

UNTERRICHTSMODUL PHOTOVOLTAIK

PHOTOVOLTAIK

ARBEITSBLATT UND LEHRERINFORMATION

Fachinhalte:

- ▶ Elektrische und thermische Solaranlagen
- ▶ Silizium, Halbleiter, Dotierung, pn-Übergang, Elektronen und „Löcher“
- ▶ Monokristalline, Polykristalline, Dünnschicht und organische Solarzellen
- ▶ Funktion, Bauformen und Herstellung von Photovoltaik
- ▶ Technische Komponenten, wie z. B. Wechselrichter, und Einstufung einer Photovoltaikanlage
- ▶ Globalstrahlung, Gesamtenergiebilanz, Klimawandel, CO₂-Einsparung



PHOTOVOLTAIK

VORAUSSETZUNGEN

Die Schülerinnen und Schüler sind mit der Internet-Recherche vertraut. Sie haben Grundkenntnisse zu Solartechnik und kennen den Unterschied zwischen thermischen Solaranlagen und Photovoltaik. Die Schülerinnen und Schüler benötigen chemische Grundlagenerkenntnisse zum Atomaufbau, zu Elektronen und Protonen und zum Periodensystem der Elemente mit Kenntnis einzelner chemischer Elemente aus den Hauptgruppen. Hilfreich sind zudem Grundkenntnisse der Elektrizitätslehre. Zur Bearbeitung der Aufgaben sollten die Schülerinnen und Schüler mit der Umstellung von Formeln vertraut sein und mit physikalischen Größen rechnen können.

GESAMTZEIT: 90 MINUTEN

HINWEISE ZUM STUNDENABLAUF

PHASE	INHALT	ZEIT
1. Einstieg und Motivation	Fragen Sie die Schülerinnen und Schüler, ob sie Solaranlagen aus ihrem Alltag kennen und lassen Sie sie Beispiele aus ihrer Erfahrung nennen. Sammeln Sie diese und lassen Sie die Schülerinnen und Schüler die Beispiele anschließend richtig zu thermischen bzw. Photovoltaik-Anlagen einordnen. Anhand der Beispiele grenzen die Schülerinnen und Schüler nun den Begriff Photovoltaik ein und nennen offensichtliche Kennzeichen von elektrischen Solarmodulen. Um die wirtschaftliche Bedeutung von Photovoltaik zu verstehen, schätzen die Schülerinnen und Schüler, wie hoch die Bruttostromerzeugung in Deutschland aus Solarstrom prozentual zur Gesamtstromerzeugung von 607 Mrd. kWh (2019) ist.	10 Min.
2. Aufbau und Funktion von Solarzellen	In Einzelarbeit erarbeiten sich die Schülerinnen und Schüler zunächst aus einer Grafik mit Fachbegriffen und einem Lückentext ein grundsätzliches Verständnis vom Werkstoff Halbleiter sowie der Dotierung, d. h. der Anreicherung von Halbleitern mit Fremdatomen. Dazu gehört auch die Kenntnis des Zustands am Übergang vom negativen zum positiven Ladungsbereich, dem PN-Übergang mit Raumladung. Vor diesem Hintergrund befassen sich die Schülerinnen und Schüler mit der zweiten Grafik und den Textbausteinen, die die Stromerzeugung in der Solarzelle bei Sonneneinstrahlung darstellen.	30 Min.
3. Herstellung, Bauformen, Einsatzmöglichkeiten, Kenngrößen und Aufbau einer PV-Anlage	Teilen Sie die Schülerinnen und Schüler in vier Experten-Teams für die verschiedenen Typen von Solarzellen ein. Zuerst werden die Halbleiterherstellung und die verschiedenen Bauformen von Solarzellen (monokristallin, polykristallin, Dünnschicht, organisch) vorgestellt und charakterisiert. Als Ergebnissicherung füllen sie die Lücken in einer Tabelle und ordnen die jeweilige Bauform den spezifischen Einsatzbereichen zu. Im Anschluss setzen sich alle Gruppen mit dem technischen Aufbau einer PV-Anlage auseinander. Im Plenum „verkaufen“ die Expertenteams ihr Solarmodul mitsamt PV-Anlage für den spezifischen Einsatzbereich, indem sie den Einsatzzweck und die Einordnung in das Diagramm vorstellen.	20 Min.



HINWEISE ZUM STUNDENABLAUF

PHASE	INHALT	ZEIT
4. Erweiterte Einsatzbereiche von Photovoltaik und Umweltbilanz	Mit der Kenntnis der verschiedenen Bauformen von PV-Anlagen aus den vorherigen Aufgaben und weiteren Angaben in dieser Aufgabe sammeln die Schülerinnen und Schüler in Zweier-Teams mindestens zwei sinnvolle, auch neue, Anwendungen für PV-Anlagen in ihrem Alltag und den Gebäuden ihrer Umgebung. Es soll ein typisches Elektroauto versorgt werden. Die Zweier-Teams diskutieren das Design der Anlage, führen die Berechnungen zu Ertrag und notwendiger Modulfläche durch und erörtern in Stichworten die Vorteile.	30 Min.

BINNENDIFFERENZIERUNG

- ▶ Die Basisaufgabe ist von allen Schülerinnen und Schülern zu lösen.
- ▶ Die Bonusaufgabe ist optional, sie dient als Reserve oder Ergänzung für leistungsstärkere Lernende.

HAUSAUFGABE:

Führt in eurer direkten Umgebung und an eurem Wohnort eine Erkundung durch und sammelt verschiedene Solaranwendungen in der Tabelle unten. Sortiert die Anwendungen nach diesen Kriterien:

1. Die PV-Anlage dient als Kleinkraftwerk und speist Strom ins Netz ein oder deckt teilweise den Haushaltsstrombedarf.
2. Die PV-Anlage versorgt eigenständig ein spezielles Gerät oder eine Funktion.

Schätzt auch die im Jahr erzeugte Energie eurer Anwendungen grob ab. Als Anhaltspunkt dafür dient die Größe der Solarpanels. Ein Photovoltaik-Panel als „Kleinkraftwerk“ von 6 qm Fläche erzeugt rund 1.500 Kilowattstunden (kWh) elektrische Energie im Jahr (zum Vergleich: ein 4-Personen-Haushalt verbraucht 4000 kWh pro Jahr).

1. SOLARANWENDUNG ALS „KLEINKRAFTWERK“ MIT GROSSEM SOLARPANEL	GESCHÄTZTE FLÄCHE DES SOLARPANELS	GESCHÄTZTE SOLARENERGIE IM JAHR IN KWH FORMEL: ENERGIE = 1.500 KWH · (SOLARPANEL/6 QM)
2. SOLARANWENDUNG FÜR ALLEINSTEHENDES GERÄT/ FUNKTION	GESCHÄTZTE FLÄCHE DES SOLARPANELS	GESCHÄTZTE SOLARENERGIE IM JAHR IN KWH FORMEL: ENERGIE = 1.500 KWH · (SOLARPANEL/6 QM)

Lasst euch von eurer Beobachtung inspirieren: Überlegt euch je eine eigene Idee für eine weitere Einsatzmöglichkeit von Photovoltaik.





PHOTOVOLTAIK

Energie aus Sonneneinstrahlung ist ein wichtiger Baustein der erneuerbaren Energien und stellt eine Maßnahme im Kampf gegen den Klimawandel dar. Sonnenenergie trägt dazu bei, Treibhausgase zu verringern, wie sie zum Beispiel bei der Energieerzeugung mittels fossiler Brennstoffe entstehen. Der Begriff Photovoltaik setzt sich aus dem griechischen Wort für Licht, „Phos“, und der Einheit „Volt“ für elektrische Spannung zusammen und bezeichnet ausschließlich Anlagen, bei denen die direkte Sonneneinstrahlung elektrischen Strom erzeugt. Die Bedeutung der Photovoltaik für die Stromerzeugung in Deutschland hat in den letzten Jahren stetig zugenommen. In 2019 betrug der Anteil von Photovoltaik an der Stromerzeugung 7,7 Prozent.

► Basisaufgabe ► Bonusaufgabe

AUFGABEN

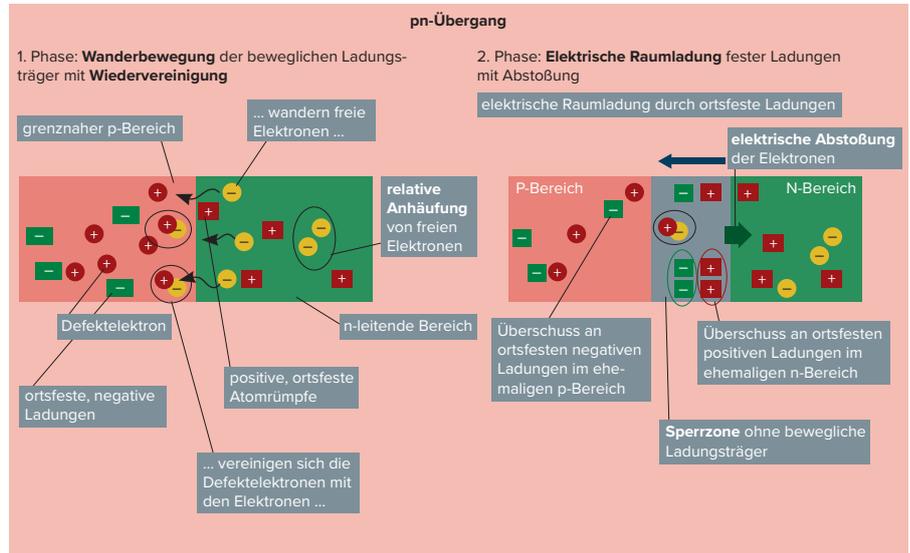
1. AUFBAU UND FUNKTION EINER SOLARZELLE

- Schau dir die Einzelbilder in Abbildung 1 mit allen Fachbegriffen und Textbausteinen genau an und fülle dann die Lücken mit den Fachbegriffen aus den Bildern.

MATERIAL	AUFBAU EINER SOLARZELLE
<p>Halbleiter Silizium</p> <p>Kristallgitterstruktur</p>	<p>Solarzellen bestehen aus Halbleitermaterial und produzieren elektrischen Strom bei Sonneneinstrahlung. _____ nennt man beispielsweise die chemischen Stoffe _____ oder Germanium. Sie haben bei _____ eine feste Kristallstruktur, das bedeutet, dass die Atomrümpfe und die vier äußeren Elektronen des Siliziums fest in einer _____ gebunden sind. Es gibt _____.</p> <p>Bei niedriger Temperatur ohne größere Wärmeschwingung der Kristalle leiten Halbleiter den elektrischen Strom nicht.</p>
<p>1 Elektron frei beweglich</p> <p>Fünfwertiges Phosphor-Atom</p>	<p>Loch, Defektelektron</p> <p>Bor mit 3 gebundenen Außenelektronen</p>
<p>Mit dem Trick der Dotierung (lat. für „Ausstattung“) werden Halbleiter auch bei geringen Temperaturen leitfähig. Dazu baut man gezielt _____ mit mehr oder weniger Außenelektronen als bei Silizium in den Kristall ein. Bei Verunreinigung mit _____ atomen, d. h. mit fünf Elektronen in der Außenschale, verbinden sich nur vier Elektronen mit dem Silizium-Kristallgitter und _____. Der Bereich ist n-leitend, eine _____. Eine _____, d. h. eine Leitfähigkeit bei Anlegen einer äußeren Spannung durch bewegliche, scheinbar positive Ladungen, erreicht man beispielsweise durch den Einbau des Elements _____, also einem Elektron weniger als bei Silizium. Dabei gehen drei Außenelektronen eine feste Bindung mit den Silizium-Nachbarn ein. Bei einer Bindung zum Nachbarn liegt ein _____ vor, ein _____. Beim Anlegen einer äußeren Spannung füllen freie, zum Pluspol wandernde Elektronen diese Lücke. Das Defektelektron wandert dann als freie, scheinbar positive Ladung zum Minuspol. Der Bereich heißt p-leitend.</p>	

Abbildung 1

MATERIAL **AUFBAU EINER SOLARZELLE**



Für die Funktion der Solarzelle ist der _____ wichtig, also der Bereich, wo p- und n-Leitung aneinanderstoßen. Denn hier findet bei Sonneneinstrahlung die Stromerzeugung durch Trennung der Ladungen statt. Ohne äußere Spannung findet in der ersten Phase eine _____ der beweglichen Ladungen mit _____ von beweglichen Ladungen statt. Es _____ aufgrund der _____ im n-Bereich in den p-Bereich ein und springen dort in die Lücken. Hier _____, bewegliche, positive Lücken verschwinden. Im _____ bleiben _____ zurück. Andererseits verarmt der _____ an freien Elektronen durch die Wanderbewegung in den p-Bereich. Zurück bleiben die _____ des Phosphors. Als Zweites bildet sich in der zweiten Phase eine _____ ortsfester Ladungen aus. Die _____ verhindert eine weitere Wanderung der Elektronen in den p-Bereich. Der pn-Übergang ist eine elektrische _____ ohne bewegliche Ladungsträger, aber mit ortsfester Raumladung.

Abbildung 1

- In Abbildung 2 wird die Funktionsweise einer Solarzelle bei Sonneneinstrahlung erklärt. Lies dir zuerst die Textbausteine aufmerksam durch und ordne die zugehörigen Großbuchstaben jeder passenden Situation im Bild zu.

MATERIAL FUNKTION EINER SOLARZELLE

- A** Pralle Sonneneinstrahlung trifft in der Sperrzone, also dem Bereich des pn-Übergangs, auf vereinigte Löcher und Elektronen.
- B** Bei geringer Strahlungsenergie wegen ungenügender Lichtstärke, Reflexion oder schlechtem Einstrahlwinkel lösen sich die Elektronen aus den Lücken und fallen dann wieder in die Lücken zurück.
- C** Starke Sonneneinstrahlung schlägt bei Strahlung die Elektronen aus den Löchern heraus.
- D** Die ausgelösten Elektronen sind frei beweglich und wandern – angetrieben von der Raumladung in der Sperrzone – in Richtung n-leitendem Bereich.
- E** Das Metallgitter im n-Bereich fängt die Elektronen auf.
- F** Über Verbraucher und Strommesser fließen die Elektronen als elektrischer Strom über den Metallkontakt in den p-leitenden Bereich.
- G** Das Strommessgerät zeigt einen negativen Gleichstrom an. Negativ, da Elektronen fließen, und Gleichstrom, da die Stromrichtung nicht wechselt.
- H** Nach der Trennung von Löchern und Elektronen wandern die Löcher (scheinbar) zur p-leitenden Schicht.

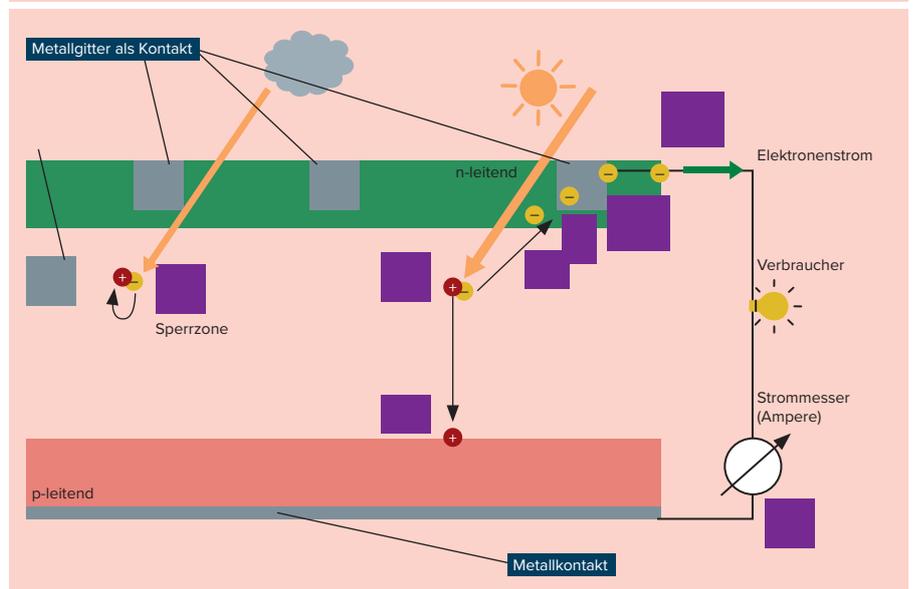


Abbildung 2

2. HERSTELLUNG, BAUFORMEN UND ANWENDUNG VON VERSCHIEDENEN SOLARZELLENTYPEN

- Macht euch zunächst im Experten-Team mit der Gewinnung des Halbleitermaterials Silizium und der Herstellung der verschiedenen Typen von Solarzellen vertraut (Abbildung 3). Lest die Eigenschaften von eurem Solarzellen-Typ in der Tabelle (Abbildung 4) aufmerksam durch und vervollständigt mit dem Wissen aus Abbildung 3 die Lücken. Nutzt für eure Einschätzung eine Skala mit fünf Stufen von „sehr hoch“, „hoch“, „klein“, „gering“, „sehr gering“.

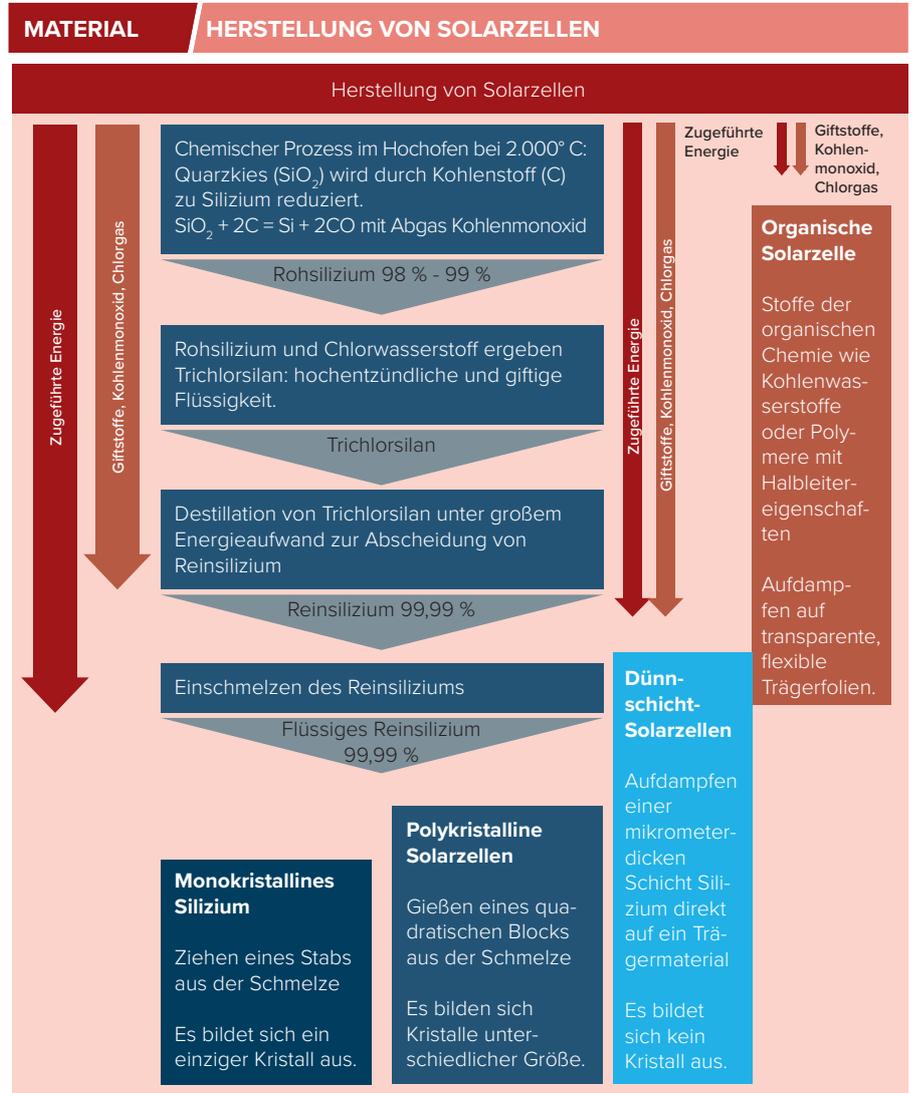
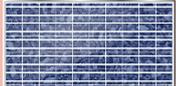


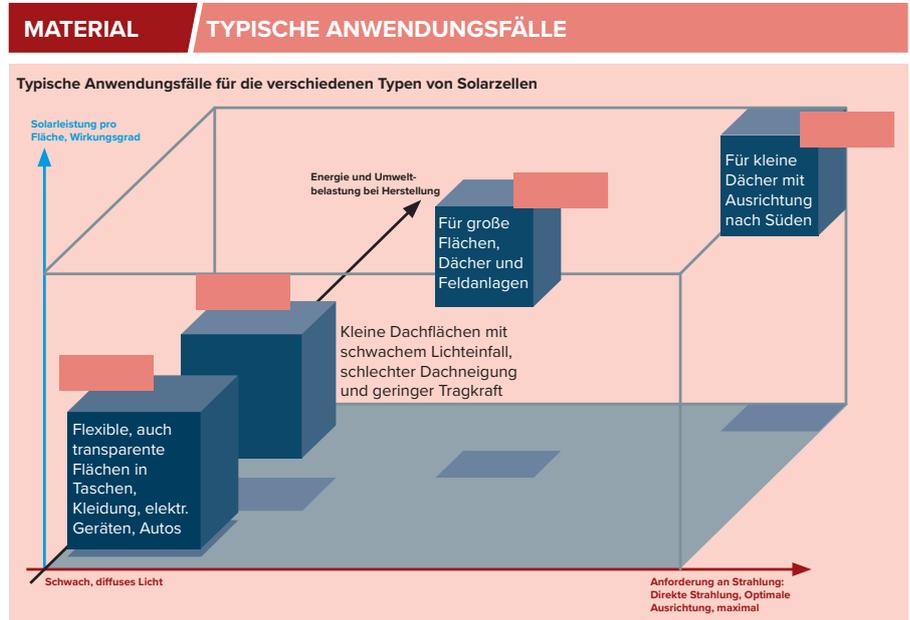
Abbildung 3

MATERIAL	KENNZEICHEN VON SOLARZELLEN			
	MONOKRISTALLIN	POLYKRISTALLIN	DÜNNSCHICHT	ORGANISCH
TYPISCHES AUSSEHEN	 <small>Quelle: xangai – stock.adobe.com</small>	 <small>Quelle: xangai – stock.adobe.com</small>	 <small>Quelle: iaremenko – stock.adobe.com</small>	 <small>Quelle: iaremenko – stock.adobe.com</small>
OBERFLÄCHE	Glatt	Rau, einzelne Kristallgrenzen sichtbar	Glatt	Glatt
FARBE				
AUFBAU	Zerschneiden des Kristalls in dünne Scheiben. Dotierung. Anbringen der Metallkontakte.	Zerschneiden des Gussblocks in dünne Scheiben. Elektrische Zusammenschaltung der Scheiben. Dotierung. Metallkontakte.	Sehr dünne Zelle (1–5 Mikrometer). Empfindlich, da kein Rahmen. Effizient bei schwachem Licht. Aufdampfen von nicht-kristallinem Silizium auf flexibles Trägermaterial.	Dünnste Schichten von Polymeren, aufgedampft auf Trägermaterial. Alle Arten von Trägern (flexibel, transparent, etc.).
EIGENSCHAFTEN BEI LICHT-EINFALL	Direkte Sonneneinstrahlung bei guter Ausrichtung.	Auch schwaches und diffuses Licht. Vielfach Reflexionen an Kristallgrenzen.	Auch schwaches und diffuses Licht.	Auch schwaches und diffuses Licht.
WIRKUNGSGRAD	22 %	15 %	10 % – 13 %	7 % – 11 %
LEBENSDAUER	Sehr hoch	Hoch	Klein	Gering
ENERGIE BEI HERSTELLUNG				
UMWELTBELASTUNG BEI HERSTELLUNG				

Quelle: <https://www.wegatech.de/ratgeber/photovoltaik/grundlagen/poly-oder-monokristalline-module/>

Abbildung 4

- ▶ In Abbildung 5 sind in einem dreidimensionalen, qualitativen Diagramm mit den Achsen „Anforderung an Strahlung“, „Solarleistung pro Fläche bzw. Wirkungsgrad“ und „Energie und Umweltbelastung bei Herstellung“ typische Anwendungen für die verschiedenen Solarzellentypen dargestellt. Ordnet unter Nutzung der Kennzeichen eurer Solarzelle aus Abbildung 4 die zu eurem Typ von Solarzelle passende Anwendung in Abbildung 5 zu.



▶ **PV-ANLAGE FÜR EIN 4-PERSONEN-HAUS**

Ein 4-Personen-Haushalt verbraucht in Deutschland im Jahr rund 4.000 Kilowattstunden (kWh) Strom. Die erzielbare Leistung einer PV-Anlage hängt wesentlich von der Sonnenscheindauer, der bauart-spezifischen Nennleistung (Kilowatt Peak kWp), der Ausrichtung der Solarmodule und von der Intensität der Strahlung ab. Im Jahr leistet eine Anlage durchschnittlich 800 kWh (im Norden) – 1.000 kWh (im Süden) pro installierter 1 kW Nennleistung. Die Anzahl der zu installierenden 1 kWp-Module ergibt sich aus dem erwünschten Energieertrag E (kWh) geteilt durch die örtliche Jahresstrahlungsenergie. Um 1 Kilowatt Leistung zu erzielen, benötigt man rund 6 qm Solarfläche. Die Kosten für den Aufbau einer (kleinen) PV-Anlage liegen bei rund 1.800 EUR/kW Nennleistung.

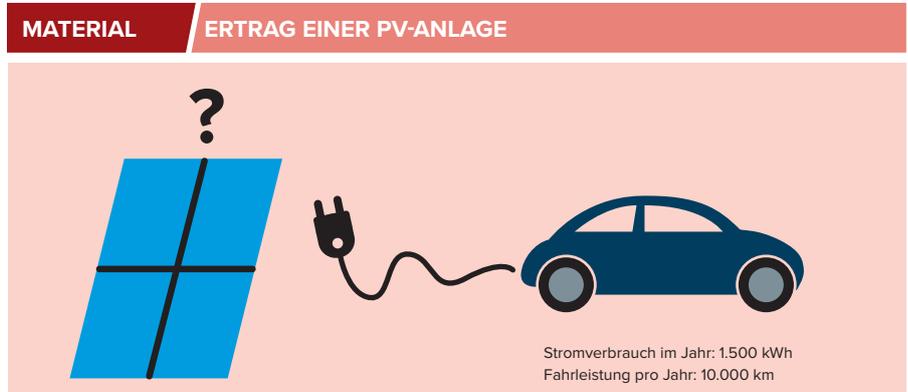
- Berechne die notwendige Fläche der PV-Anlage und die Kosten jeweils für einen 4-Personen-Haushalt im Norden und im Süden von Deutschland und trage die berechneten Werte in die Tabelle ein.

	ANZAHL DER ZU INSTALLIERENDEN 1 KWP-MODULE	GESAMTFLÄCHE DER PV-ANLAGE	GESAMTKOSTEN FÜR INSTALLATION
Im Norden			
Im Süden			

3. ERTRAG EINER PV-ANLAGE ZUM LADEN EINES ELEKTRO-AUTOS UND KREATIVE IDEEN FÜR PV-STANDORTE

Abbildung 6 zeigt ein Elektroauto mit einer Fahrleistung von 10.000 km im Jahr. Dafür ist durchschnittlich ein jährlicher Energiebedarf von 1.500 kWh notwendig. In Abbildung 7 ist dargestellt, wie sich der Energieertrag einer PV-Anlage berechnet. Er setzt sich aus der Sonneneinstrahlung im ganzen Jahr an einem Standort, der Globalstrahlung, der Fläche der Solarzellen und verschiedenen Verlustfaktoren zusammen. Nähere Angaben dazu, wie die Ausrichtung der Fläche zur Himmelsrichtung und die Neigung zur Sonne als Verlustfaktoren eingehen, findet ihr in Abbildung 8. Berücksichtigt auch die Angaben zu den verschiedenen Typen von Solarzellen aus Abbildung 4.

- ▶ Arbeitet zur Versorgung eines Elektroautos durch eine PV-Anlage mit Nennleistung 1.500 kWh im Jahr zwei kreative Montageorte und dazu jeweils passende Solarzellentypen aus. Wählt als geografische Standorte je eine Stadt aus der Tabelle in Abbildung 8 aus. Nutzt die angegebenen Formeln aus Abbildung 7 zur Berechnung und tragt die Werte in die Tabelle in Abbildung 6 ein.
- ▶ Begründet eure Wahl von Standort und Solarzellentyp in Stichworten.

MATERIAL	ERTRAG EINER PV-ANLAGE
	

Zwei kreative Ideen für PV-Anlagen zur Versorgung des E-Autos mit 1.500 kWh im Jahr

LAGE	VERFÜGBARE GEBÄUDEFLÄCHE	BERECHNETE FLÄCHE DER PV-ANLAGE	TYP SOLARZELLE	MAX. WIRKUNGS-GRAD	AUS-RICHTUNG	GLOBAL-STRAHLUNG	NEIGUNGS-FAKTOR

Abbildung 6

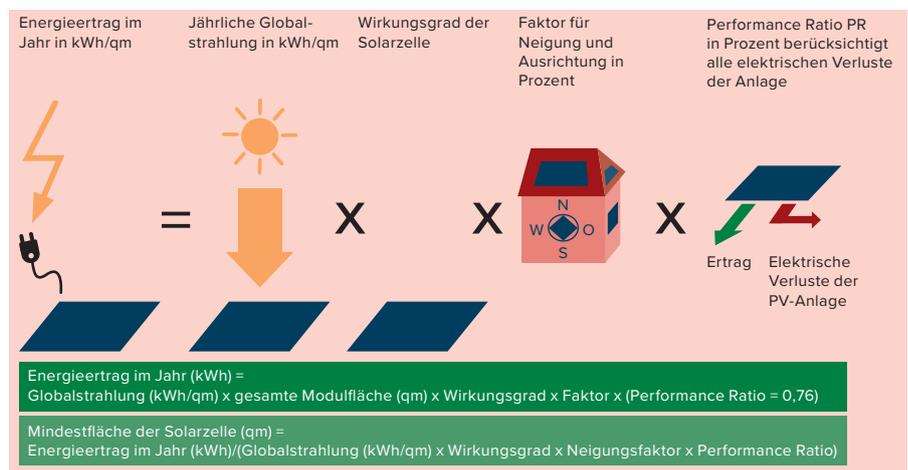
Energieertrag im Jahr in kWh/qm	Jährliche Globalstrahlung in kWh/qm	Wirkungsgrad der Solarzelle	Faktor für Neigung und Ausrichtung in Prozent	Performance Ratio PR in Prozent berücksichtigt alle elektrischen Verluste der Anlage
				
<p>Energieertrag im Jahr (kWh) = Globalstrahlung (kWh/qm) x gesamte Modulfläche (qm) x Wirkungsgrad x Faktor x (Performance Ratio = 0,76)</p> <p>Mindestfläche der Solarzelle (qm) = Energieertrag im Jahr (kWh)/(Globalstrahlung (kWh/qm) x Wirkungsgrad x Neigungsfaktor x Performance Ratio)</p>				

Abbildung 7

Globalstrahlung im Jahr nach Standort

Standort	Globalstrahlung (kWh/m²)
Hamburg	900 kWh/m²
Berlin	1.000 kWh/m²
Köln	1.000 kWh/m²
Stuttgart	1.100 kWh/m²
München	1.200 kWh/m²

Quelle: Deutscher Wetterdienst

Einfluss von Ausrichtung und Dachneigung auf die Strahlung

DACH-NEIGUNG	NORD	OST	SÜD-OST	SÜD	SÜD-WEST	WEST
0° – 10°	80 %	90 %	95 %	95 %	95 %	90 %
11° – 40°	60 %	80 %	95 %	100 %	95 %	80 %
41° – 90°	30 %	60 %	70 %	80 %	70 %	60 %

Quelle: Viessmann

Abbildung 8

HINWEISE UND LÖSUNGEN ZU DEN AUFGABEN

HAUSAUFGABE

Lösungsvorschlag:

1. SOLARANWENDUNG ALS „KLEINKRAFTWERK“ MIT GROSSEM SOLARPANEL	GESCHÄTZTE FLÄCHE DES SOLARPANELS	GESCHÄTZTE SOLA-RENERGIE IM JAHR IN KWH
Solaranlage auf Privathaus	3 m x 8 m = 24 qm	6.000 kWh
Solarfeld auf Freifläche	Jedes Modul ca. 1 m x 2 m; 10 Reihen mit je 50 Modulen = 500 Stck. Solarfläche = 1.000 qm	250 MWh
Balkon-Kraftwerk	0,6 m x 1,0 m = 0,6 qm	150 kWh

SOLARANWENDUNG FÜR ALLEINSTEHENDES GERÄT/FUNKTION	GESCHÄTZTE FLÄCHE DES SOLARPANELS	GESCHÄTZTE SOLA-RENERGIE IM JAHR IN KWH
Anzeigetafel solarbetrieben	0,6m x 0,8m = 0,48 qm	120 kWh
Umwelt-Messgeräte in der Innenstadt	0,3m x 0,3m = 0,09 qm	22,5 kWh
Solar-Toilettenhäuschen (Beleuchtung, Türöffner)	Dachfläche ca. 2,25 qm	563 kWh

Weitere Einsatzmöglichkeit von Photovoltaik.

SOLAR-ANWENDUNG ALS „KLEINKRAFTWERK“ MIT GROSSEM SOLARPANEL	SOLARANWENDUNG FÜR ALLEINSTEHENDES GERÄT/FUNKTION
Mobile Powerbank für Handy	Solare Hauseingangsbeleuchtung

EINSTIEG UND MOTIVATION

Lösungsvorschlag:

Solaranlagen im Alltag:

- Solaranlagen auf Ackerflächen, Agrophotovoltaik
- Sonnenkollektoren auf Dächern
- Bläuliche Solarmodule auf Dächern
- Gartenlaternen und Lichterketten mit Solarpanel
- Taschenrechner mit Solarzelle

- Uhren mit Solarzelle
- Akkuladestationen mit Solar-Panel
- Solarkraftwerke für den Balkon
- Powerbank mit Solar-Modul

Kennzeichen von Photovoltaik:

- Plattenförmige Module, die blau schimmern, häufig mit Gittermuster und Rahmen aus Metall
- In der dunkelblauen Fläche sind kristalline Strukturen zu erkennen
- Solarmodule, die elektrischen Strom erzeugen

Kennzeichen von thermischen Solaranlagen

- Plattenförmige Module mit Rohrsystem
- Dunkle, gerade Rohre mit dickem Durchmesser
- Ausnutzung der Wärmewirkung von Sonne zur Erhitzung von Wasser

In 2019 stammen 46,5 Mrd. Kilowattstunden (Mrd. kWh) Strom aus Photovoltaik. Bei einer Bruttogesamtstromerzeugung von 607 Mrd. kWh in Deutschland 2019 entspricht der erzeugte Solarstrom einem Anteil von 7,7 Prozent.

1. AUFBAU UND FUNKTION EINER SOLARZELLE

AUFBAU EINER SOLARZELLE

Lösungsvorschlag:

Solarzellen bestehen aus Halbleitermaterial und produzieren elektrischen Strom bei Sonneneinstrahlung. **Halbleiter** nennt man beispielsweise die chemischen Stoffe **Silizium** oder Germanium. Sie haben bei **Zimmertemperatur** eine feste Kristallstruktur, das bedeutet, dass die Atomrümpfe und die vier äußeren Elektronen des Siliziums fest in einer **Kristallgitterstruktur** gebunden sind. Es gibt **keine frei beweglichen Ladungsträger**. Bei niedriger Temperatur ohne größere Wärmeschwingung der Kristalle leiten Halbleiter den elektrischen Strom nicht.

Mit dem Trick der Dotierung (lat. für „Ausstattung“) werden Halbleiter auch bei geringen Temperaturen leitfähig. Dazu baut man gezielt **Fremdatome** mit mehr oder weniger Außenelektronen als bei Silizium in den Kristall ein. Bei Verunreinigung mit

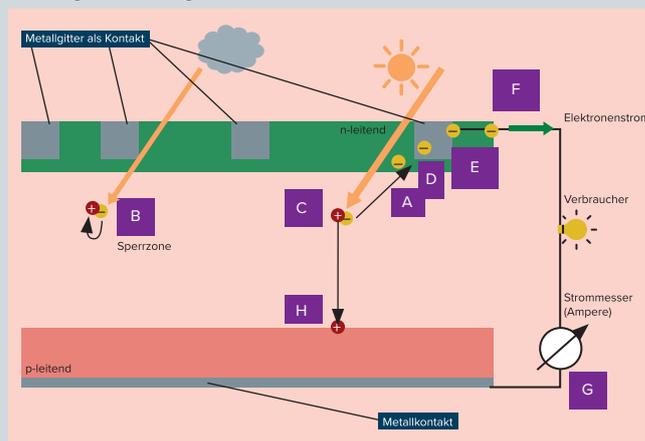
fünfwertigen Phosphoratomen, d. h. mit fünf Elektronen in der Außenschale, verbinden sich nur vier Elektronen mit dem Silizium-Kristallgitter und **ein Elektron ist frei beweglich**. Der Bereich ist ein n-leitend, eine **n-Dotierung**.

Eine **p-Leitung**, d. h. eine Leitfähigkeit bei Anlegen einer äußeren Spannung durch bewegliche, scheinbar positive Ladungen, erreicht man beispielsweise durch den Einbau des Elements **Bor mit drei gebundenen Außenelektronen**, also einem Elektron weniger als bei Silizium. Dabei gehen drei Außenelektronen eine feste Bindung mit den Silizium-Nachbarn ein. Bei einer Bindung zum Nachbarn liegt ein Loch vor, ein **Defektelektron**. Beim Anlegen einer äußeren Spannung füllen freie, zum Pluspol wandernde Elektronen diese Lücke. Das Defektelektron wandert dann als freie, scheinbar positive Ladung zum Minuspol. Der Bereich heißt p-leitend.

Für die Funktion der Solarzelle ist der **pn-Übergang** wichtig, also der Bereich, wo p- und n-Leitung aneinanderstoßen. Denn hier findet bei Sonneneinstrahlung die Stromerzeugung durch Trennung der Ladungen statt. Ohne äußere Spannung findet in der ersten Phase eine **Wanderbewegung** der beweglichen Ladungen mit **Wiedervereinigung** von beweglichen Ladungen statt. Es **wandern freie Elektronen** aufgrund der **relativen Anhäufung** im n-Bereich in den p-Bereich ein und springen dort in die Lücken. Hier **vereinigen sich die Defektelektronen mit den Elektronen**, bewegliche, positive Lücken verschwinden. Im **grenznahen p-Bereich** bleiben **ortsfeste, negative Ladungen** zurück. Andererseits verarmt der **n-leitende Bereich** an freien Elektronen durch die Wanderbewegung in den p-Bereich. Zurück bleiben die **positiven, ortsfesten Atomrümpfe** des Phosphors. Als Folge bildet sich in der zweiten Phase eine **elektrische Raumladung** ortsfester Ladungen aus. Die **elektrische Abstoßung** verhindert eine weitere Wanderung der Elektronen in den p-Bereich. Der pn-Übergang ist eine elektrische **Sperrzone** ohne bewegliche Ladungsträger, aber mit ortsfester Raumladung.

FUNKTIONSWEISE EINER SOLARZELLE

Lösungsvorschlag:



2. HERSTELLUNG, BAUFORMEN UND ANWENDUNG VERSCHIEDENER SOLARZELLENTYPEN

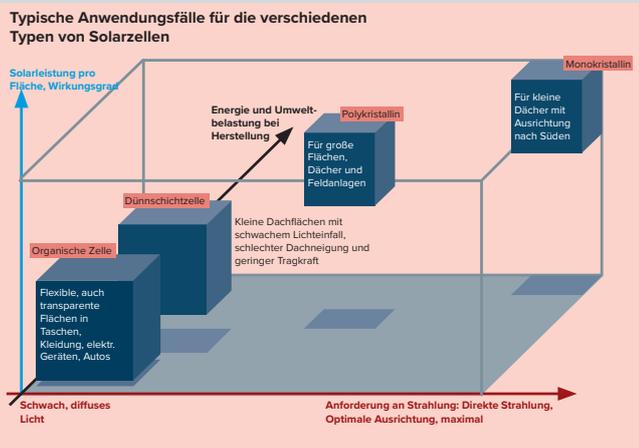
KENNZEICHEN VON SOLARZELLEN

Lösungsvorschlag:

	MONOKRISTALLIN	POLYKRISTALLIN	DÜNNSCICHT	ORGANISCH
TYPISCHES AUSSEHEN				
	Quelle: xangai – stock.adobe.com	Quelle: xangai – stock.adobe.com	Quelle: iaremenko – stock.adobe.com	Quelle: iaremenko – stock.adobe.com
OBERFLÄCHE	Glatt	Rau, einzelne Kristallgrenzen sichtbar	Glatt	Glatt
FARBE	Dunkelblau bis schwarz	Hellblau	Dunkelblau bis schwarz	Braun
AUFBAU	Zerschneiden des Kristalls in dünne Scheiben. Dotierung, Anbringen der Metallkontakte.	Zerschneiden des Gussblocks in dünne Scheiben. Elektrische Zusammenschaltung der Scheiben. Dotierung, Metallkontakte.	Sehr dünne Zelle (1–5 Mikrometer). Empfindlich, da kein Rahmen. Effizient bei Schwachlicht. Aufdampfen von nicht-kristallinem Silizium auf flexibles Trägermaterial.	Dünne Schichten von Polymeren, aufgedampft auf Trägermaterial. Alle Arten von Trägern (flexibel, transparent, etc.).
EIGENSCHAFTEN BEI LICHT-EINFALL	Direkte Sonneneinstrahlung bei guter Ausrichtung.	Auch schwaches und diffuses Licht. Vielfach Reflexionen an Kristallgrenzen.	Auch schwaches und diffuses Licht.	Auch schwaches und diffuses Licht.
WIRKUNGS-GRAD	22 %	15 %	10 % – 13 %	7 % – 11 %
LEBENS-DAUER	Sehr hoch	Hoch	Klein	Gering
ENERGIE BEI HERSTEL-LUNG	Sehr hoch	Hoch	Klein	Sehr gering
UMWELTBE-LASTUNG BEI HERSTEL-LUNG	Sehr hoch	Sehr hoch	Hoch	Sehr gering

Quelle: <https://www.wegatech.de/ratgeber/photovoltaik/grundlagen/poly-oder-monokristalline-module/>

TYPISCHE ANWENDUNGSFÄLLE



Für die Standorte wurden bisher ungenutzte Flächen mit eher geringer Sonneneinstrahlung oder schlechter Ausrichtung genutzt. Für den Ertrag entscheidend ist die Auswahl eines Solarzellen-Typs, der auch mit schwachem Lichteinfall zurecht kommt, wie polykristalline oder Dünnschicht-Zellen. Diese Zelltypen sind auch in der Umweltbilanz besser, da weniger energieaufwändig herzustellen.

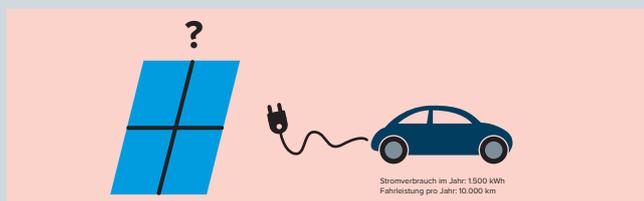
BONUSAUFGABE: PV-ANLAGE FÜR EIN 4-PERSONEN-HAUS

Lösungsvorschlag:

	ZU INSTALLIERENDE LEISTUNG KWP	GESAMTFLÄCHE DER PV-ANLAGE	GESAMTKOSTEN FÜR INSTALLATION
Im Norden	4.000 kWh/800 kWh = 5 kWp	5 x 6 qm = 30 qm	5 x 1.800 EUR/kWp = 9.000 EUR
Im Süden	4.000 kWh/1.000 kWh = 4 kWp	4 x 6 qm = 24 qm	4 x 1.800 EUR/kWp = 7.200 EUR

3. ERTRAG EINER PV-ANLAGE ZUM LADEN EINES ELEKTROAUTOS UND KREATIVE IDEEN FÜR PV-STANDORTE

Lösungsvorschlag:



Zwei kreative Ideen für PV-Anlagen zur Versorgung des E-Autos mit 1.500 kWh im Jahr

LAGE/ IDEE	VERFÜGBARE GEBÄUDE- FLÄCHE	BERECHNETE FLÄCHE DER PV-ANLAGE	TYP SOLAR- ZELLE	MAX. WIR- KUNGS- GRAD	AUS- RICH- TUNG	GLOBAL- STRAHLUNG	NEIGUNGS- FAKTOR
Carport- Dach in Köln	15 qm	14,6 qm	Polykristallin	15 %	Ostseite des Hauses	1.000 kWh / qm	90 %
Sicht- schutz- zaun Garten Mün- chen	10 m x 1,8 m = 18 qm	18 qm	Dünnschicht	13 %	Südwest- seite am Garten	1.200 kWh / qm	70 %