



Co-funded by
the European Union

Lehrveranstaltung: Die Reise der Photovoltaik: Die Sonne einfangen

DiFC – Universität Palermo



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."





Inhalt

1. Die Reise der Photovoltaik: Die Sonne einfangen	3
Energieumwandlung in Solarzellen; von Photonen zu Elektronen; Physik photovoltaischer Systeme	3
2. Modul erkunden	5
Engagementphase	5
Brainstorming-Aktivitäten im Unterricht	6
Grundstufe	6
Physik der Solarenergieumwandlung	6
Von Photonen zu Elektronen: der P-N-Übergang	8
Schichtstruktur und Ladungssammlung	10
Vom Übergang zum Stromkreis: Strom und Spannung	11
Von der Theorie zu Alltagsgegenständen	11
Webbasierte Ressourcen	12
Fortgeschrittenes Niveau	12
Umgekehrtes Lernen:	15
3. Funktionsmodul	16
Grundstufe	16
Fortgeschrittenenstufe	17
Aktivitäten:	19
4. Referenzen	22





Allgemeines Thema des Lernpfads	Die Reise der Photovoltaik: Die Sonne einfangen
Spezifischer Name der Lerneinheit	Energieumwandlung in Solarzellen; von Photonen zu Elektronen; Physik photovoltaischer Systeme
Alter der Zielgruppe	17–19 Jahre
Voraussetzungen für die Lernenden	Grundkenntnisse in Physik (elektromagnetische Wellen, Energie, elektrischer Strom und Spannung), Chemie (Atomstruktur, Elektronen, chemische Bindungen) und einführende Konzepte der Elektrizität und Energieumwandlung.
Beschreibung der Lerneinheit	Die Einheit führt Schüler und Lehrer durch einen interdisziplinären Lehrpfad, der Physik, Chemie und Technik miteinander verbindet, um zu verstehen, wie Sonnenenergie durch Photovoltaikzellen eingefangen und in elektrische Energie umgewandelt wird. Die Schüler untersuchen den Weg der Photonen vom Sonnenlicht bis zur Erzeugung von elektrischem Strom und analysieren dabei den Schichtaufbau von Solarzellen (P-N-Übergang, Halbleiter), den photovoltaischen Effekt und die Mechanismen des Elektronenflusses. Der Einsatz digitaler und AR-Tools soll sonst unsichtbare Prozesse sichtbar machen (Photonenabsorption, Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren, elektrisches Feld im Übergang, Stromfluss) und physikalische Prinzipien klar und schrittweise mit technologischen Anwendungen für eine nachhaltige Energieerzeugung verknüpfen.





Thema: Beteiligte Parteien	Physik (Optik, Elektromagnetismus), Chemie (Halbleitermaterialien), Technologie us (Photovoltaik), Nachhaltigkeit (erneuerbare Energien)
Stichworte	Solarenergie; Photovoltaikzelle; Photonen; Elektronen; P-N-Übergang; Halbleiter; Energieumwandlung; Elektrischer Strom; Erneuerbare Energien; AR; Szenenbasiertes Lernen
Wichtige Qualifikationen, Fähigkeiten und Kenntnisse, die erworben werden können	• Argumentation und Problemlösung bei Energieumwandlungsprozessen • Design Thinking angewendet auf die sequenzielle Visualisierung physikalischer Phänomene • Praktisches Wissen: Photovoltaik-Effekt, Halbleiterphysik, Aufbau von Solarzellen, elektrische Schaltungen • Digitale/AR-Kenntnisse: 3D-Visualisierung von Prozessen im atomaren Maßstab, interaktive Diagramme, Szenennavigation
Verwendete Ressourcen und didaktische Hilfsmittel	AR-Plattformen (z. B. Delightex Studio – Spaces, Marker), zuverlässige Webressourcen und Lehrvideos zu Solarenergie und Photovoltaik, wissenschaftliche Artikel und Datenbanken; Diagramme und 3D-Modelle (Solarzellenschichten, P-N-Übergang, Elektronenfluss, Photovoltaikanlagen) und Textüberlagerungen für wichtige Daten.
Bewertungskriterien und Bewertung	Bewertung von Wissen (Ablauf von Photon zu Elektron zu Strom), Fähigkeiten (Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Photonenabsorption und Stromerzeugung) und Kompetenzen (bewusste Nutzung von AR-Tools, interdisziplinäre Integration zwischen Physik und nachhaltiger Energietechnologie).



1. Die Photovoltaik-Reise: Die Sonne einfangen

Energieumwandlung in Solarzellen; von Photonen zu Elektronen; Physik photovoltaischer Systeme

Die Umwandlung von Sonnenenergie entsteht aus der Schnittmenge von Quantenphysik und Werkstofftechnik. Sonnenlicht, das aus Photonen besteht, die diskrete Energiepakete transportieren, trifft auf die Oberfläche einer Photovoltaikzelle und interagiert mit Halbleitermaterialien.

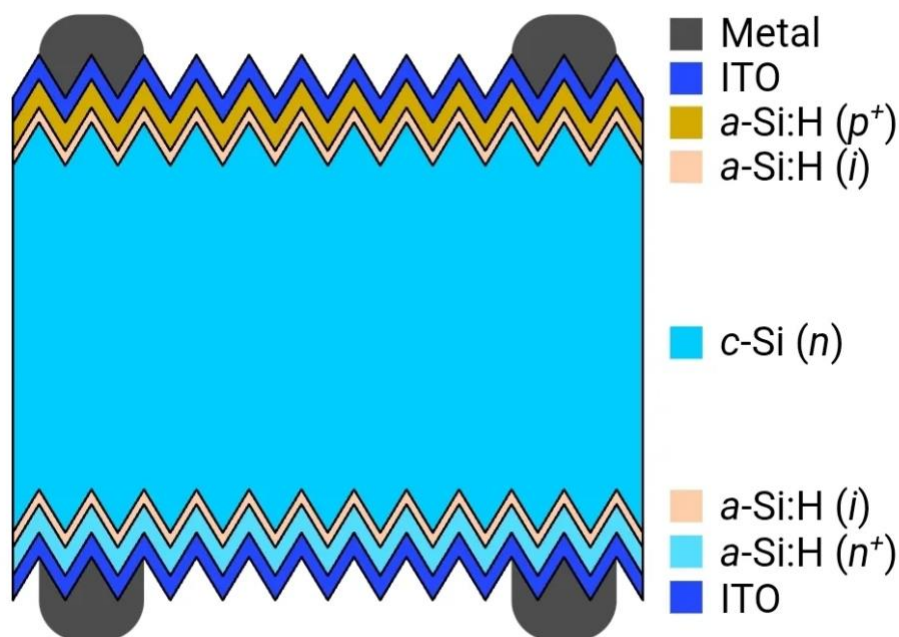


Abbildung 1. Querschnittsstruktur einer Silizium-Heterojunction-Solarzelle mit geschichteter Architektur. Das n-Typ-kristalline Silizium (c-Si) bildet die Hauptabsorber-Schicht, mit dünnen Passivierungsschichten aus amorphem Silizium (a-Si:H) und transparenten ITO-Kontakten. (Quelle: Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0)

Hier werden Photonen absorbiert und erzeugen Elektron-Loch-Paare, die sich unter dem Einfluss eines internen elektrischen Feldes trennen und durch einen externen Stromkreis fließen. Die Nutzung von Sonnenenergie bedeutet nicht, passiv Wärme zu sammeln, sondern Licht durch präzise konstruierte Strukturen im atomaren Maßstab aktiv in nutzbaren elektrischen Strom umzuwandeln.

Die Effizienz der Energieumwandlung hängt von den Materialeigenschaften und der Architektur der Solarzelle ab. Silizium, der am häufigsten verwendete Halbleiter, wird mit Verunreinigungen „dotiert“, um zwei unterschiedliche Bereiche zu schaffen: eine N-Schicht (elektronenreich) und eine P-Schicht (lochreich). An der Grenzfläche zwischen diesen Schichten – dem P-N-Übergang – bildet sich auf natürliche Weise ein elektrisches Feld. Dieses Feld ist von entscheidender Bedeutung: Es liefert die





treibende Kraft, die die durch Licht erzeugten Elektronen und Löcher trennt, ihre Rekombination verhindert und sicherstellt, dass die Ladungsträger in eine bestimmte Richtung fließen, um Strom zu erzeugen.

Der photovoltaische Effekt setzt ein, wenn ein Photon mit ausreichender Energie auf das Halbleitermaterial trifft. Wenn die Energie des Photons die Bandlücke – die Mindestenergie, die erforderlich ist, um ein Elektron aus seiner atomaren Bindung zu befreien – überschreitet, wird das Elektron vom Valenzband in das Leitungsband befördert und hinterlässt ein positiv geladenes „Loch“. Dieses Elektron-Loch-Paar stellt die grundlegende Einheit der Solarenergieumwandlung dar: Lichtenergie, die auf atomarer Ebene in Ladungstrennung umgewandelt wird.

Der P-N-Übergang fungiert als Einwegtor für Ladungsträger. Das eingebaute elektrische Feld treibt Elektronen in Richtung des N-Typs und Löcher in Richtung des P-Typs. Wenn metallische Kontakte an beiden Seiten angebracht und über einen externen Stromkreis verbunden sind, fließen Elektronen von der N-Seite durch den Stromkreis zur P-Seite und erzeugen so elektrischen Strom. Die von einer einzelnen Siliziumzelle erzeugte Spannung beträgt etwa 0,5 bis 0,6 Volt. Um höhere Spannungen zu erreichen, die für praktische Anwendungen geeignet sind, werden mehrere Zellen in Reihe geschaltet. Die Energieausbeute und der Wirkungsgrad werden von mehreren Faktoren beeinflusst: der Intensität und dem Spektrum des einfallenden Lichts, der Qualität der Halbleitermaterialien, der Temperatur der Zelle und der Gestaltung der Antireflexbeschichtungen, die die Photonenabsorption maximieren.

Moderne Silizium-Solarzellen erreichen Wirkungsgrade von 15–22 %, was bedeutet, dass nur ein Bruchteil der einfallenden Sonnenenergie in Strom umgewandelt wird. Fortschrittliche Materialien wie Perowskite und Mehrfachzellen erhöhen den Wirkungsgrad, aber Kompromisse in Bezug auf Kosten, Stabilität und Komplexität der Herstellung sind nach wie vor aktive Forschungsgebiete.

Aus pädagogischer Sicht ist es entscheidend, die Abfolge der Ereignisse zu verdeutlichen: (1) Photonen treffen auf die Zelloberfläche und dringen in sie ein; (2) Photonen mit ausreichender Energie erzeugen Elektron-Loch-Paare im Halbleiter; (3) das elektrische Feld am P-N-Übergang trennt diese Ladungsträger; (4) Elektronen fließen durch einen externen Stromkreis und erzeugen elektrischen Strom; (5) Energie wird an eine Last (Lampe, Batterie, Netz) abgegeben. Die Darstellung dieser Schritte in einer geordneten Reihenfolge hilft den Schülern, Phänomene auf Quantenebene mit der makroskopischen Energieerzeugung in Verbindung zu bringen.

Der gezielte Einsatz von digitalen und Augmented-Reality-Tools ermöglicht die Visualisierung sonst unsichtbarer Prozesse, wie z. B. die Photonenabsorption auf atomarer Ebene, die Bildung der Verarmungszone im P-N-Übergang und den gerichteten Elektronenfluss durch den Stromkreis. Die Visualisierung Szene für Szene erleichtert das Verständnis der Zusammenhänge zwischen mikroskopischer Physik und großtechnischen Systemen für erneuerbare Energien.

Lassen Sie uns gemeinsam darüber nachdenken.

Warum können wir ohne Halbleiter keine elektrische Energie aus Sonnenlicht gewinnen? Wie wandelt der P-N-Übergang die zufällige Photonenabsorption in einen gerichteten Elektronenfluss um? Welche Rolle spielt die Bandlückenenergie bei der Bestimmung, welche Wellenlängen des Lichts in Elektrizität umgewandelt werden können? Diese Fragen helfen dabei, beobachtbare Solarenergiephänomene mit den zugrunde liegenden Quanten- und elektrischen Mechanismen in Verbindung zu bringen.





2. Modul erkunden

Engagementphase

Leitfrage: Können wir ohne bewegliche Teile Strom aus Sonnenlicht gewinnen?

Die Lektion beginnt mit einer kurzen Demonstration: einem kleinen Solarpanel, das an eine LED oder einen Taschenrechner angeschlossen ist. Wenn das Gerät dem Licht ausgesetzt ist, funktioniert es; wenn es abgedeckt wird, funktioniert es nicht mehr. Der Zweck besteht nicht nur darin, zu zeigen, dass „Solarpanels funktionieren“, sondern auch darin, die Idee vorzustellen, dass Lichtenergie durch Festkörperphysik direkt in elektrische Energie umgewandelt werden kann – ohne Turbinen, ohne Verbrennung, ohne mechanische Bewegung.

Anregungen für den Einstieg (Videos und kurze Ressourcen)

Wie funktionieren Solarzellen? TED-Ed: eine anschauliche animierte Übersicht über Photovoltaikzellen, den P-N-Übergang und den Elektronenfluss.

<https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkt7CpY>

Grundlagen der Solarenergie – US-Energieministerium: eine leicht verständliche Einführung in die Photovoltaik-Technologie und erneuerbare Energiesysteme.

<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>

Photoeffekt: Photoeffekt: Interaktive Erkundung der Wechselwirkung von Photonen mit Metalloberflächen, um Elektronen auszustoßen, wodurch die Quanteneigenschaften von Licht demonstriert werden.

<https://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric>

Auftaktaktivität (5–10 Min.).

Eine kurze Demonstration oder ein Videoclip, in dem eine Solarzelle einen kleinen Motor antreibt oder eine Batterie auflädt, regt die Schüler dazu an, zu fragen: „*Wie wird Licht zu Elektrizität, ohne dass Drähte bewegt werden oder Chemikalien reagieren?*“

Das Ziel ist es, hervorzuheben, dass **die Energieumwandlung ein Quantenprozess ist**, der auf atomarer Ebene innerhalb von Halbleitermaterialien stattfindet, und keine makroskopische mechanische oder thermische Umwandlung.

Empfohlenes Video: *Wie Sonnenkollektoren funktionieren* (SciShow)

https://www.youtube.com/watch?v=L_q6LRgKpTw





Brainstorming Aktivitäten im Unterricht

Leitfrage: Ohne Licht gibt es keinen photovoltaischen Strom: Was passiert mit Photonen, wenn sie in die Solarzelle eintreten, und wie erzeugen sie ein elektrisches Signal, das Geräte mit Strom versorgen kann?

Anregende Fragen

Was entscheidet darüber, ob ein Photon in einer Solarzelle Strom erzeugen kann?

Die Energie des Photons muss die Bandlücke des Halbleiters überschreiten; die Bandlücke von Silizium ($\sim 1,1$ eV) bedeutet, dass nur Photonen mit Wellenlängen von weniger als ~ 1100 nm (sichtbares und nahes Infrarotlicht) Elektronen freisetzen und Strom erzeugen können.

Warum können wir nicht das gesamte Sonnenlicht nutzen, das auf ein Solarpanel trifft?

Weil Photonen mit einer Energie unterhalb der Bandlücke ohne Erzeugung von Ladungsträgern hindurchgehen, während Photonen mit einer viel höheren Energie () überschüssige Energie als Wärme verschwenden. Aus diesem Grund haben Siliziumzellen mit einer einzigen Verbindung einen theoretischen maximalen Wirkungsgrad von ~ 33 % (Shockley-Queisser-Grenze).

Speichert die Solarzelle Strom wie eine Batterie?

Nein, die Solarzelle erzeugt nur bei Lichteinfall Strom. Der photovoltaische Effekt erzeugt eine Ladungstrennung und einen Ladungsfluss in Echtzeit. Um Energie zu speichern, ist eine externe Batterie oder ein Kondensator erforderlich.

Warum funktionieren einige Solarmodule bei direkter Sonneneinstrahlung besser als im Schatten?

Weil die Lichtintensität (Photonenfluss) einen direkten Einfluss auf die Anzahl der erzeugten Elektron-Loch-Paare hat. Eine geringere Intensität bedeutet weniger Photonen, weniger Ladungsträger und eine geringere Stromabgabe. Die Spannung bleibt relativ stabil, aber der Strom fällt deutlich ab.

Mikroaufgabe.

Beschriften Sie die Schichten einer Solarzelle (Antireflexbeschichtung, N-Typ-Silizium, P-N-Übergang, P-Typ-Silizium, Rückkontakt) mithilfe eines Arbeitsblatts oder eines interaktiven Diagramms.

Empfohlene Ressource: **Diagramm zum Aufbau einer Solarzelle** – Encyclopædia Britannica

<https://www.britannica.com/technology/solar-cell>

Grundstufe

Physik der Umwandlung von Sonnenenergie

Licht, Absorption und Photonenenergie

Die Umwandlung von Sonnenenergie beginnt, wenn Photonen aus dem Sonnenlicht auf die Oberfläche einer Photovoltaikzelle treffen. Sonnenlicht ist eine Mischung aus elektromagnetischen Wellen, die ultraviolette, sichtbare und infrarote Wellenlängen umfassen. Jedes Photon trägt ein diskretes



Energiepaket, das durch seine Wellenlänge bestimmt wird: Kürzere Wellenlängen (blaues Licht) tragen mehr Energie als längere Wellenlängen (rotes Licht).

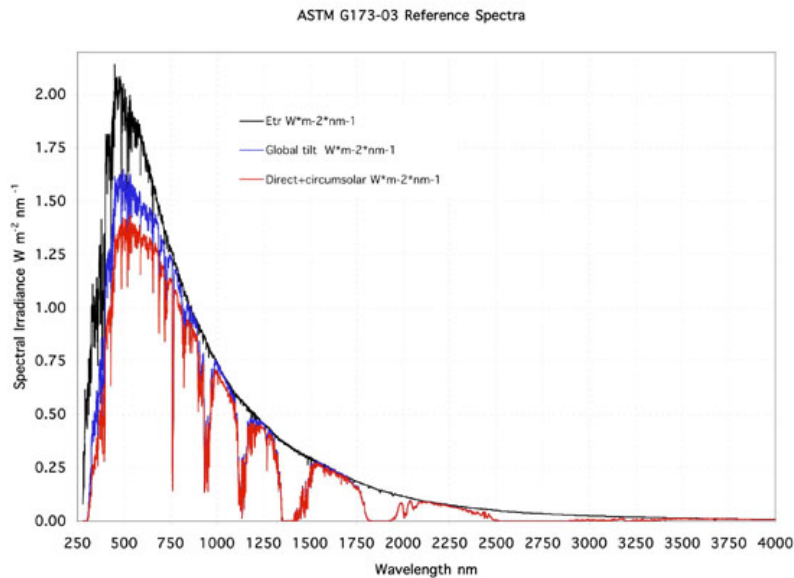


Abbildung 2. Spektrale Sonneneinstrahlung (ASTM G173-03 Referenzspektren) mit der Verteilung der Photonenenergie über die Wellenlängen. Silizium-Solarzellen mit einer Bandlücke von $\sim 1,1$ eV (entspricht einer Wellenlänge von ~ 1100 nm) können nur Photonen im sichtbaren und nahen Infrarotbereich umwandeln. (Quelle: NREL)

Wenn ein Photon in ein Halbleitermaterial wie Silizium eintritt, kann es absorbiert, reflektiert oder durchgelassen werden.

Die Absorption ist entscheidend: Wenn die Energie des Photons der Bandlückenenergie des Materials entspricht oder diese übersteigt (die Mindestenergie, die erforderlich ist, um ein Elektron aus seiner atomaren Bindung zu befreien), wird das Elektron vom Valenzband in das Leitungsband befördert.



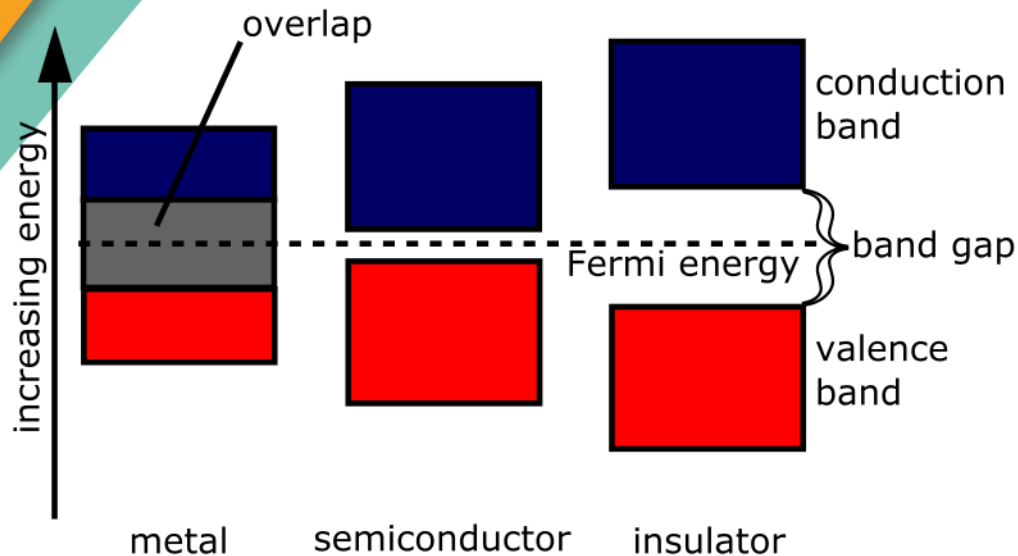


Abbildung 3. Vergleich der Energiebandstrukturen in Metallen, Halbleitern und Isolatoren. In Halbleitern wie Silizium ist die Bandlücke ($E_g \approx 1,1 \text{ eV}$) klein genug, dass Photonen Elektronen aus dem Valenzband (rot) anregen können, um in das Leitungsband (blau) zu übergehen, wodurch eine photovoltaische Energieumwandlung ermöglicht wird. (Quelle: Wikimedia Commons, Public Domain)

Dadurch entsteht ein **Elektron-Loch-Paar** – eine bewegliche negative Ladung (Elektron) und eine entsprechende positive Lücke (Loch).

Was bestimmt, ob ein Photon absorbiert wird oder durchgeht?

Die Beziehung zwischen der Photonenenergie und der Bandlücke des Halbleiters. Die Bandlücke von Silizium beträgt $\sim 1,1 \text{ eV}$, was Infrarotlicht bei $\sim 1100 \text{ nm}$ entspricht. Photonen mit weniger Energie werden durchgelassen; Photonen mit viel mehr Energie erzeugen Wärme, nachdem sie Elektronen freigesetzt haben.

Von Photonen zu Elektronen: der P-N-Übergang

Das absorbierte Photon erzeugt ein Elektron-Loch-Paar, aber ohne ein internes elektrisches Feld würden sich diese Ladungen schnell wieder verbinden und Energie in Form von Wärme statt Elektrizität freisetzen. Hier kommt der **P-N-Übergang** ins Spiel.

Silizium wird mit Verunreinigungen „dotiert“, um zwei unterschiedliche Bereiche zu schaffen:

- **N-Typ-Silizium:** dotiert mit Phosphor (zusätzliche Elektronen $\rightarrow$ negative Ladungsträger)
- **Silizium vom P-Typ:** dotiert mit Bor (Elektronenmangel $\rightarrow$ positive „Löcher“)

An der Grenze zwischen dem N-Typ- und dem P-Typ-Bereich **bildet sich auf natürliche Weise eine Verarmungszone**. Elektronen von der N-Seite diffundieren hinüber, um die Löcher auf der P-Seite zu füllen, wobei sie positiv geladene Atome auf der N-Seite und negativ geladene Atome auf der P-Seite zurücklassen. Diese Ladungstrennung erzeugt ein **eingebautes elektrisches Feld**, das von N nach P zeigt.



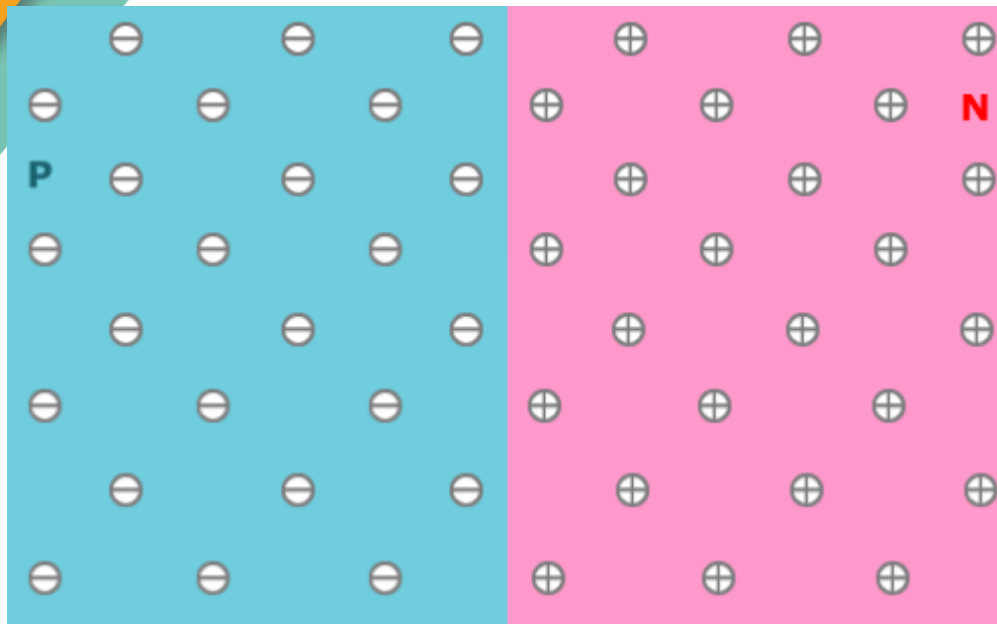


Abbildung 4. Schematische Darstellung eines P-N-Übergangs vor dem Gleichgewicht. Der P-Typ-Bereich (links, cyan) enthält überschüssige Löcher (positive Ladungsträger), während der N-Typ-Bereich (rechts, rosa) überschüssige Elektronen (negative Ladungsträger) enthält. Wenn die beiden Bereiche miteinander in Kontakt gebracht werden, diffundieren die Ladungsträger über den Übergang. (Quelle: PVEducation.org, für Bildungszwecke)

Wenn ein Photon in der Nähe des Übergangs ein Elektron-Loch-Paar erzeugt, treibt das elektrische Feld das Elektron zur N-Seite und das Loch zur P-Seite. **Diese Trennung verhindert eine Rekombination** und treibt die Ladungsträger in entgegengesetzte Richtungen, wodurch eine Spannungsdifferenz zwischen den beiden Seiten der Zelle entsteht.

Warum trennen sich Elektron-Loch-Paare, anstatt sich sofort wieder zu verbinden?

Weil das elektrische Feld am P-N-Übergang eine treibende Kraft erzeugt, die stärker ist als die zufällige thermische Bewegung, und Elektronen und Löcher voneinander weggleitet, bevor sie sich rekombinieren können.



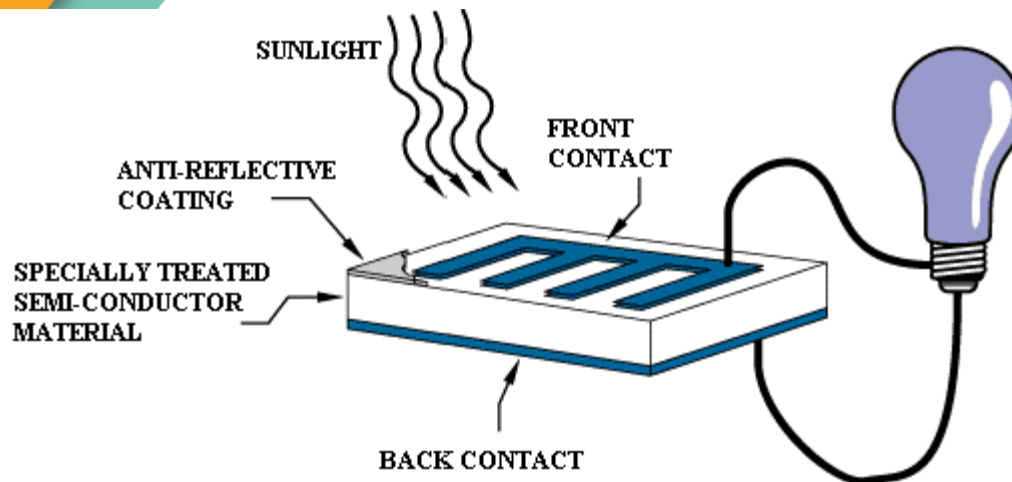


Abbildung 5. Vollständiger Betrieb einer Solarzelle, der die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom zeigt. Photonen treffen durch die Antireflexbeschichtung auf das Halbleitermaterial und erzeugen Elektron-Loch-Paare, die durch das interne elektrische Feld getrennt werden. Die Elektronen fließen durch den externen Stromkreis (dargestellt durch die Glühbirne), bevor sie zurückkehren, um sich wieder zu verbinden, wodurch nutzbare elektrische Energie entsteht. (Quelle: Wikimedia Commons, Public Domain)

Schichtstruktur und Ladungssammlung

Eine typische Silizium-Solarzelle verfügt über mehrere Schichten, die für die Lichtabsorption und Ladungssammlung optimiert sind:

- Antireflexbeschichtung (oben): reduziert die Reflexion und maximiert den Eintritt von Photonen
- N-Typ-Silizium (dünne Schicht): elektronenreicher Bereich, in dem Elektronen gesammelt werden
- P-N-Übergang (Schnittstelle): Hier trennt das elektrische Feld die Ladungsträger
- P-Typ-Silizium (dickere Basis): Bereich, in dem Löcher gesammelt werden
- Metallkontakte (oben und unten): leiten Elektronen zu einem externen Stromkreis weiter

Der vordere Kontakt ist als Gittermuster gestaltet, um die Verschattung zu minimieren und gleichzeitig Strom zu sammeln. Der hintere Kontakt bedeckt die gesamte Rückseite, um eine maximale Leitfähigkeit zu gewährleisten.

Warum ist die N-Schicht dünner als die P-Schicht?

Da die meisten Photonen nahe der Oberfläche absorbiert werden, sorgt eine dünne N-Schicht dafür, dass die photogenerierten Ladungsträger nahe am elektrischen Feld des Übergangs bleiben, um eine effiziente Trennung zu gewährleisten, während die dickere P-Schicht Photonen mit längerer Wellenlänge tiefer im Material absorbiert.





Vom Übergang zum Stromkreis: Strom und Spannung

Wenn Sonnenlicht auf die Zelle trifft, erzeugt die kontinuierliche Absorption von Photonen eine stetige Versorgung mit Elektron-Loch-Paaren. Das elektrische Feld der Verbindungsstelle trennt diese Ladungen kontinuierlich und treibt die Elektronen zur N-Seite und die Löcher zur P-Seite.

Wenn Metallkontakte angebracht und über einen externen Stromkreis verbunden sind, **fließen Elektronen von der N-Seite durch den Stromkreis (und versorgen eine Last mit Strom) und kehren zur P-Seite zurück**, um sich mit Löchern wieder zu verbinden. Dieser Fluss bildet **den photovoltaischen Strom**.

Die von einer einzelnen Siliziumzelle erzeugte Spannung beträgt etwa **0,5 bis 0,6 Volt**, abhängig von der Bandlückenenergie und den Eigenschaften des Übergangs. Der Strom hängt von der Lichtintensität und der Zellfläche ab: mehr Photonen → mehr Elektron-Loch-Paare → höherer Strom.

Wenn eine einzelne Zelle nur ~0,5 V erzeugt, wie erzeugen Solarmodule dann nutzbare Spannungen? Mehrere Zellen werden in **Reihe** geschaltet (positiver Pol der einen mit negativem Pol der nächsten), um die Spannungen zu addieren. Ein typisches Modul enthält 60–72 in Reihe geschaltete Zellen, die unter Standardbedingungen 30–40 Volt erzeugen.

Von der Theorie zu Alltagsgegenständen

Die gleichen Prinzipien, die in Solarzellen gelten, finden sich auch in folgenden Produkten wieder:

- **Solarrechnern:** kleine Zellen, die Milliwatt an Strom für Geräte mit geringem Energieverbrauch liefern
- **Solarmodule auf Dächern:** Reihen von in Reihe geschalteten Zellen, die Kilowatt für Haushalte erzeugen
- **Solarparks:** Großanlagen, die Megawatt für das Stromnetz produzieren
- **Weltraumsatelliten:** hocheffiziente Mehrfachzellen, die Raumfahrzeuge mit Strom versorgen, bei denen Zuverlässigkeit entscheidend ist

Indem wir die Quantenphysik aus dem Abstrakten herausholen, helfen wir den Schülern nicht nur zu verstehen, *wie* Photovoltaik funktioniert, sondern auch, *warum* Designentscheidungen (Auswahl der Bandlücke, Antireflexbeschichtungen, Zelldicke) einen direkten Einfluss auf die Energieeffizienz in der Praxis haben.

Lassen Sie uns gemeinsam darüber nachdenken.

Die Umwandlung von Sonnenlicht in Elektrizität erfordert eine präzise Steuerung auf atomarer Ebene. Wenn der P-N-Übergang für die Ladungstrennung unerlässlich ist, warum können wir dann nicht jeden beliebigen Halbleiter verwenden? Welche Rolle spielt die Dotierung bei der Erzeugung des internen elektrischen Feldes? Wie beeinflussen Temperatur, Verschattung und Materialqualität die Effizienz der Energieumwandlung?





Webbasierte Ressourcen

Wie funktionieren Solarzellen? – TED-Ed

<https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkt7CpY>

Animierte Erklärung von Photovoltaikzellen und Elektronenfluss.

Grundlagen der Solar-Photovoltaik-Technologie – US-Energieministerium

<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>

Überblick über die PV-Technologie und die Umwandlung von Sonnenenergie.

PhET – Photoelektrischer Effekt

<https://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric>

Interaktive Erkundung der Photonenenergie und des Elektronenausstoßes.

Fortgeschrittenes Niveau

Quantenmechanik der photovoltaischen Umwandlung

Der photovoltaische Effekt ist im Grunde ein Quantenphänomen. Wenn ein Photon von einem Siliziumatom absorbiert wird, muss seine Energie die **Bandlückenenergie** ($E_g \approx 1,1 \text{ eV}$ für kristallines Silizium) überwinden, um ein Elektron vom Valenzband zum Leitungsband zu befördern. Dieser Prozess erzeugt ein **Elektron-Loch-Paar** mit einer Wahrscheinlichkeit, die durch den Absorptionskoeffizienten des Materials und die Photonenenergie bestimmt wird.

Energieverluste treten in mehreren Phasen auf:

- **Photonen mit $E < E_g$** passieren, ohne Ladungsträger zu erzeugen (Transmissionsverluste).
- **Photonen mit $E \gg E_g$** erzeugen „heiße“ Ladungsträger, die überschüssige Energie schnell als Wärme durch **Thermalisierung** verlieren.
- **Oberflächenreflexion** (ohne Antireflexbeschichtung gehen $\sim 30 \%$ des einfallenden Lichts verloren)
- **Rekombination** (Elektron-Loch-Paare rekombinieren, bevor sie die Kontakte erreichen, und setzen dabei Energie in Form von Wärme oder Licht frei)

Die **Shockley-Queisser-Grenze** legt den theoretischen maximalen Wirkungsgrad für eine Einfachsolarzelle bei $\sim 33 \%$ unter Standard-Sonnenspektrum (AM1.5G) fest. In der Praxis erreichen Siliziumzellen aufgrund zusätzlicher Verluste durch Widerstand, unvollkommene Materialien und nicht ideale Übergangseigenschaften einen Wirkungsgrad von $15\text{--}22 \%$.

Wirkungsgrad, Spektralempfindlichkeit und Materialoptimierung

Der Wirkungsgrad von Solarzellen hängt entscheidend davon ab, wie gut die Bandlücke des Halbleiters zum Sonnenspektrum passt. Die Bandlücke von Silizium von $1,1 \text{ eV}$ ist ein Kompromiss: Es fängt sichtbares und nahes Infrarotlicht effektiv ein, kann jedoch keine Infrarotphotonen mit niedrigerer Energie nutzen und hochenergetische Ultraviolettphotonen nicht vollständig ausnutzen.





Fortschrittliche Strategien zur Überwindung der Shockley-Queisser-Grenze:

- **Mehrfachzellen (Tandemzellen):** Halbleiter mit unterschiedlichen Bandlücken (z. B. GaInP/GaAs/Ge) werden gestapelt, sodass jede Schicht einen bestimmten Teil des Spektrums absorbiert. Die Wirkungsgrade im Labor liegen bei konzentriertem Sonnenlicht über 47 %.
- **Perowskit-Zellen:** Hybride organisch-anorganische Materialien mit einstellbaren Bandlücken, schnellem Ladungstransport und lösungsbasierter Fertigung. Derzeitige Wirkungsgrade liegen bei 26 %, aber Stabilität und Skalierbarkeit bleiben Herausforderungen.
- **Hot-Carrier-Zellen** (experimentell): Gewinnen Energie aus heißen Ladungsträgern vor der Thermalisierung und erreichen damit einen Wirkungsgrad von potenziell über 66 %. Erfordern ultraschnelle Ladungsextraktionsmechanismen, die noch nicht kommerziell verfügbar sind.

Warum verringern hochenergetische Photonen den Gesamtwirkungsgrad?

Weil überschüssige Energie oberhalb der Bandlücke innerhalb von Pikosekunden durch Phononenemission (Thermalisierung) schnell als Wärme verloren geht. Ein 3-eV-Photon (UV) erzeugt das gleiche einzelne Elektron-Loch-Paar wie ein 1,2-eV-Photon (rot), wobei 1,9 eV als Wärme verloren gehen.

Warum können wir nicht einfach eine sehr kleine Bandlücke verwenden, um alle Photonen einzufangen?

Weil kleinere Bandlücken eine geringere Spannung ($V \propto E_g$) erzeugen und die thermische Erzeugung von Ladungsträgern zunimmt, wodurch der „Dunkelstrom“ erhöht wird, der die Nettoeffizienz verringert. Es gibt eine optimale Bandlücke ($\sim 1,1\text{--}1,4$ eV), die die Photonenabsorption und die Spannungsabgabe ausgleicht.

Ladungstransport, Rekombination und Gerätephysik

Nach der Erzeugung an der Verbindungsstelle müssen die Ladungsträger zu den Kontakten wandern, ohne sich wieder zu verbinden. **Rekombinationsmechanismen** begrenzen den Wirkungsgrad:

- **Strahlungsrekombination:** Elektron-Loch-Paare rekombinieren und emittieren Photonen (signifikant in Materialien mit direkter Bandlücke wie GaAs, minimal in Silizium)
- **Auger-Rekombination:** Drei-Teilchen-Wechselwirkung, bei der Energie an einen dritten Ladungsträger übertragen wird, anstatt als Licht emittiert zu werden (nimmt bei hohen Ladungsträgerdichten zu)
- **Shockley-Read-Hall-Rekombination (SRH):** Defekte und Verunreinigungen im Kristallgitter fangen Ladungsträger ein und erleichtern die Rekombination (dominiert in Silizium minderer Qualität)

Hochwertiges **kristallines Silizium** minimiert die SRH-Rekombination durch kontrollierte Herstellung. **Passivierungsschichten** (z. B. Siliziumnitrid, Aluminiumoxid) auf Oberflächen reduzieren die Rekombination an Grenzflächen. **Die Dotierungsprofile** werden so optimiert, dass sich das elektrische Feld über den aktiven Bereich erstreckt und eine schnelle Ladungsträgertrennung gewährleistet ist.





Warum verringert die Temperatur den Wirkungsgrad von Solarzellen?

Weil höhere Temperaturen die Gittervibrationen (Phononen) erhöhen, die Ladungsträger streuen, die Mobilität verringern und die Rekombinationsraten erhöhen. Außerdem nimmt die Bandlücke mit der Temperatur leicht ab ($\sim 0,3 \text{ meV/K}$ für Silizium), wodurch die Ausgangsspannung sinkt. Typischer Wirkungsgradverlust: $\sim 0,4 \text{ % pro } ^\circ\text{C}$ über $25 ^\circ\text{C}$.

Systemintegration und Leistung in der Praxis

Eine Photovoltaikanlage umfasst nicht nur Solarzellen, sondern auch:

- **Wechselrichter:** wandeln den Gleichstromausgang in Wechselstrom um, um die Netzkompatibilität zu gewährleisten
- **Maximum Power Point Tracking (MPPT):** Passt die Last kontinuierlich an, um bei wechselnden Lichtverhältnissen die maximale Leistung zu erzielen.
- **Energiespeicherung** (optional): Batterien speichern überschüssige Energie für Nachtzeiten oder bewölkte Perioden
- **Netzanbindung:** Einspeisung überschüssiger Energie in das Stromnetz, häufig mit Net-Metering-Regelungen

Der Kapazitätsfaktor (tatsächliche Energieausbeute / theoretisches Maximum) für Solaranlagen liegt in der Regel bei 15–25 % und wird durch folgende Faktoren begrenzt:

- Tag-/Nachtzyklen
- Wettervariabilität
- Saisonale Veränderungen des Sonnenwinkels
- Systemverluste (Widerstand der Verkabelung, Ineffizienz des Wechselrichters, Verschattung)

Warum verlieren Solarmodule mit der Zeit an Leistung?

UV-Strahlung, Feuchtigkeitseintritt, Temperaturwechsel und potentialinduzierte Degradation (PID) verringern nach und nach die Effizienz. Hochwertige Module verlieren pro Jahr etwa 0,5 % ihrer Effizienz; Garantien sichern in der Regel eine Leistung von 80 % nach 25 Jahren zu.

Lassen Sie uns gemeinsam darüber nachdenken

Warum arbeiten moderne Solarzellen immer noch weit unterhalb der Shockley-Queisser-Grenze?

Weil Materialien in der Praxis Mängel aufweisen, Oberflächen Rekombinationen verursachen und die Ladungsextraktion nicht vollkommen effizient ist. Die Überbrückung der Lücke zwischen theoretischer und praktischer Leistung treibt die Forschung in den Bereichen Materialwissenschaft und Gerätetechnik voran.

Warum können wir selbst mit perfekten Materialien keine 100 %ige Effizienz erreichen?

Weil grundlegende thermodynamische und quantenmechanische Einschränkungen gelten: Nicht alle Photonen können absorbiert werden (spektrale Fehlanpassung), die Thermalisierung verschwendet hochenergetische Photonen, und die Aufrechterhaltung der Spannungsabgabe erfordert eine gewisse





Energieabgabe. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik begrenzt letztendlich den Umwandlungswirkungsgrad.

Flipped Learning:

Ziel: Bereiten Sie sich auf die Diskussion im Unterricht vor, indem Sie die Abfolge *Photon* → *Absorption* → *Ladungstrennung* → *Stromfluss* und die physikalischen/technischen Zusammenhänge in photovoltaischen Systemen verstehen.

Aufgaben (einzureichen als 1–2-seitiger Bericht oder 6–8 Folien):

1. **Kurze Lektüre** über den Aufbau einer Silizium-Solarzelle und den Weg der Photonen. Hervorheben: Antireflexbeschichtung, N-Typ-Schicht, P-N-Übergang, P-Typ-Schicht, Metallkontakte.
2. **Arbeitsblatt „N-Typ vs. P-Typ-Silizium“:** Füllen Sie eine Tabelle aus mit:
 - Dotierungselement (Phosphor/Bor)
 - Mehrheitsladungsträger (Elektronen/Löcher)
 - Rolle bei der Ladungstrennung
 - Position in der Zellstruktur (oben/unten)
3. **PhET-Halbleitersimulation:** Erstellen Sie zwei Screenshots –
 - a. **Intrinsisches (undotiertes) Silizium:** Energiebänder und Fehlen freier Ladungsträger beobachten
 - b. **Dotiertes Silizium (N+P-Übergang):** Beobachten Sie die Bandbeugung, das eingebaute elektrische Feld und die Ladungstrennung unter Beleuchtung
4. **Kurze Zusammenfassung (max. 120 Wörter):** Erklären Sie mit eigenen Worten, warum die Solarzelle Sonnenlicht nicht wie ein Thermopaneel „sammelt“, sondern **Photonenenergie** durch Quantenabsorption und Übergangsphysik **in getrennte elektrische Ladungen umwandelt**.
5. **Drei Fragen zur Nachbesprechung:**
 - Eine zur **Quantenphysik:** Warum muss die Photonenenergie die Bandlücke überschreiten?
 - Eine zur **Materialwissenschaft:** Wie erzeugt Dotierung ein elektrisches Feld?
 - Eine zur **Systemtechnik:** Warum produzieren Sonnenkollektoren Gleichstrom, während Haushalte Wechselstrom verwenden?

Einreichung: Laden Sie die PDF-Datei oder die Folien vor dem Unterricht in den Klassenkanal hoch.





3. Betriebsmodul

Grundstufe

Das Verständnis des photovoltaischen Umwandlungsprozesses kann durch eine Reihe praktischer Aktivitäten vertieft werden, bei denen die Schüler sowohl quantenphysikalische als auch elektrische Phänomene beobachten können, die bei der Gewinnung von Solarenergie eine Rolle spielen. Ziel dieses Abschnitts ist es, die im theoretischen Teil behandelten Konzepte der Photonenabsorption, Ladungstrennung und Stromerzeugung unter Anleitung anzuwenden und dabei die **Physik der Halbleiter mit realen Energiesystemen** zu verbinden.

Wenn Licht auf ein Halbleitermaterial trifft, regen Photonen mit ausreichender Energie Elektronen aus gebundenen Zuständen zu beweglichen Ladungsträgern an – ein Quantenphänomen, das für das bloße Auge nicht sichtbar ist, aber mit elektrischen Messgeräten gemessen werden kann. Die Schüler können dieses Verhalten anhand eines einfachen Experiments beobachten: Sie schließen eine kleine Solarzelle an ein Multimeter an und setzen sie verschiedenen Lichtquellen aus (Sonnenlicht, LED-Lampe, Taschenlampe). Mit zunehmender Lichtintensität steigt der Strom proportional an, während die Spannung relativ stabil bleibt. Diese direkte Messung veranschaulicht, wie sich der Photonenfluss in elektrische Leistung umwandelt.

Durch die Simulation können die Schüler Energiebanddiagramme beobachten, Dotierungen anwenden, um N-Typ- und P-Typ-Bereiche zu erzeugen, und visualisieren, wie der P-N-Übergang ein eingebautes elektrisches Feld erzeugt. Wenn Licht einfällt, sehen die Schüler, wie Elektron-Loch-Paare erzeugt und durch das Übergangs-Feld getrennt werden, wodurch ein Stromfluss entsteht. Diese Aktivität hilft den Schülern zu verstehen, wie **Dotierungen und Übergangsphysik einen gerichteten Ladungstransport ermöglichen** – die Grundlage der photovoltaischen Funktionsweise.

Aus diesen Beobachtungen ergeben sich wesentliche Fragen: In welcher Beziehung stehen Photonenenergie und Elektronenanregung zueinander? Warum erzeugt Dotierung ein internes elektrisches Feld ohne externe Spannung? Der Vergleich des simulierten Halbleiters mit der realen Solarzellenstruktur verdeutlicht, wie Materialtechnik auf atomarer Ebene die makroskopische elektrische Leistung bestimmt.

Der Fokus verlagert sich dann auf die **Schichtarchitektur von Solarzellen**. Die Schüler analysieren die Anordnung der Funktionsschichten – Antireflexbeschichtung, N-Typ-Emitter, P-N-Übergang, P-Typ-Basis, Metallkontakte – und ihre komplementären Funktionen:

- Die **Antireflexbeschichtung** maximiert den Photoneintritt, indem sie die Oberflächenreflexion reduziert.
- Die **dünne N-Schicht** fängt in der Nähe der Oberfläche erzeugte Elektronen ein.
- Der **P-N-Übergang** erzeugt das elektrische Feld, das die Ladungsträger trennt.
- Die **dicke P-Schicht** absorbiert Photonen mit längerer Wellenlänge tiefer im Material.
- **Metallkontakte** sammeln den Strom und leiten ihn zu externen Schaltkreisen weiter.





Die Klassendiskussion wird mit einer Analyse des Zellverhaltens unter verschiedenen Lichtbedingungen fortgesetzt. Warum ändert sich die Stromabgabe bei Verschattung dramatisch, während die Spannung relativ stabil bleibt? Die Antwort liegt in der **direkten Proportionalität zwischen Photonenfluss und Ladungsträgererzeugung**. Diese gemeinsame Reflexion hilft den Schülern zu verstehen, wie das Design von Solaranlagen Teilverschattung, Ausrichtung und tageszeitliche Schwankungen berücksichtigen muss.

Anschließend werden die Schüler aufgefordert, Solarzellen mit alltäglichen Energiegeräten zu vergleichen:

- **Solarrechner:** Anwendungen mit geringem Stromverbrauch, bei denen kleine Zellen ausreichend Energie liefern
- **Dachpaneele:** in Reihe geschaltete Zellen, die Strom für den Hausgebrauch erzeugen
- **Solarparks im Netzmaßstab:** Megawatt-Anlagen mit Wechselrichtern, Transformatoren und Speichersystemen
- **Weltraumsatelliten:** hocheffiziente Mehrfachzellen, bei denen Zuverlässigkeit und Gewicht entscheidend sind

Durch diese Analogie wird die Photovoltaik als eine **Energieumwandlungskette vom Quantenbereich bis zum Stromnetz** neu interpretiert, die Atomphysik, Werkstofftechnik und elektrische Systeme miteinander verbindet.

Lassen Sie uns gemeinsam darüber nachdenken. Die Umwandlung von Sonnenenergie ist ein komplexer Prozess, der Quantenmechanik, Festkörperphysik und Elektrotechnik miteinander verbindet. Wie begrenzt die Bandlücke von Halbleitern die Wellenlängen, die in Elektrizität umgewandelt werden können? Welche technischen Strategien maximieren die Photonenabsorption und minimieren die Ladungsrekombination? Wie beeinflussen reale Einschränkungen – Kosten, Haltbarkeit, Skalierbarkeit – die Entscheidungen beim Design von Solarzellen?

Fortgeschrittenes Niveau

Auf fortgeschrittenem Niveau wird der Zusammenhang zwischen der Absorption von Photonen und dem Stromfluss durch externe Schaltkreise vertieft. Die Schüler beobachten, wie Lichtenergie in getrennte Ladungen innerhalb des P-N-Übergangs umgewandelt wird und wie sich diese Ladungsträger durch den Halbleiter und die metallischen Kontakte ausbreiten, um Energie zu liefern.

Um die Abfolge der Ereignisse zu verstehen, wird das Konzept der **Bandbeugung** am P-N-Übergang eingeführt: Wenn N-Typ- und P-Typ-Bereiche miteinander in Kontakt kommen, diffundieren Elektronen von N nach P und Löcher von P nach N, bis ein Gleichgewicht erreicht ist. Dadurch entsteht ein **Verarmungsbereich**, der keine beweglichen Ladungsträger mehr enthält, mit festen positiven Ladungen auf der N-Seite und festen negativen Ladungen auf der P-Seite. Das resultierende elektrische Feld ($\sim 10^5$ V/cm) ist stark genug, um photogenerierte Elektron-Loch-Paare zu trennen, bevor sie sich wieder verbinden.





Die Ausbreitung der Ladungsträger und die Erzeugung von elektrischem Strom werden durch eine **Augmented-Reality-Simulation** veranschaulicht, die mit **Delightex Studio – Spaces (Marker)** entwickelt wurde:

<https://edu.delightex.com/Studio/Spaces>

Mithilfe mobiler Geräte erkunden die Schüler ein dreidimensionales Modell einer Solarzelle:

1. Beobachten Sie, wie Photonen auf die Oberfläche treffen und in den Halbleiter eindringen
2. Visualisieren Sie die Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren, wenn die Photonenenergie die Bandlücke überschreitet
3. Verfolgen Sie, wie Elektronen durch das Sperrfeld zur N-Schicht und Löcher zur P-Schicht gezogen werden
4. Sehen Sie, wie Elektronen durch den externen Stromkreis (Draht, Last, Rückleitung) fließen
5. Verfolgen Sie den gesamten Stromkreis von der Erzeugung bis zur Last und zurück

Während der Aktivität werden Leitfragen gestellt:

– **An welcher Stelle in der Zelle wird Licht in elektrische Ladungen aufgespalten?**

An der P-N-Übergangszone, wo das eingebaute elektrische Feld die durch Licht erzeugten Elektronen und Löcher trennt, bevor sie sich wieder verbinden.

– **Warum fließt Strom durch den externen Stromkreis, wenn die Zelle beleuchtet wird?**

Weil die Verbindungsstelle kontinuierlich eine Spannungsdifferenz (Photospannung) zwischen der N-Seite und der P-Seite erzeugt, wodurch Elektronen durch den Stromkreis getrieben werden, um die Potentialdifferenz zu minimieren.

– **Wie erzeugt die Solarzelle Strom, ohne Brennstoff zu verbrauchen oder bewegliche Teile zu haben?**

Durch die direkte Umwandlung von Photonenenergie in Ladungstrennung durch Quantenabsorption und die anschließende Gewinnung dieser getrennten Ladungen als Strom über metallische Kontakte – eine Energieumwandlung im Festkörper ohne mechanische oder chemische Umwandlungen.

Die Antworten ergeben sich aus Gruppendiskussionen und dem Vergleich zwischen der Erzeugung von Ladungsträgern im Quantenmaßstab und makroskopischen elektrischen Messungen.

Die Lektion endet mit einer Reflexion über die **Entwicklung der Photovoltaik-Technologie**. Die Schüler vergleichen kristalline Siliziumzellen der ersten Generation mit neuen Technologien:

Technologie	Wirkungsgrad	Vorteile	Herausforderungen
Kristallines Silizium	15–22	Ausgereift, stabil, skalierbar	Ressourcenintensiv, unflexibel
Dünnschicht (CdTe, CIGS)	10–15	Flexibel, leicht	Geringerer Wirkungsgrad, giftige Materialien





Technologie	Wirkungsgrad	Vorteile	Herausforderungen
Perowskit	20–26 % (Labor)	Hoher Wirkungsgrad, kostengünstige Verarbeitung	Stabilität, Degradation, Bleigehalt
Mehrfachübergang (GaAs)	30–47	Ultrahoher Wirkungsgrad	Teuer, wird in der Raumfahrt/Konzentratoren verwendet

Lassen Sie uns gemeinsam darüber nachdenken. Stoßen moderne Solartechnologien wirklich an physikalische Grenzen oder gibt es noch Raum für Durchbrüche in der Materialwissenschaft und Gerätearchitektur? Können wir Zellen entwickeln, die alle Sonnenwellenlängen effizient umwandeln, oder wird die spektrale Fehlanpassung Single-Junction-Systeme immer einschränken? Wie beeinflussen wirtschaftliche und ökologische Faktoren (Herstellungsenergie, seltene Materialien, Recycling) die weltweite Verbreitung bestimmter Technologien?

Aktivitäten:

Die abschließenden Aktivitäten zielen darauf ab, das Gelernte zu festigen und die Zusammenarbeit unter Gleichaltrigen zu fördern.

Aktivität 1: Konzeptkarte

Die Schüler erstellen eine **Konzeptkarte**, die den gesamten Ablauf der photovoltaischen Umwandlung von Photonen in elektrische Energie darstellt und für jede Phase angibt:

- das **physikalische Phänomen** (Absorption, Anregung, Trennung, Fluss)
- Das **beteiligte Material/die beteiligte Struktur** (Halbleiter, P-N-Übergang, Kontakte, Schaltung)
- Die **Art der Energie** (Photon → kinetisch → potenziell → elektrisch)

Aktivität 2: Augmented-Reality-Erlebnis

Die Schüler erleben mit Delightex Studio – Spaces (Marker) eine vollständige Augmented-Reality-Reise durch den photovoltaischen Umwandlungsprozess. Die AR-Übung führt die Schüler durch 5 aufeinanderfolgende Szenen, die jede Phase der Solarenergieumwandlung visualisieren:

Szene 1: Einführung mit animierter Sonne und START-Button

Szene 2: Ankunft der Photonen und Energiebedarf (Bandlückenschwelle)

Szene 3: P-N-Übergangsstruktur und Ladungstrennung

Szene 4: Stromfluss durch den externen Stromkreis und Energieübertragung an die Last

Szene 5: Abschließende Bewertung mit aufeinanderfolgenden Konzept-Quizfragen





Jede Szene enthält visuelle Elemente (Diagramme, animierte Teilchen, farbcodierte Kugeln für Elektronen/Löcher), erklärende Textüberlagerungen und interaktive Quizfragen mit sofortigem Feedback. Die Schüler navigieren sequenziell, indem sie auf Schaltflächen tippen, visuelle Konsequenzen beobachten (Farbsättigung bei falschen Antworten, Feuerwerkseffekte bei richtigen Antworten) und Fragen zu Photonenenergieschwellen, P-N-Übergangsfunktion und Schaltungsverhalten beantworten. Die gesamte Reise dauert etwa 5-7 Minuten und kann einzeln oder in kleinen Gruppen zur gemeinsamen Diskussion erlebt werden.

Optionale Erweiterung: In kleinen Gruppen können die Schüler Folgeszenen zu fortgeschrittenen Themen wie Antireflexbeschichtungen, Mehrfachzellen oder realen Solarpanel-Installationen entwerfen und ihre eigenen erklärenden Texte und visuellen Indikatoren hinzufügen.

Aktivität 3: Interaktives Quiz

Um das Verständnis in jeder Phase zu überprüfen, umfasst das AR-Erlebnis **integrierte Quizfragen mit sofortigem visuellem Feedback**. Die Schüler beantworten Multiple-Choice-Fragen, die in die aufeinanderfolgenden Szenen eingebettet sind:

Quiz zu Szene 2:

- Was bestimmt, ob ein Photon Strom erzeugen kann?
(Richtig: Photonenenergie vs. Bandlücke)

Szene 3 Quiz:

- Was erzeugt das elektrische Feld, das Ladungsträger trennt?
(Richtig: Dotierung des p-n-Übergangs)

Szene 4 Quiz:

- Warum hört der Strom auf zu fließen, wenn wir das Solarpanel abdecken?
(Richtig: Keine Photonen = keine Elektron-Loch-Paare werden erzeugt)

Szene 5 Abschlussbewertung (3 aufeinanderfolgende Quizfragen):

1. Wie können wir die Ausgangsspannung erhöhen?
(Richtig: Zellen in Reihe schalten)
2. Warum können Infrarotphotonen in Silizium keinen Strom erzeugen?
(Richtig: Energie < Bandlücke bei 1,1 eV)
3. Was verhindert die Rekombination von Elektronen und Löchern?
(Richtig: Elektrisches Feld am p-n-Übergang)





Jedes Quiz bietet **visuelles Feedback**: Richtige Antworten behalten ihre leuchtenden Farben und ermöglichen den Übergang zur nächsten Szene, während falsche Antworten visuelle Konsequenzen nach sich ziehen (Entsättigung, Animation stoppt) und unbegrenzte Wiederholungsversuche ermöglichen, wodurch das logische Denken ohne Strafen gefördert wird.

Optionale Diskussionsfragen für weiterführende Untersuchungen:

- Warum verringert Verschattung den Strom, aber nicht die Spannung in in Reihe geschalteten Zellen?
- Was begrenzt den maximalen Wirkungsgrad von Einfachzellen-Solarzellen?
- Wie überwinden Mehrfachzellen die Shockley-Queisser-Grenze?

Aktivität 4: Plenardiskussion

Das Modul endet mit einer **Plenumsdiskussion**, in der die Schüler:

- die Ergebnisse aus Simulationen und AR-Erfahrungen kritisch analysieren
- die photovoltaische Umwandlung mit anderen Energietechnologien (fossile Brennstoffe, Wind, Wasser) vergleichen
- über die Rolle der Solarenergie für die globale Dekarbonisierung und Nachhaltigkeit nachdenken
- die Kompromisse zwischen Effizienz, Kosten, Umweltauswirkungen und Skalierbarkeit diskutieren

Erwartete Ergebnisse

Am Ende des Operationsmoduls sollten die Studierenden in der Lage sein

- die gesamte Abfolge der photovoltaischen Umwandlung, von der Photonenabsorption bis zur Erzeugung von elektrischem Strom, in wissenschaftlicher Sprache zu beschreiben
- Quantenphysik (Bandlücke, Photonenenergie, Ladungsträger) mit makroskopischem elektrischem Verhalten (Spannung, Strom, Leistung) in Verbindung zu bringen
- digitale und AR-Tools zu verwenden, um komplexe Phänomene auf atomarer Ebene darzustellen und den Energiefluss durch photovoltaische Systeme zu visualisieren
- einen kritischen Ansatz gegenüber Solarenergietechnologien zu entwickeln und deren physikalische Grenzen, technische Kompromisse und gesellschaftliche Auswirkungen für die Energiewende zu verstehen





4. Referenzen

TED-Ed, Wie funktionieren Solarzellen? (Animationsvideo). Verständliche Erklärung von Photovoltaikzellen, P-N-Übergängen und Elektronenfluss. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkt7CpY>

US-Energieministerium (DOE), Grundlagen der Solar-Photovoltaik-Technologie. Amt für Energieeffizienz und erneuerbare Energien. Verfügbar unter: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>

Universität von Colorado Boulder – PhET Interactive Simulations, Photoelectric Effect. Interaktive Erkundung der Photonenenergie, des Elektronenausstoßes und der Quanteneigenschaften von Licht. Verfügbar unter: <https://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric>

Encyclopædia Britannica, Solarzelle. Umfassender Überblick über den Aufbau, die Funktionsweise und die Materialien von Solarzellen. Verfügbar unter: <https://www.britannica.com/technology/solar-cell>

National Renewable Energy Laboratory (NREL), Photovoltaikforschung. US-Energieministerium. Verfügbar unter: <https://www.nrel.gov/pv/>

National Renewable Energy Laboratory (NREL), Best Research-Cell Efficiency Chart. Aktualisierte Rekordwirkungsgrade für verschiedene Photovoltaik-Technologien. Verfügbar unter: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

NASA, Wie die NASA Solarenergie nutzt und verbessert. Verfügbar unter: <https://science.nasa.gov/sun/how-nasa-uses-and-improves-solar-power>

Delightex Studio – Spaces (Marker), Bildungs-AR-Plattform für die Erstellung interaktiver Szenen. Verfügbar unter: <https://edu.delightex.com/Studio/Spaces>

Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detaillierte Gleichgewichtsgrenze des Wirkungsgrads von p-n-Übergang-Solarzellen. Journal of Applied Physics, 32(3), 510-519. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1063/1.1736034>

Green, M. A., et al. (2024). Solarzellen-Effizienztabelle (Version 63). Fortschritte in der Photovoltaik: Forschung und Anwendungen, 32(1), 3-13. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1002/pip.3750>

MIT OpenCourseWare, Grundlagen der Photovoltaik. Vorlesungsskripte und Videoinhalte zu Halbleiterphysik und Solarzellendesign. Verfügbar unter: <https://ocw.mit.edu/courses/2-627-fundamentals-of-photovoltaics-fall-2013/>





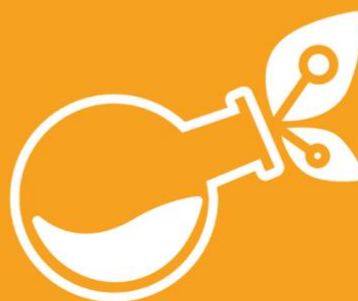
Internationale Energieagentur (IEA), Solar PV Technology Report. Globale Trends, Prognosen und Technologieanalyse. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/solar-pv>

Bildnachweis: Wikimedia Commons (CC BY-SA / Public Domain), National Renewable Energy Laboratory (NREL), US-Energieministerium, Encyclopædia Britannica und Bildungsressourcen der NASA – für Bildungszwecke.





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU

AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

*Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.