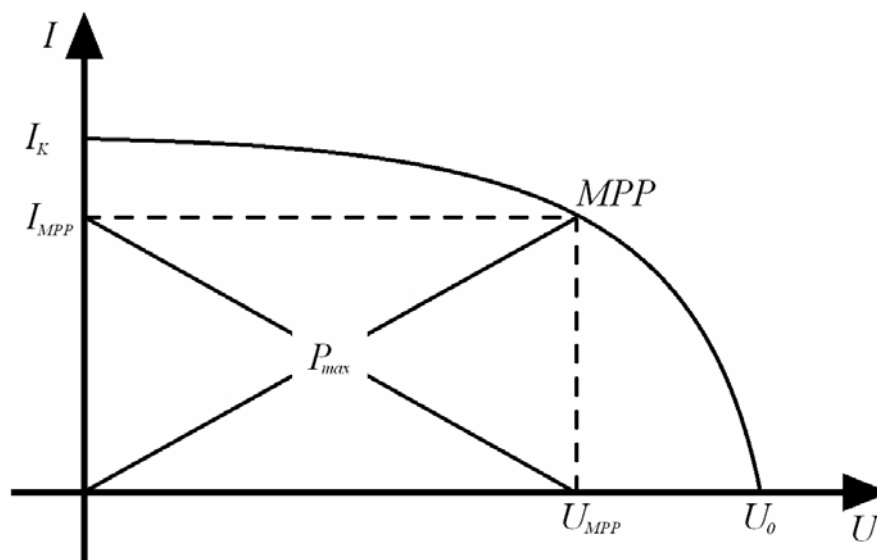


Abb. 4: Dargestellt ist der 4. Quadrant der Kennlinie einer Solarzelle. Die maximale Leistung kann der Zelle bei der Spannung U_{MPP} und dem zugehörigen Strom I_{MPP} ($MPP = \text{Maximum Power Point}$) entnommen werden.

Die Leerlaufspannung steigt logarithmisch mit dem Photostrom I_{ph} und somit mit der Lichtleistung an. Für die Anwendung ist jedoch weder der Fall $U = 0$ noch der Fall $I = 0$ interessant, da so der Zelle keine elektrische Leistung ($P_{el} = U \cdot I$) entnommen werden kann. Bei einem optimalen äußeren Verbraucher beträgt die entnommene Leistung:

$$P_{\max} = U_0 \cdot I_K \cdot FF \quad . \quad (4)$$

FF ist der sog. Füllfaktor, der gewöhnlicherweise zwischen 60 und 80% liegt. Mit Siliziumsolarzellen kann rein theoretisch bis zu 28% des einfallenden Sonnenlichts in elektrischen Strom umgewandelt werden. Tatsächlich werden im Labormaßstab heute Zellen mit Wirkungsgraden bis zu 24% realisiert. Solarzellen aus industrieller Fertigung erreichen Wirkungsgrade bis etwa 19%.

Der Wirkungsgrad η eines Systems beschreibt dabei das Verhältnis der abgegebenen Leistung zur zugeführten Leistung und ist ein typisches Gütemerkmal für eine Vielzahl von (energieumformenden) Maschinen, wie z. B. Motoren oder Generatoren. Im Fall der Solarzelle, wird Strahlung (elektromagnetische Energie) in elektrische Energie umgewandelt. Der Wirkungsgrad ist:

$$\eta = \frac{P_{zu}}{P_{ab}} = \frac{P_{el}}{P_L} \quad (5)$$

P_L ist die Strahlungsleistung des einfallenden Lichtes.

3. Versuchsdurchführung

Das im Versuch verwendete Solarmodul besteht aus zwei gleichartigen Solarzellen, wobei jede Solarzelle eigentlich auch ein Modul mit je 10 in Reihe geschalteten Solarzellen ist. Bei allen Messungen ist darauf zu achten, dass die Solarzelle senkrecht zum Lichteinfall steht, darum sollte die Solarzelle nach Möglichkeit nicht während einer Messreihe bewegt werden. Als Lichtquelle wird eine Halogenlampe benutzt. Diese benötigt nach dem Einschalten etwa 1 min Anlaufzeit. Die Strom- und Spannungsmessungen werden mit zwei Multimetern durchgeführt. Für die Messung der Beleuchtungsstärke steht ein Luxmeter zur Verfügung.

ACHTUNG!

Die Solarzelle ist vor zu großer Aufheizung durch die Lampe zu schützen. Deshalb muss die Lampe stets mindestens 50 cm von der Solarzelle entfernt sein. Die

Lampenspannung U_L darf die in der Versuchsanleitung angegebenen Werte nicht überschreiten.

3.1 Messen der Beleuchtungsstärke E

Das Luxmeter wird mittig vor die Lampe gebracht um eine optimale Ausleuchtung zu erzielen. Vor den eigentlichen Messungen ist eine Vergleichsmessung mit ausgeschalteter Lampe durchzuführen (Hintergrundhelligkeit). Die Beleuchtungsstärke ist für die Abstände $d = 50 \text{ cm}$, 60 cm , 70 cm , 80 cm , 90 cm , 100 cm bei einer Lampenspannung von $U_L = 200 \text{ V}$ zu messen. Bei einem Abstand von $d = 50 \text{ cm}$ ist der Einfluss der Lampenspannung, beginnend bei 80 V , in 20 V -Schritten bis 200 V aufzunehmen.

Die ermittelten Abhängigkeiten sind graphisch darzustellen. Welche $E(d)$ -Abhängigkeit besteht und warum (Stichwort Punktlichtquelle)?

3.2 U/I -Messung

Messen Sie Kurzschlussstrom I_K und Leerlaufspannung U_0

- (a) einer einzelnen Solarzelle,
- (b) einer Reihenschaltung von zwei Zellen,
- (c) einer Parallelschaltung von zwei Zellen

für $d = 50 \text{ cm}$ und Lampenspannungen U_L von 80 bis 180 V in 20 V -Schritten.

Berechnen sie für alle U_0/I_K -Wertepaare die Leistung P der Solarzelle(n). Zu zeichnen sind ein $I_K(E)$, ein $U_0(E)$ und ein $P(E)$ -Diagramm, wobei in jedem Diagramm die Kurven aller drei Schaltungen abgebildet werden sollen. Nutzen sie dazu die Messwerte der zuvor aufgenommenen Kurve $E(U_L)$.

3.3 Bestimmung des Arbeitspunktes

Stromstärke und Spannung werden in diesem Versuchsteil bei verschiedenen Lastwiderständen R gemessen. Für die Messung sind $d = 50 \text{ cm}$ und $U_L = 160 \text{ V}$ einzustellen. Es wird nur eines der zwei Solarmodule benutzt. Die Wertepaare sind für folgende Lastwiderstände $R = 0, 60 \Omega, 100 \Omega, 140 \Omega, 160 \Omega, 180 \Omega, 200 \Omega, 220 \Omega, 300 \Omega, 400 \Omega, 800 \Omega, 1400 \Omega, 2000 \Omega$ aufzunehmen. Die Abhängigkeiten

$U(I)$ und $P(R)$ sind graphisch darzustellen und in beiden Diagrammen der Arbeitspunkt einzuzeichnen. Berechnen Sie darüber hinaus den Füllfaktor FF .

Für die Ermittlung des Wirkungsgrades des Solarmoduls ist es notwendig zu wissen, wie groß die Strahlungsleistung pro Fläche p_L ($p_L * \text{Fläche} = P_L$) ist. Diese beträgt im vorliegenden Fall 80 Wm^{-2} .

4. Kontrollfragen

- 4.1 Welchen Verlauf hat U/I -Kennlinie einer Solarzelle? Welcher Unterschied besteht zu der Kennlinie einer Diode
- 4.2 Beschreiben Sie den Prozess der Ladungsträgerentstehung in einer Solarzelle.
- 4.3 Was passiert mit der Raumladungszone, wenn man eine unbeleuchtete Solarzelle an eine Spannungsquelle anschließt?
- 4.4 Welche Unterschiede gibt es zwischen Reihen- und Parallelschaltung von Spannungsquellen?
Wie wirkt sich die Schaltung auf den Gesamtstrom und die Gesamtspannung zweier Spannungsquellen aus?
- 4.5 Leiten sie die $1/r^2$ -Abhängigkeit der Strahlungsintensität einer Punktlichtquelle her.
- 4.6 Warum eignet sich Si für optische Anwendung?
- 4.7. Erläutern Sie den Welle-Teilchen-Dualismus von Licht!