Warum ist der Wirkungsgrad der Silizium-Solarzelle so niedrig?

Durch Reflexion, Abschattung und Absorption können ungefähr 26 % der Photonen nicht genutzt werden. Der Anteil nicht aufgehaltener Photonen heißt $\eta_{Gehäuse}$ und beträgt 74 % (WÜRFEL, 2010). In der Tabelle ist die auf ein Wellenlängenintervall bezogene Leistungsdichte der Sonnenstrahlung am Erdboden in W/m² dargestellt (COTAL et al., 2009).

λ in nm	ΔS_{Licht} in W/m²	E in eV	$\Delta S_{elektrisch}$ in W/m²
0–50	0	0,00	*0,000*
50–150	0	12,42	*0,000*
150–250	0	6,21	*0,000*
250–350	8	4,14	*0,833*
350–450	72	*3,11*	*10,001*
450–550	133	2,48	*23,092*
550–650	132	2,07	*27,503*
650–750	116	1,77	*28,197*
750–850	94	1,55	*26,114*
850–950	67	*1,38*	*20,939*
950–1050	61	1,24	*21,183*
1050–1150	39	1,13	*14,897*
1150–1250	40	1,04	*0,000*
1250–1350	31	0,96	*0,000*
1350–1450	12	*0,89*	*0,000*
1450–1550	18	0,83	*0,000*
1550–1650	23	0,78	*0,000*
1650–1750	19	*0,73*	*0,000*
1750–1850	5,3	0,69	*0,000*
1850–1950	0,2	0,65	*0,000*
1950–2050	2,7	0,62	*0,000*
S_{zu}	873,2		*172,759*
		Anteil an S_{zu}	*0,198*

Kasten 4. Arbeitsblatt zu Stunde 3 mit eingetragenen Schülerergebnissen (kursiv). Die Schüler konnten die quantitative Analyse mit wenigen individuellen gestuften Lernhilfen selbstständig durchführen.

KUHN, W. (1995). *Kuhn Physik 2.* Braunschweig: Westermann, 231.

LÉTAY, G. (2003). *Dissertation.* Freiburg: Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, 5.

MARTENS, K. (2010). *Kontexte zur Einführung von Photonen im Physikunterricht eines Kurses auf Erhöhtem Niveau.* Stade: Studienseminar für das Lehramt an Gymnasien.

MEADOWS, D. L. et. al. (1972). *Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit.* Reinbek: Rowohlt Verlag.

MÜLLER, B. (2011). Die Zukunft der Energie. Strom aus der Sonne. *Spektrum der Wissenschaft, 12,* 68–77.

Niedersächsisches Kultusministerium (2007). *Kerncurriculum für das Gymnasium, Schuljahrgänge 5–10, Naturwissenschaften.* Hannover.

Niedersächsisches Kultusministerium (2009). *Kerncurriculum für das Gymnasium – gymnasiale Oberstufe, Physik.* Hannover.

PHOTOVOLTAIK (2011). *http://de.wikipedia.org/wiki/Photovoltaik* (14.12.2011).

RÖSLER, K. (1981). *Schriftliche Prüfungsarbeit zur pädagogischen Prüfung für das Lehramt am Gymnasium »Regenerative Energiequellen«.* Freiburg/Breisgau: Seminar für Erziehung und Didaktik.

SCHWEDES, W. (2010). Inkohärente optische Strahlung. *http://www.f07.fh-koeln.de/imperia/md/content/aoe_files/displaytechnik/inkoh_rente_optische_strahlung.pdf* (29.01.2012).

SIEFER, G. (2008). *Dissertation.* Freiburg: Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, 6. *http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=1000553280&dok…* (29.01.2012).

SPECTROLAB® (2009). Photovoltaics. *http://www.spectrolab.com/space.htm* (14.12.2011).

StadeSolarStrom PV-Anlagen (2011). Mit PV-Analagen auf Stades Dächern hoch hinaus. *http://www.sunnyportal.com/Templates/PublicPage.aspx?page=ee326934-53ad-42ab-bf3c-bf132627a28b* (20.12.2011).

WILDESMITH, S. (2005). Is this truly a revolution in solar energy production? In: Alternative Energy, eMagazine. *http://www.altenergymag.com/emagazine.php? issue_number =05.06.01&article=pyron* (14.12.2011). Die Modulpreise lassen sich aus den Daten dieser Veröffentlichung rekonstruieren.

WÜRFEL, P. (2000). *Physik der Solarzellen.* Heidelberg: Spektrum akademischer Verlag.

Dr. HANS-OTTO CARMESIN, Harsefelder Straße 40, 21680 Stade, Hans-Otto.Carmesin@t-online.de, unterrichtet am Gymnasium Athenaeum in Stade Physik, Mathematik und Astronomie sowie gelegentlich Informatik. Er ist Fachleiter für Physik am Studienseminar in Stade, Privatdozent für Physik an der Universität in Bremen und wurde 2010 mit dem Klaus von Klitzing Preis als Lehrer des Jahres für naturwissenschaftliche Fächer ausgezeichnet.

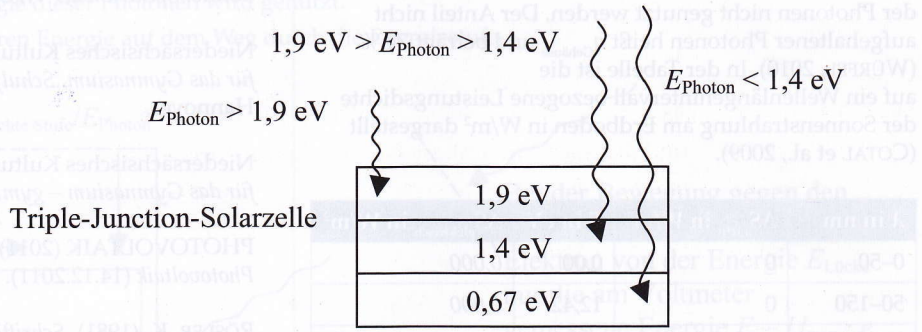
StR Dr. KLAUS MARTENS, Walle 10, 25797 Wöhrden, klausmartensjun@hotmail.com, unterrichtet am Gymnasium Halepaghen-Schule Buxtehude Physik und Chemie.

KARL RÖSLER, Holzstraße 3, 21680 Stade, verfasste während des Physik- und Sportstudiums in Tübingen seine erste Studienarbeit über die Speicherung von Wasserstoff in Metallen, wobei er die Firma Daimler Benz unterstützte. Anschließend verbrachte er seine Referendarzeit in Freiburg im Breisgau und schrieb dort mit Hilfe des Fraunhoferinstituts für solare Energiesysteme seine zweite Studienarbeit über eine Unterrichtseinheit zum Thema regenerative Energiequellen. Z. Zt. arbeitet er in Buxtehude als Gymnasiallehrer.

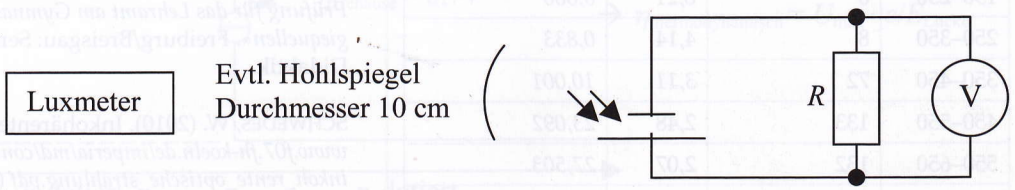
Wie kann man die Energieausbeute der Photonen steigern?

Ideen: Verschiedene Energiestufen für verschiedene Farben.
Jede Farbe entspricht einer Energiestufe.
Hohe Energiestufen liefern hohe Spannungen.

Info:
Die oberen Schichten sind für energiearme Photonen transparent.



Versuch:



Messung: U = 2,8 V (mit Lichtbündelung); U = 2,5 V (ohne Lichtbündelung)

Summe: U = 1,9 V + 1,4 V + 0,67 V = 3,97 V → $\eta_{thermodynamisch}$ = 2,8/3,97 = 71 %

Ergebnisse:
- Schülerfolien: gemessene Kennlinien, η = 27 % (ungebündelt); η = 30 % (192 Sonnen).
- In der 3-J-Zelle sind Energiestufen in Reihe geschaltet, denn es wurden 2,5 V > 1,9 V gemessen.

Literatur (COTAL et al., 2009): U = 2,5 V (1 Sonne); 2,7 V (10 Sonnen); 3,2 V (500 Sonnen); Rekord: η = 40,7 %

Vorteile der Reihenschaltung:
- Licht muss nicht spektral zerlegt werden
- hohe Spannung
- Miniaturisierung
- keine beweglichen Teile

Kasten 5. Tafelbild zu Stunde 4. Die Schüler konnten das Grundprinzip der 3-J-Zelle selbstständig entdecken, das Prinzip der Reihenschaltung experimentell bestätigen sowie als zweckmäßig einschätzen und den Wirkungsgrad eigenständig messen. In der Skizze zur Triple-Junction-Zelle (oben) ist das Licht wie in der Teilchenphysik durch Wellenlinien mit Pfeilspitze dargestellt. Kurzwelliges Licht ist entsprechend kurzwellig skizziert. In der Schaltskizze (unten) ist die Solarzelle durch das Schaltzeichen nach DIN EN 60617 symbolisiert.

Wie groß ist der rechnerische Wirkungsgrad der 3-J-Zelle?

Ideen: Analog Berechnung für die Si-Solarzelle.
Statt $E_{Lücke}$ = 1,1 eV sind die Energielücken 1,9 eV; 1,4 eV und 0,67 eV.
$\Delta S_{elektrisch} = \eta_{thermodynamisch} \cdot \eta_{Gehäuse} \cdot \eta_{Stufe} \cdot \Delta S_{Licht}$; $\eta_{Gehäuse}$ = 74 %

Lösungsweg: $\eta_{Stufe} = E_{Lücke} / E_{Photon}$
$\eta_{thermodynamisch} = U_{max} / (1{,}9\text{ V} + 1{,}4\text{ V} + 0{,}67\text{ V})$

Ergebnisse: Bei 192 Sonnen ist U = 2,8 V und $\eta_{thermodynamisch}$ = 2,8/3,97 = 0,71.
Mit Hilfe der Tabelle ergibt sich η = 39,0 %.
Ohne Bündelung ist $\eta_{thermodynamisch}$ = 2,5/3,97 = 0,63 und η = 0,39 · 0,63/0,71 = 0,346 = 34,6 %.

Literaturwert bei 500 Sonnen: η = 40,7 %.

Kasten 6. Tafelbild zu Stunde 5. Die Schüler konnten die 3-J-Zelle selbstständig modellieren und analysieren.

Wie nützlich ist die 3-J-Zelle?

Kriterien: Haltbarkeit, Energieertrag, Flächenbedarf, Kosten, Ertrag

Ergebnisse:

- Mit einem 3-J-Zellen-Modul der Fläche 10 m² kann man ein Elektroauto betreiben.
- Mit 0,47 % der Staatsfläche und 3-J-Zellen-Modulen kann man die in Deutschland benötigte elektrische Energie gewinnen.
- Mit 3 % der Staatsfläche und 3-J-Zellen-Modulen kann man die gesamte in Deutschland benötigte Energie gewinnen.
- Bei Si-Solarzellen sind die Anschaffungskosten noch höher als der Ertrag.
- Bei Si-Solarzellen mit $\eta = 17{,}5$ % wären die Anschaffungskosten gleich dem Ertrag.
- Bei 3-J-Zellen-Modulen mit $\eta = 20{,}6$ % wären die Anschaffungskosten gleich dem Ertrag. Sie haben aber $\eta = 40{,}7$ % und decken so problemlos die Anschaffungskosten.

Kasten 7. Tafelbild zu Stunde 6. Die Schüler konnten den Nutzen der 3-J-Zelle anhand grundlegender Basisdaten selbstständig analysieren.

Aufgabe 1: Golf Blue Motion: Elektroauto

Energiebedarf (GRÜNEAUTOS.COM, 2010): 18 kWh auf 100 km

Berechnen Sie die Fläche an 3-J-Zellen-Solarmodulen ($\eta = 0{,}4$), die man benötigt, um in Norddeutschland einen Golf Blue Motion bei 20000 km jährlicher Fahrleistung mit elektrischer Energie zu versorgen.

Aufgabe 2: Bedarf an elektrischer Energie in Deutschland

In Deutschland wurde im Jahr 2010 eine elektrische Energie von 608 Milliarden kWh benötigt.

a) Berechnen Sie die Fläche an 3-J-Zellen, die man benötigt, um in Norddeutschland diese Energie zu gewinnen.

b) Berechnen Sie den Anteil dieser Fläche an der Gesamtfläche Deutschlands von 357021 km².

Aufgabe 3: Bedarf an Energie in Deutschland

In Deutschland wurde im Jahr 2010 eine Energie von 3900 Milliarden kWh benötigt.

a) Berechnen Sie die Fläche an 3-J-Zellen, die man benötigt, um in Norddeutschland diese Energie zu gewinnen.

b) Berechnen Sie den Anteil dieser Fläche an der Gesamtfläche Deutschlands von 357021 km².

Aufgabe 4: Kosten

Ein Silizium-Solarmodul ($\eta = 0{,}4$) kostet etwa 220 Euro je Quadratmeter (PHOTOVOLTAIK, 2011).

a) Berechnen Sie den jährlichen Ertrag für Norddeutschland bei einem Verkaufspreis von 7 Cent je kWh an der Strombörse.

b) Eine Solaranlage läuft 20 Jahre. Berechnen Sie die Einnahmen je Quadratmeter für diesen Zeitraum und vergleichen Sie mit den Anschaffungskosten.

c) Berechnen Sie, bei welchem Wirkungsgrad der Anschaffungspreis gleich den Einnahmen ist.

d) Vergleichen Sie mit dem Preis der 3-J-Zellen-Module von 260 €/m² bis 517 €/m² (Black & Veath Corporation, 2008 WILDESMITH 2005).

Kasten 8. Arbeitsblatt zu Stunde 6. Die Schüler konnten die Aufgaben selbstständig bearbeiten.

Lösung zu 1: $P_{nutz} = 200 \cdot 18$ kWh/a = 3600 kWh/a $\rightarrow P_{zu} = P_{nutz}/0{,}4 = 9000$ kWh/a
$S = 900$ kWh/(a · m²) $\rightarrow A = S/P_{zu} = 9000/900$ m² = 10 m²

Lösung zu 2: $P_{zu} = P_{nutz}/0{,}4 = 608$ Mia kWh/a/0,4 = 1520 Mia kWh/a
$S = 900$ kWh/(a · m²) $\rightarrow A = S/P_{zu} = 1689$ km² $\rightarrow$ 0,47 %

Lösung zu 3: 3900/608 · 0,47 % = 3 %

Lösung zu 4 a und b: Ertrag = 900 kWh/a · 0,15 · 0,07 €/kWh · 20 a = 189 €

zu 4 c: 220 € = 900 kWh/a · η · 0,07 €/kWh · 20 a $\rightarrow \eta$ = 220 €/(900 kWh/a · 0,07 €/kWh · 20 a) = 17,5 %

zu 4 d: η = 260 €/(900 kWh/a · 0,07 €/kWh · 20 a) = 20,6 % < 40,7 %

Kasten 9. Schülerfolien zu Stunde 6. Die Schüler konnten die dargestellten Lösungen selbstständig entwickeln.

Untersuchen Sie, nach wie vielen Jahren sich ein Quadratmeter einer Fotovoltaikanlage bezahlt macht. Gehen Sie aus von einer Lebensdauer von 20 Jahren (jährliche Tilgung $t = 5$ %), einem Zinssatz von $z = 8$ %, einer jährlichen Energieeinstrahlung von $E = 900$ kWh sowie einem Erlös von $p = 0{,}2$ € je kWh bei Eigennutzung.

a) Betrachten Sie ein Siliziummodul mit $\eta = 12$ % und einem Kaufpreis von $K = 220$ € (PHOTOVOLTAIK, 2011).

b) Betrachten Sie ein 3-J-Zellen-Modul mit $\eta = 40$ % und einem Kaufpreis von $K = 517$ € (Black & Veatch Corporation 2008, WILDESMITH 2005).

Kasten 10. Arbeitsblatt zum Projekttag Energie im Athe-Sommer-Seminar. Die Schüler konnten die Aufgaben selbstständig bearbeiten.

Kurzlösung zu a)

Jährliche Ausgabe = jährliche Einnahme

(t+z) · K = p · η · E

t = p · h · E/K – z = 1,8 %

Tilgungsdauer in Jahren: 100 %/1,8 % = 56

Kurzlösung zu b)

Jährliche Ausgabe = jährliche Einnahme

t = p · η · E/K – z = 5,9 %

Tilgungsdauer in Jahren: 100 %/5,9 % = 17

Lösung zu b) mit EXCEL

Jahr	Tilgung	Ausgabe	Einnahme	Ist		Zinssatz	Z	0,08	
0	0	517,0		– 517,0		Tilgung	t	0,05	
1	25,85	67,2	72	– 486,4		Preis	P	0,2	Euro/kWh
2	25,85	64,8	72	– 453,3		eta	eta	0,4	
3	25,85	62,1	72	– 417,5		Ertrag	E	900	in kWh/a
4	25,85	59,3	72	– 378,9		Kaufpreis	K	517	in Euro
5	25,85	56,2	72	– 337,2					
6	25,85	52,8	72	– 292,2					
7	25,85	49,2	72	– 243,6					
8	25,85	45,3	72	– 191,1					
9	25,85	41,1	72	– 134,4					
10	25,85	36,6	72	– 73,1					
11	25,85	31,7	72	– 7,0					
12	25,85	26,4	72	64,5					

Kasten 11. Schülerfolien zum Projekttag Energie: Die Schüler konnten die dargestellten Lösungen selbstständig entwickeln.