

TU Dresden

Fakultät Physik

Dr. Sebastian Schellhammer



*Gesellschaftliche Einordnung der Physik /
Anwendungen der Physik*

Photovoltaik

–

Technikbewertung als Teil des Physikunterrichts

im

Sommersemester 2023

vorgelegt von:

Tom Stieler

Lehramt für Berufsbildende Schulen

Metall- /Maschinentechnik und Physik

Matrikel: 4679151

tom.stieler@tu-dresden.de

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
1 Aktueller Stand der Photovoltaik	4
1.1 Ein Blick auf den Energiemarkt.....	4
1.1.1 Primärenergiebedarf.....	4
1.1.2 Ausbau der Photovoltaik.....	5
1.1.3 Volatilität und Zuverlässigkeit.....	6
1.1.4 Speicher.....	7
1.2 Technische Aspekte.....	8
1.2.1 Grundlagen solarer Strahlung.....	8
1.2.2 Photovoltaiksysteme.....	10
1.3 <i>Exkurs</i> : Bifaziale Solarzellen.....	12
2 Welt der Schüler	14
2.1 Erfahrungswelt & Beitrag zur Allgemeinbildung.....	14
2.2 Technische Bildung & Bewertung.....	16
3 Schülergerechte Aufarbeitung	17
3.1 Grundgedanken.....	17
3.2 Lernziele.....	18
3.3 Formulierung der Problemstellung.....	18
3.4 Sachlogische Strukturierung.....	19
3.5 Elementarisierung & Reihenfolge.....	20
4 Methodische Umsetzung	22
5 Unterrichtsmaterial – Themenstadtplan Dresden	25
Weiterführende Literatur	27
Literaturverzeichnis	28
Selbstständigkeitserklärung	31

Einleitung

Im Zuge des völkerrechtswidrigen Angriffs auf die Ukraine und der damit verbundenen Preissteigerungen für fossile Energieträger hat die Energiewende in Deutschland und damit die Photovoltaik (PV)¹ neuen Aufschwung bekommen: PV-Anlagen sind nicht mehr nur etwas für „Liebhaber:innen“ oder „Spinner:innen“; Beispiele finden sich im zunehmenden Maße überall im Alltag – egal ob auf privaten Dächern oder als große Freifieldanlagen bei einem Blick aus dem Zug.

Auf ihrem Weg in den Physikunterricht (PU), schränkt der Lehrplan i.d.R. die Thematik der Solarzelle auf die Halbleiterphysik (Weiterentwicklung einer Diode) ein; Unterrichtssequenzen, welche den Wirkungsgrad und den angedeuteten Beitrag zur Energiewende aufgreifen, bilden i.d.R. eher die Ausnahme.

Das Ziel der hier vorgestellten Unterrichtseinheit (UE) ist es, den Begriff der Photovoltaik im Rahmen der *Technikbewertung* zu bearbeiten: Nicht die grundlegende Physik – das Funktionsprinzip – sondern die Anwendungen i.S. der technischen Bildung soll in den Blick gerückt werden.

Aus diesem Grund wird innerhalb dieser Arbeit auf die geschichtliche Entwicklung, den Aufbau und das Wirkprinzip einer Solarzelle, dem Einstieg in die Halbleiterphysik (pn-Übergang, Diode, etc.) und auf die Betrachtung des Photoeffekts verzichtet. Stattdessen befasst sich Kapitel 1 *Aktueller Stand der Photovoltaik* mit dem Einfluss der PV auf den Energiemarkt, technischen Aspekten wie z.B. der Ausrichtung und dem Einfluss von direkter und diffuser Strahlung sowie einem Exkurs über bifaziale Solarzellen. In Kapitel 2 *Welt der Schüler* wird versucht, die UE weiter aus der Schülerperspektive zu motivieren und deren Bildungsgehalt – in Anlehnung an Klafki – unter Berücksichtigung der Aspekte technischer Bildung sowie der Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) zu erheben. Den Abschluss bilden Kapitel 3 *Schülergerechte Aufarbeitung* mit dem Versuch der Strukturierung und Elementarisierung sowie Kapitel 4 *Methodische Umsetzung*.

1 In aller Kürze: „Photovoltaikanlagen wandeln Solarstrahlung in elektrische Energie um. Die PV-Module erzeugen dabei Gleichstrom, welcher anschließend von einem Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt wird. Ein Photovoltaik-Modul besteht aus elektrisch verbundenen PV-Zellen. Photovoltaik-Zellen nutzen die Eigenschaften von Halbleitern, z. B. des heute überwiegend zum Einsatz kommenden Siliziums.“ (Felsmann [u. a.] 2020, Kap. 5.1.1)

1 Aktueller Stand der Photovoltaik

1.1 Ein Blick auf den Energiemarkt

1.1.1 Primärenergiebedarf

Um den Einsatz einer PV-Anlage hinsichtlich der Energiewende und des Energiebedarfs (z. B. eines Hauses oder eines Landes) einschätzen zu können, sind als Grundlage verschiedene Begriffe aus der Energiewirtschaft nötig, um Uneindeutigkeiten zu vermeiden:

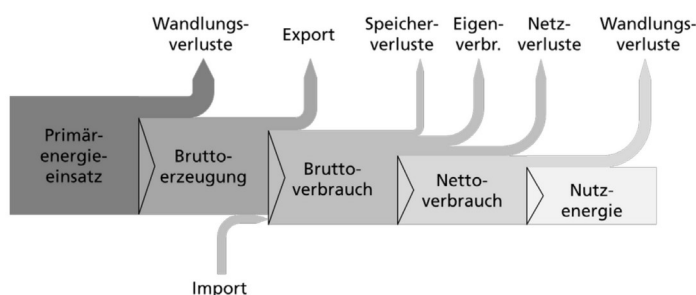


Abb. 1: Zusammensetzung der Energieformen am Energiemarkt. (Wirth 2023, Abb. 65)

Als **Primärenergie** werden alle natürlichen Energieträger bezeichnet, wie fossile Brennstoffe, Kernenergie, Biomasse und Torf. Ebenfalls [...] Sonnenstrahlung, [...] Wellen- und Gezeitenkraftwerke sowie Wind- und Wasserkraft. [...] Aus der Umwandlung von Primärenergieträgern entstehen Sekundärenergieträger. (Bohne 2019, S. 591)

Wie Abbildung 1 zeigt, erfolgen bis zur Verwendung der Nutzenergie weitere (verlustbehaftete) Umwandlungsprozesse.

Der *Primärenergiebedarf* betrug 2022 in Deutschland etwa 11.800 PJ, was umgerechnet rund 3.200 TWh entspricht und folgte damit dem langjährig abnehmenden Trend seit 2005 (vgl. Nickel 2023). Abbildung 2 veranschaulicht die Verteilung auf die jeweiligen Energieträger und verdeutlicht, dass selbst während der sogenannten Gaskrise die Erneuerbaren Energien nicht einmal ein Fünftel des deutschen Energiebedarfes decken konnten. Dies liegt u.a. daran, dass der Verkehrs- und Gebäudesektor sowie und große Teile der Industrie auf nichtelektrische Energieformen setzen (Prozesswärme, Flüssigkraftstoffe, etc.) und damit den Primärenergiebedarf dominieren (vgl. Bauer [u. a.] 2023).

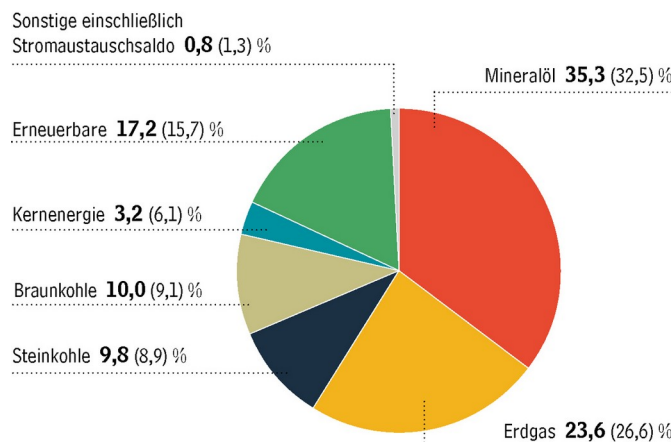


Abb. 2: Struktur des Primärenergiebedarfs in Deutschland 2022 (Vorjahreswerte in Klammern). (Nickel 2023).

1.1.2 Ausbau der Photovoltaik

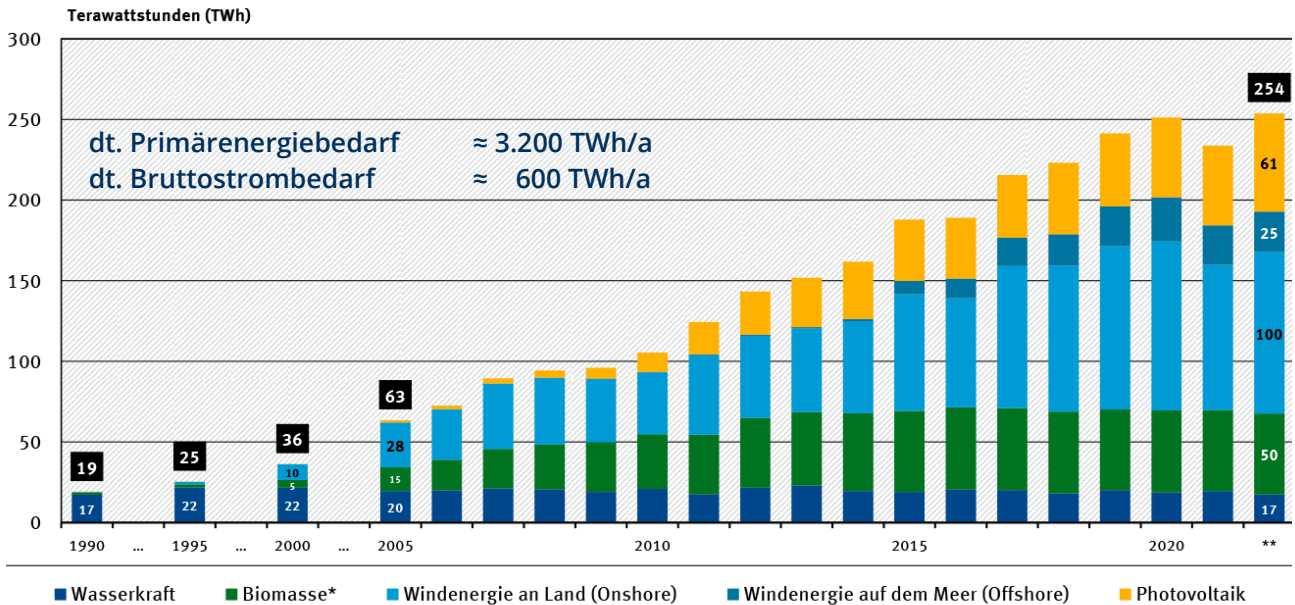


Abb. 3: Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien (Stand: 03/2023). (Umweltbundesamt 2023b)

Etwa 40% des Primärenergieanteils aus erneuerbaren Energien (≈ 200 TWh/a) entfällt auf die Bereitstellung von Wärme und wird zu großen Teilen von Biomasse bereitgestellt. Auf der anderen Seite werden rund 50% für die Stromproduktion verwendet, deren Aufschlüsselung in Abbildung 3 zu entnehmen ist: Der *Ausbau der erneuerbaren Energien* um das 13-fache seit den 1990er Jahren ist anfangs auf den Zuwachs an Biomasse und Wasserkraft zurückzuführen, später auf Windkraftanlagen und PV. Die Wasserkraft stagniert vor allem deshalb, da die wirtschaftlichen Potentiale in Deutschland erschöpft sind (vgl. Sterner; Stadler 2017, S. 525) und Biomasse gleichzeitig in Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion auf den Agrarflächen steht. Ein signifikanter Ausbau ist nicht mehr zu erwarten. Damit sind die erneuerbaren Energien in Deutschland seit einigen Jahren zum Hauptträger der Stromproduktion (46,2% am deutschen Bruttostromverbrauch 2022) aufgestiegen. (vgl. Umweltbundesamt 2023a; vgl. Umweltbundesamt 2023b)

Der massive *Zubau an installierter PV-Leistung* resultiert im Wesentlichen aus zwei Faktoren: Im Jahr 2000 trat das *Erneuerbare Energien Gesetz* (EEG) in Kraft, welches PV-Anlagen mit einer fixierten Einspeisevergütung sowie einer garantierten Stromabnahme förderte, zum anderen ist der Modulpreis je Watt

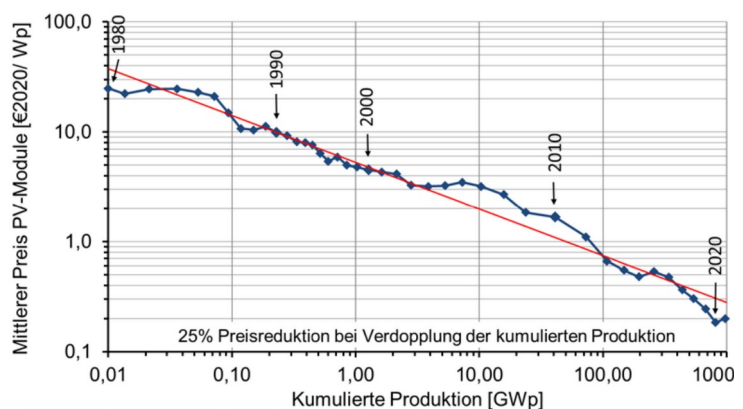


Abb. 4: Preisentwicklung für PV-Module. (Wirth 2023, Abb. 4)

Peak² seit den 1990er Jahren exponentiell gefallen – siehe Abbildung 4. Damit liegen aktuell die Stromentstehungskosten³ für PV im Bereich zwischen 3–13 ct/kWh (Freiflächenanlagen bis zu kleineren Dachanlagen) und damit in vergleichbaren Größenordnungen wie fossile Kraftwerke; durch die in Zukunft steigenden CO₂-Preise (Emissionshandel) und die voraussichtlich weiterhin sinkenden Preise für PV-Module ist abzusehen, dass in einigen Jahren PV-Anlagen signifikant geringere Stromentstehungskosten aufweisen werden als konventionelle Kraftwerke. (vgl. Wirth 2023, S. 8ff.; vgl. Kost 2021)

Nichtsdestotrotz sollte nicht angenommen werden, dass die Energiewende ohne Verteuerung und Einsparungen möglich sein wird. In ihrem Buch *Das Ende des Kapitalismus* skizziert die Wirtschaftsjournalistin Ulrike Herrmann (2022) ein wenig glanzvolles Bild der Energiewende: Das Fallen der Wind- und Solaranlagenpreise sei eine historische Ausnahme, ohne Speicher werde man nicht auskommen, diese trieben allerdings die Strompreise in die Höhe („Ökostrom ist teuer, nicht billig.“) und der Klimawandel fordere vielmehr eine Reduktion des deutschen Stromverbrauches und damit insgesamt ein Schrumpfen der Wirtschaft.

1.1.3 Volatilität und Zuverlässigkeit

Eine regelmäßig monierte Eigenschaft der Photovoltaik hinsichtlich der Energiewende ist die hohe Volatilität und damit mangelhafte Zuverlässigkeit der Energieversorgung. Das Fraunhofer ISE hält dem entgegen, dass Solarstrom sehr wohl planbar sei und gerade für einzelne Standorte oder regionale Cluster Prognoseverfahren zur Verfügung stünden und z.B. Bewölkung nur eine untergeordnete Rolle spiele: Durch die Dezentralisierung der PV-Anlagen sind lokal bedingte Strahlungseinbrüche nicht gravierend (Gesetz der großen Zahlen). (vgl. Wirth 2023, Kap. 10.2)

Gleichzeitig ergänzen sich PV und Wind:

Die mittlere relative Abweichung der Monatswerte vom gleitenden Jahreswert liegt für PV bei 53% und für Wind bei 30%. Die Summe aus PV- und Windstrom ist mit einem Wert von 14% deutlich stabiler als die einzelnen Sektoren. (ebd., S. 29)

2 Watt Peak (Wp) als abgegebene Leistung unter Standardtestbedingungen (STC): Bestrahlungsintensität 1000 W/m² (klarer Sommertag), Modultemperatur = 25°C (klarer Wintertag), Strahlenspektrum = Air Mass 1,5 (klarer Frühlingstag). (vgl. Mertens 2022, S. 34)

3 „Die Stromgestehungskosten eines PV-Kraftwerks bezeichnen das Verhältnis aus Gesamtkosten (€) und elektrischer Energieproduktion (kWh), beides bezogen auf seine wirtschaftliche Nutzungsdauer.“ (Wirth 2023, Kap. 4.1)

1.1.4 Speicher

An dieser Stelle kann lediglich eine Zusammenfassung, aber keine vollständige Abhandlung über das Gebiet der Energiespeicherung hinsichtlich der Nutzung erneuerbarer Energien gegeben werden. Für detailliertere Einblicke sei auf Sterner & Stadler (2017) und v.a. auf Kapitel 3 *Speicherbedarf in der Stromversorgung* verwiesen.

Ein allgemeiner *Speicherbedarf* ergibt sich aufgrund der zeitweisen Überdeckung des Energiemarktes respektive der Unterdeckung der Residuallast⁴ und wird primär durch den Netzausbau, das Lastmanagement, die Flexibilität der Kraftwerke und den Import / Export beeinflusst. Momentan sind PV-Anlagen (noch) nicht in der Lage, fossile Kraftwerke zu ersetzen, da gerade die Kohlekraftwerke in Deutschland für die Deckung der Grundlast ausgelegt sind und somit nicht flexibel an Schwankungen der PV-Einspeisung angepasst werden können. Da in Deutschland bisher ca. 40% des Strombedarfes aus erneuerbaren Energien stammt, werden zusätzliche Speicher derzeit in erster Linie für die Einsatzoptimierung von fossilen Kraftwerken benötigt. (vgl. ebd., Kap. 3.8)

Gleichzeitig ist die Speichernutzung in Deutschland bisher nicht lukrativ genug, da sich

Investitionen in Speicher [...] erst [lohn], wenn häufig große Preisdifferenzen für Strombezug auftreten [...]. Diese Preisspreizung schafft die Grundlage für einen rentablen Speicherbetrieb. (Wirth 2023, Kap. 10.6; Anpassung T.S.)

Mit Blick auf den *privaten Einsatz* einer PV-Anlage und der gegenwärtig niedrigen Einspeisevergütungen fördern private Energiespeicher den Eigenverbrauchsanteil und damit möglicherweise die Rendite einer solchen Anlage. Gerade Haushalte ohne Speicher haben i.d.R. Probleme, die Einspeisepeaks in der Mittagszeit zu nutzen. In dieser Hinsicht haben gewerbliche Verbraucher (und ggf. auch Schulen) den Vorteil, auch in der Mittagszeit einen entsprechend hohen Eigenverbrauch aufzuweisen.

4 „Die Residuallast ergibt sich aus dem Strombedarf abzüglich der Einspeisung erneuerbarer Energien oder allgemein als »Verbrauch minus der Einspeisung Erneuerbarer Energien«. Sie teilt sich bei einer rein erneuerbaren Stromerzeugung in Überschüsse und Defizite auf.“ (Sterner; Stadler 2017, S. 57)

1.2 Technische Aspekte

1.2.1 Grundlagen solarer Strahlung

Die Nutzung PV basiert auf den Kernfusionsprozessen im Inneren der Sonne respektive der daraus resultierenden Strahlung.

Die *Sonne* mit ihrer Oberflächentemperatur von etwa 6.000 K kann dabei als *Schwarzer Strahler* genähert werden, dessen mittlerer Abstand zur Erde rund $1,5 \cdot 10^8$ km und die insgesamt abgestrahlte Leistung ca. $3,8 \cdot 10^{26}$ W beträgt. Die Erde empfängt von dieser Leistung einen Bruchteil: Ausgehend von

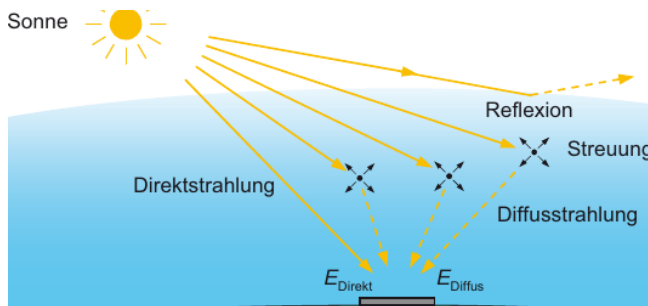


Abb. 5: Die Summe aus Direkt- und Diffusstrahlung ergibt die Globalstrahlung G_G mit $\approx 1 \text{ kW/m}^2$. (Mertens 2022, Abb. 2.4)

einer Kugel mit dem Radius Sonne-Erde verteilt sich die gesamte Strahlungsleistung auf eben jener Kugeloberfläche und ergibt damit eine Intensität von 1.367 W/m^2 – dies wird als *Solarkonstante* G_0 bezeichnet. (vgl. Hanslmeier 2020, Kap. 6.2.5)

Allerdings steht G_0 auf der Erdoberfläche für eine PV-Anlage nicht zur Verfügung! Durch die Wirkung der Atmosphäre⁵ wird ein wesentlicher Teil der Strahlung reflektiert, gestreut (Rayleigh-, Mie-Streuung) respektive absorbiert, weswegen die *Globalstrahlung* G_G in Deutschland für eine horizontal ausgerichtete Fläche mit ca. 1.000 W/m^2 angegeben wird. In Abbildung 5 ist des Weiteren gezeigt, dass sich G_G aus zwei Anteilen zusammensetzt – der *Direkt-* und der *Diffusstrahlung*. Es sei angemerkt, dass in Deutschland die Diffusstrahlung einen leicht höheren Beitrag zur Globalstrahlung leistet und der Anteil an Direktstrahlung in südlicheren Teilen der Erde zunimmt.

Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Auswirkungen von Bewölkung auf die Strahlungssummen⁶. (vgl. Mertens 2022, Kap. 2.2)

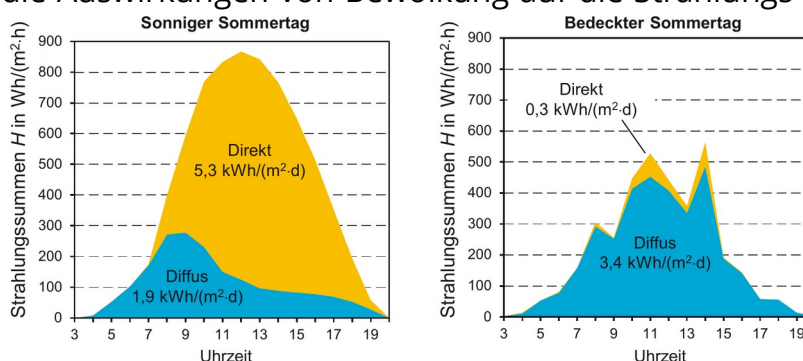


Abb. 6: Strahlungssummen an einem sonnigen und einem bedeckten Sommertag. (Mertens 2022, Abb. 2.6)

5 Um den Einfluss der Atmosphäre zu verschiedenen (Jahres-)Zeiten oder an unterschiedlichen Standorten zu beschreiben, verwendet man den Begriff „Air Mass [(AM)]: Die Zahl x gibt jeweils die Wegverlängerung gegenüber dem senkrechten Durchtritt durch die Atmosphäre an“ (Mertens 2022, S. 43; Anpassung T.S.). In Deutschland variiert die AM im Laufe des Jahres zw. 1,15–4. (vgl. ebd.)

6 Strahlungssumme als Energie pro Quadratmeter und Zeit, z.B. $\text{Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

Um höhere Strahlungssummen zu erreichen, werden PV-Module i.d.R. unter einem gewissen *Neigungswinkel* aufgestellt, wodurch die Globalstrahlung zusätzlich durch einen Anteil an reflektierter Strahlung beeinflusst wird.

- Zunächst treten positive Effekt bezüglich der *Direktstrahlung* auf: Je mehr sich der Winkel der einfallenden Strahlung der Flächennormalen nähert, desto höher ist die abgegebene Leistung des Solarmoduls – respektive bei senkrechtem Einfall erreicht die Einspeisung ein Maximum. Da die Direktstrahlung den größten Anteil am Ertrag einer PV-Anlage hat, werden Module klassischer Weise Richtung Süden aufgebaut. (vgl. ebd., Kap. 2.4.1.1)
- Für die *Diffusstrahlung* kann in grober Näherung isotroper Ansatz gewählt werden: „Ausgehend vom horizontal liegenden Generator ($\beta = 0^\circ$) verringert sich die Strahlung.“ (ebd., Kap. 2.4.1.2).
- *Reflektierte Strahlung* ist stark von der Albedo des Untergrundes abhängig.

Als Grundlage für genauere Planungen für den Bau von PV-Anlagen werden heutzutage Simulationsprogramme mit orts aufgelösten Wetterdatenbanken und genaueren Modellen betrieben (vgl. ebd., Kap. 2.4.2). Für eine erste Strahlungsabschätzung einer PV-Anlage reicht allerdings meist ein Blick in Diagramme oder Tabellen wie z.B. in Abbildung 7.

Orientierung:		Ost		Südost			Süd		Südwest			West		
		-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Neigung	Horiz.	0°	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%
		10°	83%	85%	87%	89%	90%	91%	91%	90%	88%	87%	85%	83%
		20°	82%	86%	90%	92%	95%	96%	96%	94%	92%	89%	85%	81%
		30°	81%	86%	90%	94%	97%	99%	99%	98%	96%	93%	89%	84%
		40°	78%	84%	90%	94%	98%	100%	100%	99%	97%	93%	88%	82%
		50°	74%	81%	87%	92%	96%	98%	99%	97%	95%	91%	85%	79%
		60°	70%	77%	83%	88%	92%	94%	95%	94%	91%	86%	81%	75%
		70°	64%	71%	78%	83%	86%	88%	89%	88%	85%	81%	75%	69%
		80°	57%	64%	70%	75%	79%	81%	81%	80%	77%	73%	68%	62%
Vertikal	90°	50%	56%	62%	66%	69%	70%	71%	70%	68%	64%	60%	54%	48%

Abb. 7: Relatives Jahresertragspotential in Freiburg (unverschattet). (Wirth 2023, Abb. 35)

Abbildung 7 weist implizit einige interessante Aspekte auf. Zunächst lässt sich festhalten, dass es ein Maximum in südlicher Richtung und einem Neigungswinkel von ca. 40° gibt. Es wird ebenfalls deutlich, dass moderne Solaranlagen relativ tolerant auf Abweichungen reagieren, was es ermöglicht, PV-Anlagen an vielfältigen Standorten zu installieren. Darüber hinaus motiviert dieses Verhalten einen verstärkten Ausbau von PV in Ost/West-Ausrichtung, um die Lastspitzen an den Morgen- und Abendstunden im Stromnetz besser aufzufangen und gleichzeitig die Einspeisespitzen in den Mittagsstunden zu vermeiden (siehe z.B. Bundesnetzagentur 2023). Weitere Implikationen betreffen die Frage, ob PV-Systeme starr ausgerichtet

oder nachgeführt betrieben werden sollten: Zwar können durch ausgerichtete Module höhere Jahreserträge erzielt werden, diese gehen jedoch mit höheren Investitionskosten einher und beeinflussen damit direkt die Stromerzeugungskosten, weswegen solche Überlegungen für jeden Anwendungsfall und Standort einzeln geprüft werden sollten (vgl. Wirth 2023, Kap. 21.3.1). Letztendlich spielt auch die Frage des Sonnenstandes eine Rolle: Eigentümer müssen sich überlegen, für welche Jahreszeit der Neigungswinkel optimiert werden sollte. Im Sommer nimmt die Intensität der Direktstrahlung zu, allerdings sinkt im Sommer der Energiebedarf; oder werden geringere Jahreserträge in Kauf genommen, um schließlich im Winter eine bessere Performance zu erlangen.

1.2.2 Photovoltaiksysteme

Solarzellen treten in mannigfaltigen Erscheinungsformen auf und werden i.d.R. nach der Kristallstruktur des Siliziums kategorisiert:

- *Monokristallin* – mit meist den höchsten Wirkungsgraden und Kosten, allerdings auch stärkeren Leistungsverlusten durch Alterung; Erscheinungsbild eher schwarz,
- *Polykristallin* – mit niedrigen Investitionskosten und einem bläulichem Erscheinungsbild sowie
- *Dünnschichtzellen* – mit aufgedampften Silizium; das Erscheinungsbild bietet eine gleichmäßige Oberfläche ohne Strukturierungen. (vgl. Felsmann [u.a.] 2020, Kap. 5.1.2)

PV-Anlagen bestehen aus mehreren Solarzellen, welche zunächst zu einem *PV-Modul* (ca 30–40 Stk.) zusammengeschaltet werden, um die Handhabung zu verbessern. Je nach Hersteller und Investitionskosten wird das Modul zwischen Glas-Blech-, Glas-Folie- oder Glas-Glas-Abdeckungen eingebettet, dies wirkt sich u.a. auf die Langlebigkeit und das Gewicht der Solarplatten aus. Um größere Leistungen zu erreichen, werden etwa acht einzelne PV-Module (in Reihe) zu einem *String* zusammengefasst; mehrere Strings (in Parallelschaltung) ergeben dann die eigentliche, aktive PV-Fläche. Eine *PV-Anlage* entsteht schlussendlich daraus, dass der generierte Gleichstrom über den Wechselrichter in das Stromnetz oder an direkt an den jeweiligen Verbraucher

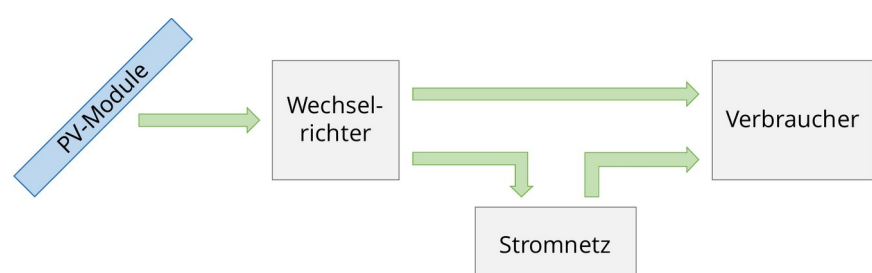


Abb. 8: Grundaufbau einer PV-Anlage. (Felsmann [u.a.] 2020, Abb. 5.3)

abgegeben wird – siehe dafür Abbildung Fehler: Verweis nicht gefunden. (vgl. ebd., Kap. 5.1.3)

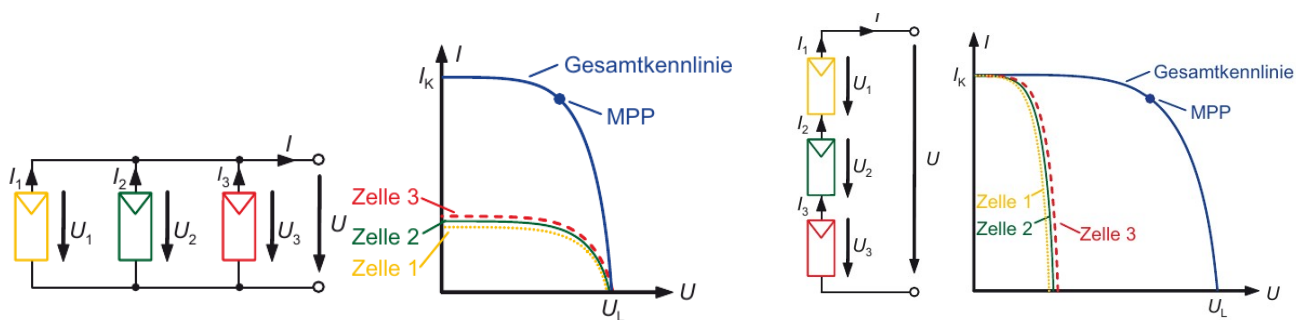


Abb. 9: Grundschaltung von PV-Zellen bzw. -Modulen: Parallel- (links) und Reihenschaltung (rechts). (Mertens 2022, Abb. 6.2 & 6.3)

Abschließend einige Kommentare zur Verschaltung und Abbildung 9. PV-Zellen werden vorzugsweise in Reihe geschaltet, um höhere Spannungen zu erreichen und damit die Verlustleistung aufgrund von Leitungswiderständen zu reduzieren. Auf der anderen Seite bietet die Parallelschaltung einen wesentlichen Vorteil bei auftretender *Verschattung*: Wird beispielsweise in einer Reihenschaltung eine einzelne Zelle verschattet, fungiert diese als Diode in Sperrrichtung mit einem massiven Widerstand und dominiert auf diese Art und Weise den Stromfluss, welcher daraufhin drastisch sinkt und damit einen starken Leistungseinbruch hervorruft. In einer Parallelschaltung wirkt die verschattete Zelle zwar ebenfalls als Sperrdiode, allerdings kann sich der Stromfluss besser die verbliebenen Zellen aufteilen, wodurch ein wesentlich geringerer Leistungseinbruch auftritt – „die Parallelschaltung reagiert also relativ gutmütig auf die Teilverschattung“ (Mertens 2022, S. 171). Um mit dem Zielkonflikt aus möglichst hoher Spannung und gutmütigem Verhalten bei Verschattung umzugehen, werden *Bypassdioden* in PV-Modulen eingesetzt. Betrachtet wird folgendes Beispiel:

Antiparallel zu jeder Solarzelle wurde eine Bypassdiode geschaltet. Solange keine Verschattung auftritt, liegt an allen Zellen eine positive Spannung an. Für die Dioden wirkt diese Spannung als Sperrspannung, sie leiten daher keinen Strom und stören somit auch nicht. Wird nun Schattie [, die verschattete Zelle] wieder zu drei Viertel verschattet, so entsteht an dieser Zelle eine negative Spannung. Diese führt dazu, dass die Bypassdiode leitet und Schattie überbrückt wird. Die restlichen [...] Zellen können daher ihren vollen Strom leiten. (ebd., S. 172; Anpassung T.S.)

Da Bypassdioden die PV-Module verteuern, wird meist ein Kompromiss eingegangen und etwa nach 12–24 Zellen in Reihe eine Bypassdiode eingesetzt. (vgl. ebd., Kap. 6.1.4)

1.3 Exkurs: Bifaziale Solarzellen

Während die klassisch industrielle Solarzelle nur von einer Seite Photon durchlassen, sind *bifaziale Solarzellen*⁷ in der Lage, Photonen ebenso auf der Rückseite eindringen zu lassen (siehe Abbildung 10) und Wirkungsgrade bis zu 20% zu erreichen. Feldtests zeigen Mehrerträge in der Einspeisung zwischen 5–30% im Vergleich zu herkömmlichen, monofazialen Solarzellen. (vgl. Electric Power Research Institute 2016)

Um die Wirksamkeit des rückseitigen Eindringens sowie einen Vergleich zwischen verschiedenen bifazialen Solarzellen zu ermöglichen, wird der *Bifazialfaktor* als Qualitätsmerkmal verwendet: Es ist das Verhältnis der maximal abzugebenden Leistung unter Standardtestbedingungen (STC) von Rück- zu Vorderseite ($P_{\text{rück}} / P_{\text{vorn}}$). Typische Werte können dabei zwischen 0,6–0,9 liegen. (vgl. Frontini [u. a.] 2019)

Um das Potential von bifazialen Solarzellen auszunutzen ist der Gesamtaufbau entscheidend. Zum einen muss eine Maximierung der diffusen Hintergrundstrahlung auf der Modulrückseite ermöglicht werden, bei dem gerade das *Befestigungssystem* auf der Rückseite so ausgelegt sein sollte, dass möglichst wenig Verschattung auftritt, weswegen die Module vorzugsweise als Glas-Glas-Variante ausgeführt werden. Früher waren v.a. die Anschlussdosen auf der Rückseite angebracht und führten zu Verschattungsproblemen, weshalb neuere Modelle inzwischen dünnere Anschlussdosen an der Seite der Module verbauen. Ebenso muss auf eine möglichst verschattungsarme Verkabelung geachtet werden. (vgl. ebd.)

Weitere Einflussfaktoren sind

- die *Albedo* des Hintergrundes,
- der *Anstellwinkel* – hier erfolgt eine Optimierung zwischen der Maximierung der Diffusstrahlung auf der Rückseite gegenüber der sinkenden Leistung auf der Vorderseite bei steigendem Anstellwinkel; i.d.R haben bifaziale PV-Anlagen ca. 20% größere Anstellwinkel als monofaziale Anlagen sowie

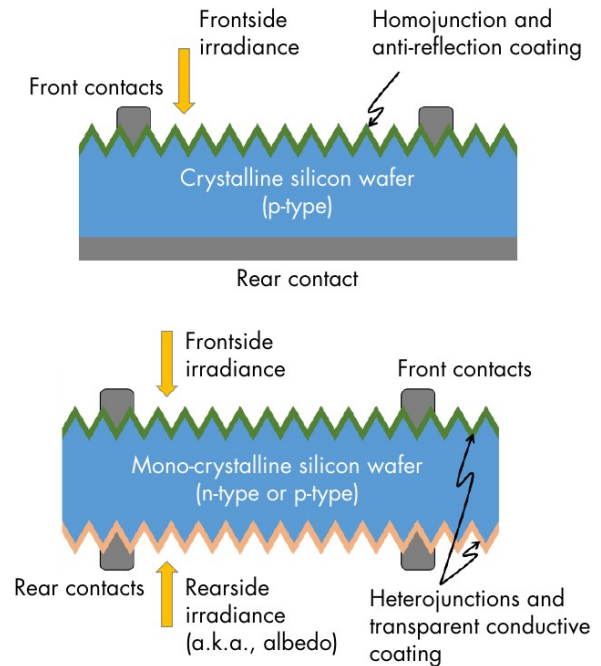


Abb. 10: Standardsiliziumzelle (oben) und bifaziale Zelle (unten). (Electric Power Research Institute 2016, Abb. 4)

⁷ Ableitung aus dem Lateinischen: *Bi* (zwei) und *Facies* (Gesicht, Gestalt). (vgl. Hemetsberger 2023)

- der *Abstand zum Hintergrund* – ebenfalls ein Optimierungsproblem: Größere Abstände versprechen zwar höhere Ertragsgewinne, fordern aber gleichzeitig aufwendigere Befestigungssysteme. (vgl. ebd.)

Zusätzlich zu den *Einsatzmöglichkeiten* monofazialer Solarzellen, bieten sich bifaziale Solarzellen z.B. für den Einsatz in der Landwirtschaft (Agri-PV) an: Da hier die horizontal liegenden PV-Anlagen weit über den Boden angebracht werden müssen und somit hohe Einstahlwerte an diffuser Strahlung erreicht werden. Eine Besonderheit ist die Verwendung als *Solarzaun* – egal ob in der Agri-PV oder als Schallschutzwand in Ballungsräumen: Bei entsprechender Ost/West-Ausrichtung der Flächen werden die Leistungsmaxima in den Vor- und Nachmittag verlegt und der Überdeckung in der Mittagszeit entgegen wirkt (siehe Abbildung 11).

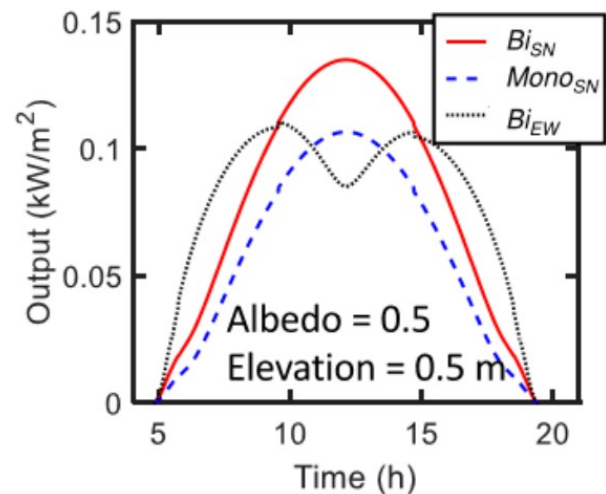


Abb. 11: Leistungsverlauf eines monofazialen südorientierten (blau), eines bifazialen südorientierten (rot) und eines bifazialen ost-/westorientierten Solarmoduls (grau). (Frontini [u.a.] 2019, Abb. 15)

2 Welt der Schüler

2.1 Erfahrungswelt & Beitrag zur Allgemeinbildung

Es gibt viele Gründe PV-Anlagen im PU zu motivieren. Die Gebäudeenergie-technik kann mit erneuerbaren Energien wie z.B. PV einen kleinen Teil zur Reduktion der CO₂-Emissionen beitragen und dabei für Schüler:innen direkt erfahrbar gemacht werden, wenn als „Gebäude“ z.B. die Schule oder das eigene Haus/die eigene Wohnung in den Blick genommen wird. An dieser Stelle soll jedoch ein anderer Aspekt beleuchtet werden – der *Klimawandel*. Um es kurz zu machen folgen nun

[d]ie fünf Kerninfos zum Klimawandel in nur 20 Worten:

1. Er ist real.
2. Wir sind die Ursache.
3. Er ist gefährlich.
4. Die Fachleute sind sich einig.
5. Wir können noch etwas tun. (Deutsches Klima-Konsortium 2022, S. 2)

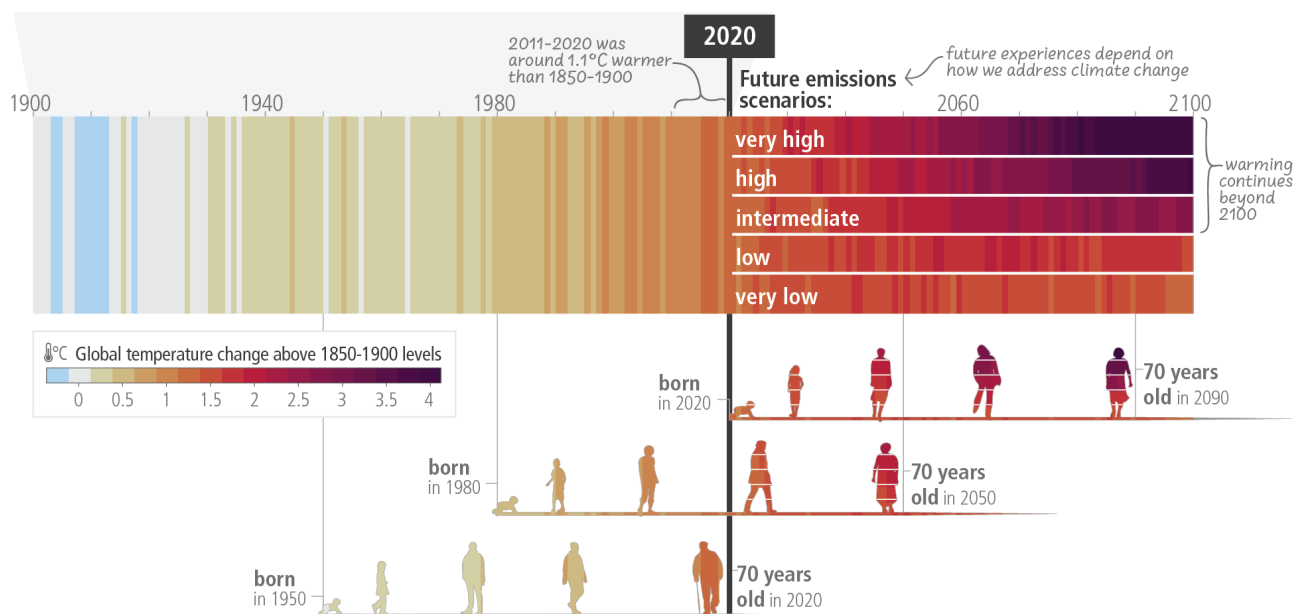


Abb. 12: Auswirkung des Klimawandels auf zukünftige Generationen. (IPCC 2023, SPM.1.c)

Der Klimawandel ist in vielen Lebensbereichen in und außerhalb der Schule Teil der Alltagserfahrungen von Schüler:innen – seien es Demonstrationen von *Fridays for Future* oder der *Letzten Generation*, die Erzählungen von Großeltern über frühere Winter, Nachrichten im Allgemeinen und natürlich die kommenden, extremen Temperatur-, Wetter- sowie Niederschlagsänderungen welche ggf. zu sozialen Ressourcenkonflikten führen. Abbildung 12 macht deutlich, dass unabhängig welches Szenario in Zukunft eintritt, der Klimawandel eindeutig Auswirkungen auf das Leben der Schüler:innen hat! (vgl. IPCC 2023, Abschn. B)

Als Beitrag zur *Allgemeinbildung* bietet die PV vor allem die Möglichkeit, den eigenen Energie- und Ressourcenverbrauch zu reflektieren, wie es auch im sächsischen Lehrplan gefordert wird:

Die Schüler[:innen] vernetzen ihr Wissen im Kontext von Fragen zur Energieversorgung. [...] Sie bewerten den Umgang mit natürlichen Energieresourcen und ziehen Schlussfolgerungen für das eigene und gesellschaftliche Handeln. (Sächsisches Staatsministerium für Kultus 2022, S. 24; Anpassung T.S.)

Wobei im Folgenden der hier herauszuarbeitende Punkt einen anderen Ansatz verfolgen soll: Als die Vereinten Nationen 2015 mit der „Agenda 2030“ die siebzehn *Sustainable Development Goals* (SDGs) ins Leben riefen, war ein wesentliches Element der Begriff der *Bildung für nachhaltige Entwicklung* (BNE) aus Ziel 4, welches

bis 2030 sicherstellen [soll], dass alle Lernenden die notwendigen Kenntnisse und Qualifikationen zur Förderung nachhaltiger Entwicklung erwerben, unter anderem durch Bildung für nachhaltige Entwicklung und nachhaltige Lebensweisen, Menschenrechte, [...] (Deutsche UNESCO-Kommission 2023b; Anpassung T.S.).

Aufgabe der BNE ist es dabei nicht, ein weltweit gültiges Curriculum zu schaffen, sondern Lernende mit den Fähigkeiten auszustatten, verantwortliche Weltbürger:innen⁸ zu sein und ökologische Nachhaltigkeit mitzudenken und dafür passende Lernumgebungen zu kreieren. (vgl. Deutsche UNESCO-Kommission 2023a)

In diesem Sinne meint BNE nicht die simple Abwandlungen reiner Lerninhalte, wie z.B. statt des Verbrennermotors eine Brennstoffzelle in einem PKW zu betrachten, sondern die Befähigung der Schüler:innen zum kritischen Denken über Zusammenhänge, Werte und Haltungen innerhalb ihrer/der Mobilität nachzudenken und diese zu bewerten.

Aus den oben genannten Punkten folgt für die hier zu diskutierende Unterrichtskonzeption über PV-Anlagen, dass sich der Unterricht nicht auf die Vermittlung von Fachwissen / Sachkompetenz beschränken darf – dies bezieht auch das „Ausrechnen“ von Kenngrößen mit ein, sondern problemorientiert die Schüler:innen darin fördern muss, PV-Anlagen und ihren Beitrag als Technologie auf die sozialökologische Transformation für eine klimagerechte Gesellschaft zu bewerten.

⁸ In der deutschen Bildungslandschaft sind in diesem Zusammenhang die Begriffe der *mündigen Bürger:innen* und der *Kompetenz* verbreitet.

2.2 Technische Bildung & Bewertung

Die Idee, den PU für die Förderung einer Kompetenz i.S. der (*Technik-*)*Bewertung* einzusetzen, ist keinesfalls neu. Die Kultusministerkonferenz (KMK) hat u.a. das „Wechselspiel mit Technik und Gesellschaft“ als einen wichtigen Bildungsbeitrag des Faches Physik beschrieben und explizit auf die Problemstellungen der Energieversorgung sowie des Klimawandels verwiesen (vgl. 2020, S. 11).

Eine geeignete Definition für die weitere Betrachtung liefert die VDI 3780. Dort wird der Begriff *Technik* verstanden als

- die Menge der nutzenorientierten, künstlichen, gegenständlichen Gebilde (Artefakte oder Sachsysteme),
- die Menge menschlicher Handlungen und Einrichtungen, in denen Sachsysteme entstehen,
- die Menge menschlicher Handlungen, in denen Sachsysteme verwendet werden. (VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2000, S. 2)

Es wird deutlich, dass sich Technik v.a. durch die zielgerichtete Veränderung der Umwelt von der allgemeinen Naturwissenschaft abgrenzt, da letztere „lediglich“ die Natur zu beschreiben versucht. Der verbreiteten Vorstellung, nach welcher Naturwissenschaft und Technik identisch seien, muss dahin gehend widersprochen werden, dass Physik und Technik z.T. Kompetenzbereiche adressieren, welche zwar Überschneidungen, aber eben auch Unterschiede aufweisen. So zeichnet sich die technische Bildung z.B. durch Tätigkeiten des Konstruierens und Optimierens aus, die Naturwissenschaften eher durch Experimentieren und das Einnehmen von kausalen Perspektiven. Nicht zuletzt zeichnet sich die technische Bildung durch einen Fokus auf die sog. *Handlungskompetenz* aus, wonach Lernende befähigt werden sollen, an der Gestaltung der Umwelt teilzunehmen und demnach hervorragend zu den obengenannten Zielen der BNE passt. (vgl. Friege; Bresges 2022)

Um eine Förderung der Bewertungskompetenz in den Unterricht einfließen lassen zu können, sei zunächst wieder auf die VDI 3780 verwiesen, wonach *Technikbewertung* definiert wird als

- das planmäßige, systematische, organisierte Vorgehen, das
- den Stand einer Technik und ihre Entwicklungsmöglichkeiten analysiert,
 - [...] Folgen und möglicher Alternativen abschätzt, [...]
 - Handlungs- und Gestaltungsmöglichkeiten daraus herleitet [...]. (VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2000, S. 2f.)

Mithilfe dieser Definition soll im Folgenden versucht werden einen entsprechenden Lernbereich für das Thema der PV zu strukturieren.

3 Schüलगerechte Aufarbeitung

3.1 Grundgedanken

Ausgearbeitete Unterrichtskonzepte, welche sich grundständig oder forschungorientiert mit Solarzellen beschäftigen sind heutzutage in ausreichender Zahl vorhanden und – wie oben dargelegt – nicht Gegenstand dieser Arbeit. Entsprechende Beispiele dafür liefern u.a.:

- Schlosser & Bartosch (2020), die sich der Solarzelle mit deren physikalischem Hintergrund, dem Photoeffekt und ihrem Aufbau i.S. der Halbleiterphysik widmen.
- Bei Tran & Kraus (2012) steht im Rahmen eines Schüler:innenprojektes ein geophysikalisch-mathematisch, forschungorientierter Erkenntnisgewinn im Vordergrund – mit Experimenten zur Winkelabhängigkeit der Einstrahlung, dem Einfluss des Tagbogens und der Nachführung.
- Wolfrum & Fösel (2016) versuchen sich dem Themenkomplex erneuerbare Energien (Wind und PV) und Energiespeichertechnologien (Wasserstoff) mit dem Entwurf eines energieautarken Modellhauses zu nähern und hierbei Technologien, Funktionsweisen sowie Wirkungsgrade unterzubringen.

Als Zielgruppe der UE dient die Klassenstufe 9 des Gymnasiums, hier werden mit dem *Lernbereich 1: Grundlagen der Elektronik* die Voraussetzungen zum Verständnis einer Solarzelle gelegt und durch *Wahlbereich 2: Energie von Wind und Sonne* die Möglichkeit geboten, die Diskussionen zur Energiewende mit dem Einsatz erneuerbarer Energiequellen abzurunden (vgl. Sächsisches Staatsministerium für Kultus 2022, Abschn. Klassenstufe 9)

Die Schüler:innen sollten vor Durchführung der hier beschriebenen UE verschiedene (*Lern-)*Voraussetzungen erfüllen, die ggf. in den vorhergehenden Unterrichtsstunden behandelt wurden:

- Kernelemente der *Energiewende* und des *Klimawandels*⁹ sind bekannt und können erläutert werden.
- Schüler:innen müssen mit dem *Aufbau und der Funktionsweise von Solarzellen* vertraut sein und die Bestandteile einer PV-Anlage kennen.

⁹ Hier bietet sich u.a. das *Regionale Klimainformationssystem für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen* (ReKIS) an, um Schüler:innen für die regionalen Auswirkungen des Klimawandels zu sensibilisieren (vgl. TU Dresden o. J.).

- Die Schüler:innen müssen mit dem Terminus *Energie*¹⁰ umgehen können. Nach Schecker et al. (2018) ist gerade der Energiebegriff für Schüler:innen nicht immer einfach zu verstehen und birgt in Kombination mit der Alltagssprache (z.B. „Energieverbrauch“) zahlreiche Stolpersteine: Die Schüler:innen sollten demnach Energieformen und deren Umwandlung (mit „Verlust“ als ungewollte Umwandlung) beschreiben und ggf. Bilanzen mittels Energieflüssen durchdenken können.

3.2 Lernziele

Die Schüler:innen ...

- A) sammeln Informationen über den Energiebedarf („Energieverbrauch“) in privaten Haushalten sowie dessen Größenordnungen und können die Fachbegriffe Energie, Energieformen, Leistung, (Strahlungs-)Intensität, Gleich- und Wechselspannung anwenden. (K1, K3)¹¹
- B) entwickeln und bewerten Handlungsoptionen mittels (selbst-)gewählter Kriterien und physikalischer Einflussfaktoren für den Einsatz einer PV-Anlage auf dem heimischen Dach und können sich über den eigenen Standpunkt austauschen und reflektieren. (K9, B3)

Anhand der Lernziele wird eine entsprechende Problemstellung entwickelt.

3.3 Formulierung der Problemstellung

Deine Eltern und du seid letztes Jahr umgezogen und nun haben deine Eltern ihre erste Stromkostenrechnung eurer Vermieterin bekommen, in der ihnen u.a. mitgeteilt wird, wie viel Strom sie pro Monat verbraucht haben. Deine Eltern können mit den Zahlen nicht viel anfangen: „Ist das viel? Oder wenig?“

Außerdem haben sie gehört, dass Wirtschaftsminister Habeck wegen der steigenden Gaspreise alle zum Energiesparen aufgerufen hat und der Nachbar über eine Balkonsolaranlage nachdenkt, um seinen Eigenverbrauch zu decken.

Leider sind deine Eltern keine Experten auf diesem Gebiet und fragen sich, ob ihr euch ebenfalls eine Solaranlage zulegen solltet, wie teuer das ist und inwiefern sich dies lohnen würde. Hilf deinen Eltern!

10 Die KMK sieht (Energie-)Erhaltung und Gleichgewicht als *Basiskonzepte* der Physik. (vgl. Kultusministerkonferenz 2020, Kap. 2.5)

11 Formuliert in Anlehnung an die *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife* (siehe Kultusministerkonferenz 2020).

Aus der Problemstellung lassen sich u.a. folgende *Teilaspekte* ableiten:

- Welche Informationen können aus der Stromkostenrechnung gezogen werden, welche z.B. die PV-Anlage betreffen?
- Wie groß ist der Energiebedarf anderer Familien respektive privater Haushalte? Wo könnten entsprechende Daten erfragt oder erhoben werden?
- Welche Faktoren begünstigen eine PV-Anlage und welche schränken sie ein? Welche Rahmenbedingungen gelten für den Aufbau einer solchen Anlage?
- Welche Kriterien müssen erfüllt werden, damit die sich die PV-Anlage im heimischen Einsatz „lohnt“?!

3.4 Sachlogische Strukturierung

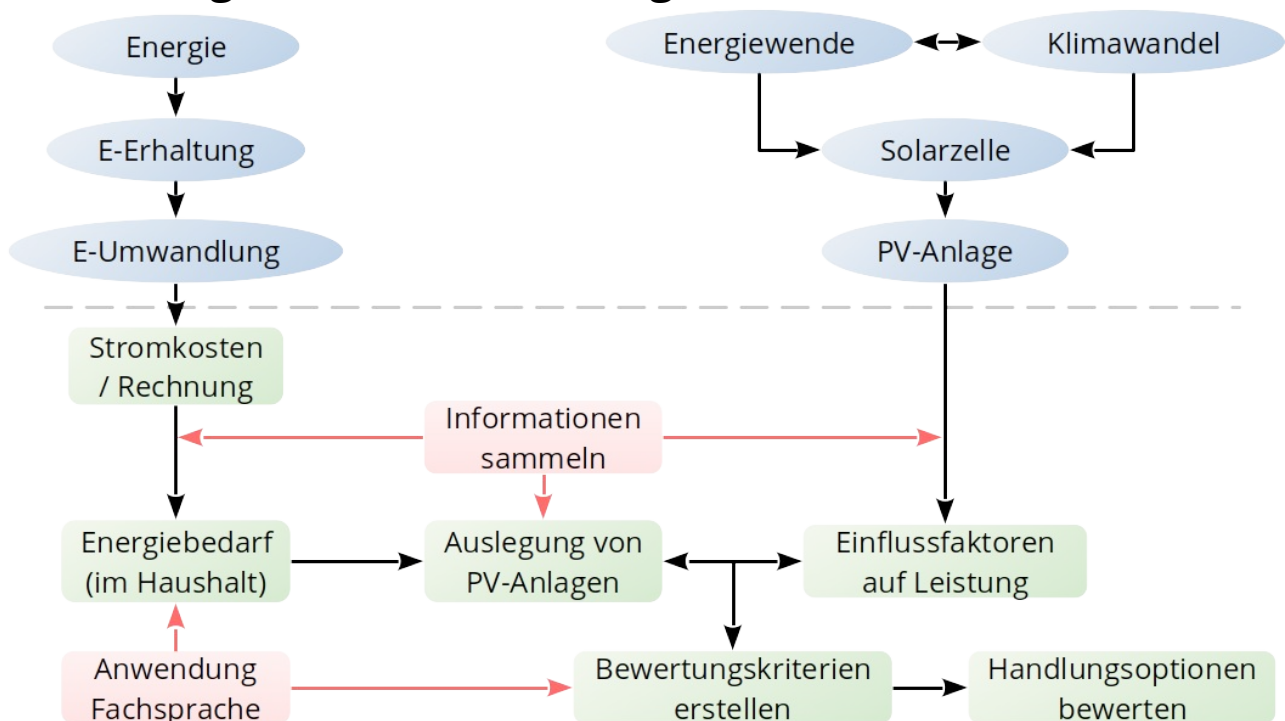


Abb. 13: Sachstrukturdiagramm zur *Bewertung einer PV-Anlage* mit Lernvoraussetzungen (blau) und Lernzielen oder Teilaspekten der Problemstellung (grün und rot).

In Anlehnung an Kircher & Girwidz (2010) zeigt Abbildung 13 eine mögliche sachlogische Strukturierung¹² geteilt in Lernvoraussetzung und Lernziele. Die Lernvoraussetzungen bilden zwei Zweige: Mit der Energie als Ausgangspunkt ist eine Überleitung zu den Stromkosten und dem Energiebedarf des Haushaltes möglich, mit deren Hilfe die Auslegung der PV-Anlage erfolgen kann. Auf der anderen Seite steht mit dem Klimawandel eine starke Motivation für den Einsatz der Solarzelle, welche zur PV-

12 „In einem Sachstrukturdiagramm sind sachlogische Zusammenhänge dargestellt, die sich aus dem Aufbau der Physik ergeben. [...] Wissensstrukturierung bedeutet die Organisation und Vernetzung von kognitiven Elementen. [...] Detailwissen muss vernetzt sein, damit Zusammenhänge erschlossen werden können.“ (Kircher; Girwidz 2010, Kap. 2.5.1 & 19.4.4)

Anlage führt. Die Schüler:innen müssen hierbei Informationen erhalten/sammeln, womit sie eine adäquate Bewertung der PV-Anlage erstellen können. Das Lernziel Fachsprache ist in Abbildung 13 v.a. der Vollständigkeit halber eingetragen und müsste genuin mit allen Feldern verbunden sein, darauf wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

3.5 Elementarisierung & Reihenfolge

Die Kombination aus sachlogischer Strukturierung und der Sachanalyse führt zur Elementarisierung der *relevanten Inhalte*:

- Energieumwandlungen sind immer mit einer Entwertung der nutzbaren Energie verbunden. Der „Energiefluss“ in Energieumwandlungsketten wird mit jeder Umwandlungsstufe etwas kleiner (siehe Abb. 1).
- Bei dezentraler (= weitflächiger Nutzung) von PV fallen regional, kurzfristige Schwankungen nicht ins Gewicht, dennoch benötigt der Einsatz von PV-Anlagen wegen langfristiger Schwankungen (z.B. Tag-Nacht) den Einsatz von *Speichern*.
- Die Globalstrahlung setzt sich aus Direkt- und Diffusstrahlung zusammen. Anhand der Direktstrahlung werden PV-Module ausgerichtet. Das Optimum – mit dem Ziel möglichst senkrechten Lichteinfalls – liegt in Deutschland in südlicher Richtung mit einer Neigung von ca. 40°.
- Die Auslegung einer PV-Anlage erfolgt z.B. anhand der zur Verfügung stehenden Flächen, der zu erzielenden Leistung, der möglichen Verschattung und wirtschaftlichen Aspekten (Kosten, Einspeisevergütung).

Es scheint angemessen unter Bezug auf Abbildung 13 folgende *Reihenfolge* für die UE einzuhalten:

- (1) Kalkulation des heimischen Energiebedarfes (pro Jahr).
- (2) Einfluss der Ausrichtung einer PV-Anlage auf zu erbringende Leistung.
- (3) Neigung und Ausrichtung von Dachflächen recherchieren und maximal mögliche Leistung berechnen.
- (4) Zielvorstellung entwickeln und Bewertungskriterien aufstellen.
- (5) Begründete Handlungsoption ableiten.

Mit (1) wird zunächst eine Grundlage für die Auslegungsgröße der späteren PV-Anlage ermittelt. Des Weiteren bietet dies Potential für die Wiederholung des Energiebegriffs und damit einen „sanften“ Einstieg für die Schüler:innen. Gleichzeitig kann so ein Alltagsbezug zur Lebensrealität der Schüler:innen gezogen werden. Das Wissen um

Solarzellen wird in (2) reaktiviert und erweitert, um eine Grundlage für (3) zu liefern und eine erste Einschätzung des PV-Potentials zu erheben. Die Bewertung der Dachfläche sollte einen zentralen Teil des Unterrichts einnehmen und als Einstieg in die technische Bewertung dienen. Mit dem Wissen um die „Zielgröße“ und des Potentials können dann in (4) Bewertungskriterien aufgestellt werden – da es sich um eine UE i.S. der BNE handelt, sollten soziale und ökologische Aspekte nicht vernachlässigt werden, welche schlussendlich zu (5) einer Handlungsoption führen.

4 Methodische Umsetzung

Auf Basis der vorgeschlagenen Reihenfolge zeigt Tabelle 1 einen skizzenhaften Unterrichtsverlaufsplan für zwei Doppelstunden (à 90min) inklusive zweier Haus- respektive Vorbereitungsaufgaben.

Die Bearbeitung der Problemstellung erfolgt in *Partner:innenarbeit*, da es sich motivational anbietet, die Aufgaben nicht allein sondern in einer Gruppe zu bewältigen. Da die Schüler:innen vorrangig kollaborativ (i.S. jede:r macht alles) und nicht nur kooperativ (jede:r macht einen Teil) zusammenarbeiten sollen, dürfen die Gruppen nicht zu groß ausfallen.

Da der Fokus der UE auf der technischen Bewertung und nicht auf der Entwicklung der Lern- und Recherchekompetenz liegt, wird ein *selbsttätiges Lernarrangement* favorisiert, in denen die Schüler:innen für jeden Aufgabenteil vorbereitetes Informationsmaterial und Handlungsanweisungen z.B. in Form von Arbeitsblättern durch die Lehrperson erhalten. Als eine Möglichkeit der Differenzierung nach dem Leistungsniveau erhalten die Schüler:innen, wenn sie die Teilaufgabe nicht lösen können, einen „Tipp“, der als vorbereitete Kopie / Text vorliegt und eine Hilfestellung beim Vorgehen enthält – z.B. in dem ein möglicher Ablauf (ohne konkrete Inhalte) zum Lösen der Aufgabe angegeben wird. Dies kann auch mehrstufig erfolgen.

Die Schüler:innen haben zwei Möglichkeiten, den *Energiebedarf* des gewählten Haushaltes zu ermitteln: Zum einen können sie eigene Stromrechnungen von zu Hause auswerten und mit diesen Zahlenwerten arbeiten. Falls einige Eltern aus Datenschutzgründen, etc. gegen die Verwendungen der privaten Stromrechnungen sind oder einige Schüler:innen diese Hausaufgabe vergessen haben, bietet sich eine Schätzung über den durchschnittlichen Stromverbrauch deutscher Haushalte an, wie ihn z.B. das Statistische Bundesamt (2022) anbietet.

Für die *Ermittlung des PV-Potentials* existieren unterschiedliche Möglichkeiten, die Dachneigung zu berechnen: Die Schüler:innen könnten (z.B. in Kombination mit dem Mathematikunterricht) den Strahlensatz für Dreiecke anwenden, um aus Höhe des Daches und der Breite des Schulhauses die Dachneigung abzuleiten. Dies benötigt allerdings mehr Zeit, da die Schüler:innen sicherlich einen Großteil der Unterrichtsstunde zum Messen und Rechnen benötigen würden. Eine verkürzte Variante könnte die Nutzung von Fotos oder Satellitenbildern einschließen, spräche u.U. aber auch nur die mathematisch versierten Schüler:innen an. Über Verwendung von Tabellen wie in Abbildung 7 könnte eine Abschätzung der Strahlungssummen erfolgen. Allerdings umfassen beide Methoden eher kleinschrittige Rechnungen und lenken den Fokus

von der eigentlichen Bewertungsaufgabe – nichtsdestotrotz bietet sich diese Variante für leistungsstarke Schüler:innen an (Differenzierung nach *Leistungsniveau*). Im Folgenden liegt der Fokus auf der Verwendung des Themenstadtplans Dresdens (siehe Kapitel 5 *Unterrichtsmaterial – Themenstadtplan Dresden*).

Bei der Zusammenstellung eigener *Bewertungskriterien* sollen die Schüler:innen für sich die Frage beantworten: „Was ist uns für die PV-Anlage wichtig?“. Bei unterschiedlichem *Lerntempo* bietet es sich ggf. an, gegen Ende des UE einen zeitlichen Puffer einzuplanen: Langsamere Schüler:innen können verstärkt Unterstützung bei der Formulierung von Bewertungskriterien erhalten und somit die Findungsphase verkürzen. Schnellere Schüler:innen werden angeregt, die Bewertungskriterien zu gewichten und z.B. in tabellarischer Form ein Notensystem aufzustellen. Anschließend erhalten die Schüler:innen Datenblätter verschiedener PV-Systeme (Kosten, Fläche je Modul, ...) um eine freigewählte Entscheidung zu treffen, welches sie aus Zeitgründen nicht der gesamten Klasse sondern jeweils zwei anderen Gruppen vorstellen werden.

Schlussendlich sammeln die Schüler:innen während der UE ein Portfolio aus eigenen Unterlagen sowie den zur Verfügung gestellten Informationen an – also kontextualisiertes Wissen (hier: Alltagsbezug, technische Bildung).

Zeit	Inhalt	Lehrer- (L) / Schüler:innentätigkeit (S)	Material
-	Hausaufgabe / Vorbereitung	S bitten, wenn möglich (alte) Stromrechnungen von zu Hause mitzubringen bzw. Eltern nach monatlichem / jährlichem Energieverbrauch zu fragen	Stromrechnung
10'	Einleitung	L: Begrüßung. Kurze Wiederholung des letzten PU über Solarzellen, Klimawandel und Energiewende. Überleitung zum neuen Thema für die kommenden zwei Wochen.	ggf. Tafel, etc.
15'	Arbeitsauftrag	S: Einteilung in zweier Gruppen. Durchlesen des Arbeitsauftrages. Entscheidung für eine Wohnung / ein Haus eines Gruppenmitgliedes. L: Fragen klären, Vorgehen erklären.	Arbeitsauftrag als Arbeitsblatt (AB) resp. an interaktiver Tafel
25'	Energiebedarf	S: Kalkulation des elektrischen Jahresenergiebedarfes im Haushalt. → <i>Zielvorstellung für Auslegung der PV-Anlage!</i>	AB, Stromrechnung, Statistisches Bundesamt
40'	PV-Potential	S: Berechnung der maximal zu erbringende Leistung der PV-Anlage (Berücksichtigung der Ausrichtung, Dachfläche und -neigung, Verschattung und der örtlichen Globalstrahlung).	AB, Handy, PC, Themenstadtplan, ...
-	Vorbereitung	S: optionale Hausaufgabe: Überlegen von möglichen Bewertungskriterien für PV-Anlage	-
5'	Einstieg	Einfinden in den Gruppen.	-
25'	Bewertungskriterien	S: Sammeln und diskutieren von Bewertungskriterien und evtl. Gewichtung in der Gruppe.	AB
30'	Handlungsoption	S: Anhand der Bewertungskriterien und der gesammelten Informationen eine begründete Entscheidung für/gegen eine PV-Anlage treffen	AB, Datenblätter für verschiedene PV-Systeme
30'	Diskussion	S: Austausch über getroffene Entscheidungen mit jeweils zwei anderen Gruppen L: ggf. Moderation	Eigene Unterlagen

Tab. 1: Unterrichtsverlaufspln über zwei Doppelstunden (à 90min).

5 Unterrichtsmaterial – Themenstadtplan Dresden

Für die Erarbeitung des PV-Potentials auf der selbstgewählten Dachfläche der Schüler:innen kommt der *Themenstadtplan Dresden – Solarpotential* zum Einsatz. Wie Abbildung 14 zeigt, können mit Hilfe einer klassischen Kartenanwendung im Browser durch das Auswählen der gewünschten Dachfläche z.B. Informationen über Eignung, Einstrahlung und Modulfläche des Daches ausgelesen werden. Die Daten stammen aus einer Potentialstudie¹³ des Leibniz-Instituts für ökologische Raumentwicklung für die Stadt Dresden und haben Einstrahlungsmodellierungen der TU München als Grundlage. (vgl. Amt für Geodaten und Kataster (Landeshauptstadt Dresden) 2019).

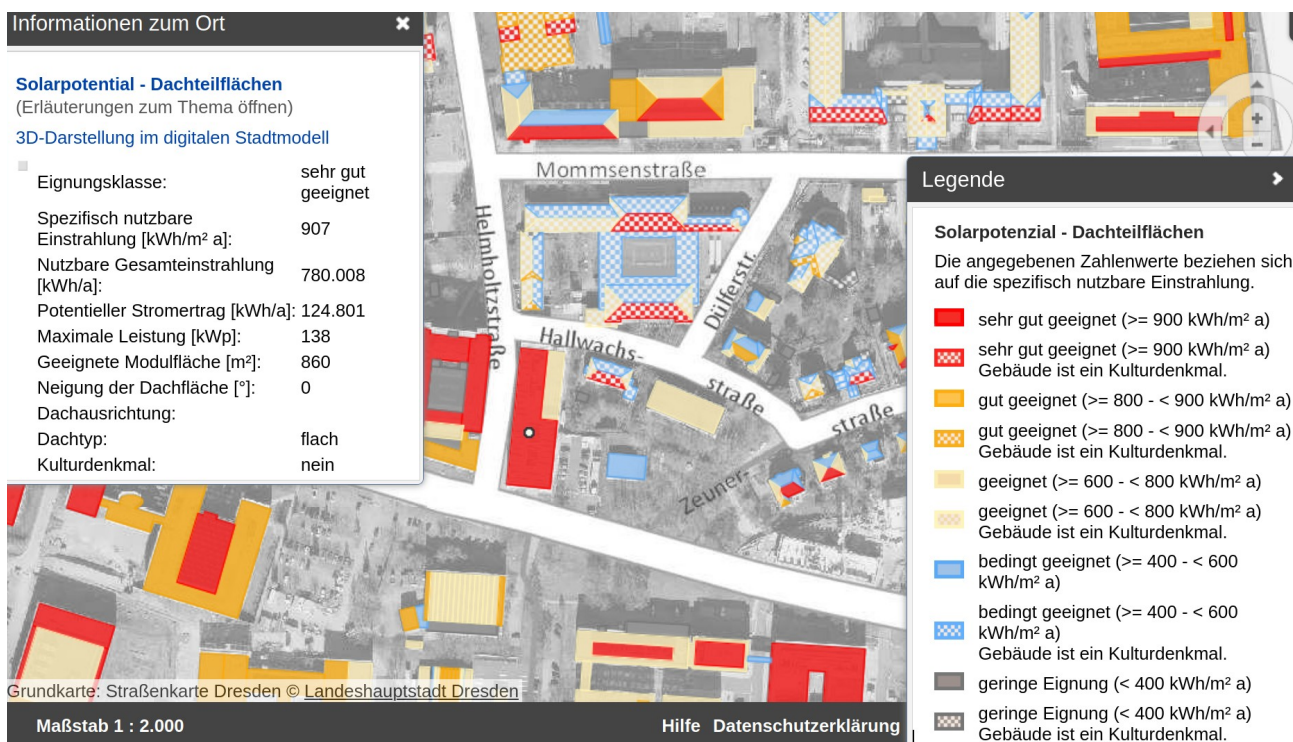


Abb. 14: Ausschnitt aus dem *Themenstadtplan Dresden – Solarpotential* für den Herrmann-Krone-Bau der TU Dresden. *Links*: Angaben über das Solarpotential des ausgewählten Daches. *Rechts*: Legende für die Farbgebung der Dachflächen. (Amt für Geodaten und Kataster (Landeshauptstadt Dresden) 2019)

Mit der Nutzung des Themenstadtplans erfolgt eine interaktive, schnelle und anschauliche Erarbeitung des PV-Potentials, welche – passend zur Problemstellung – auch zu Hause von den Schüler:innen genutzt werden kann, um ihren Eltern die Eignung oder Nichteignung der eigenen Dachfläche zu erklären. Wichtig ist, dass die Schüler:innen angeregt werden, über die Angaben „Potentieller Stromertrag [kWh/a]“ und die „Maximale Leistung [kWp]“ (siehe Abb. 14) kritisch zu reflektieren und mit den Parametern der vorgegebenen PV-Anbieter zu vergleichen.

Exemplarisch soll nun die *Aufgabenstellung* als Material gezeigt werden.

¹³ Für ausführlichere Informationen sei auf die Folgestudie *Auf dem Weg zur klimaneutralen Stadt 2030 - Quantifizierung des urbanen Solarpotenzials der Landeshauptstadt Dresden* von Behnisch et al. (2022) verwiesen.

(2) Ermittlung des Potentials der Photoaltaikanlage

Nachdem ihr aus Aufgabe (1) wisst, wie hoch eurer Bedarf an elektrische Energie im Jahr ist, gilt es herauszufinden, wie viel Ertrag eure Anlage im Idealfall liefern kann.

Die theoretischen Grundlagen findet ihr im Informationsheft auf Seite XY.

Da wir im Unterricht nicht genügend Zeit haben, eine eigene Messungen vorzunehmen oder komplexe Modellierungen anzustellen, verwenden wir den Themenstadtplan Dresden:

www.themenstadtplan.dresden.de (→ QR-Code)

Über die Reiter → *Themen* → *Umwelt* → *Klimaschutz & Energie*
→ *Solarpotential* → *Solarpotential - Dachteilflächen*

könnt ihr einer interaktive Karte Dresdens öffnen, welche das Potential der Solareinstrahlung in Dresden zeigt.



Aufgabenstellung für euch (etwa 35min):

1. Macht euch mit der Karte vertraut.
Was bedeuten z.B. die unterschiedlichen Farben? Welche physikalischen Größen werden angezeigt, wenn eine Dachfläche ausgewählt wird?
2. Sucht eure gewählte Dachfläche in Dresden und lasst euch die Messdaten anzeigen. Welche Daten benötigt ihr, um den möglichen Ertrag an elektrischer Energie einer PV-Anlage abzuschätzen? Tipp: Evtl. muss man auch etwas rechnen ;-)
3. Notiert die relevanten Werte.
4. *Optional:*
Vergleicht eure gewählte Dachfläche mit anderen Dachflächen in Dresden. Gibt es Unterschiede der Einstrahlwerte? Warum könnte dies liegen?

In Vorbereitung auf nächste Woche könnt ihr euch schon überlegen, welche wie eine PV-Anlage bewertet werden kann. Welche Kriterien würdet ihr wählen?

Weiterführende Literatur

Für tiefergehendes Interesse sei auf folgende Quellen verwiesen:

Bücher & Artikel

- *Mertens, Konrad: Photovoltaik – Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis. 2022.*
→ anschauliches und ausführliches Grundlagenbuch, [in der SLUB zu finden](#).
- *Deutsches Klima-Konsortium et al.: Was wir heute übers Klima wissen - Basisfakten zum Klimawandel, die in der Wissenschaft unumstritten sind. 2022*
→ kompakte Zusammenfassung zur Thematik, [online als PDF abrufbar](#).
- *Wirth, Harry: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg: Fraunhofer ISE: 2023.*
→ nicht immer schön formatierte Zusammenfassung, wird regelmäßig aktualisiert, [online als PDF abrufbar](#).
- *Plus Lucis: Umweltbildung für nachhaltige Entwicklung. Ausgabe 3/2020.*
→ Zeitschrift des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts (VFPC) aus Österreich, erscheint viermal im Jahr. [Alle Ausgaben online abrufbar](#).

Internetseiten

- [Klimafakten.de](#)
→ Basisfakten sowie Argumentationshilfen zu den häufigsten klimaskeptischen Aussagen.
- [PVeducation.org](#)
→ „A collection of resources for the photovoltaic educator“. Gute englischsprachige Internetseite, auch für Schüler:innen geeignet.

Literaturverzeichnis

- Amt für Geodaten und Kataster (Landeshauptstadt Dresden) (2019): Themenstadtplan Dresden - Solarpotenzial. URL: <https://stadtplan.dresden.de/> - Download vom: 24.07.2023.
- Bauer, Jakob; Blickle, Paul; Ehmann, Annick [u. a.]: Energiemonitor: Die wichtigsten Daten zur Energieversorgung – täglich aktualisiert. In: 06.07.2023. URL: <https://www.zeit.de/wirtschaft/energiemonitor-deutschland-gaspreis-spritpreis-energieversorgung> - Download vom: 06.07.2023.
- Behnisch, Martin; Hladik, Dirk; Münzinger, Markus [u. a.]: Auf dem Weg zur klimaneutralen Stadt 2030 – Quantifizierung des urbanen Solarpotenzials der Landeshauptstadt Dresden. Meinel, G.; Krüger, T.; Behnisch, M. [u. a.] (Hrsg.): In: Flächennutzungsmonitoring XIV: Beiträge zu Flächenmanagement, Daten, Methoden und Analysen Jg. 80 / 2022, S. 239–249.
- Bohne, Dirk: Technischer Ausbau von Gebäuden: und nachhaltige Gebäudetechnik. 11., aktualisierte Auflage., Heidelberg: Springer Vieweg: 2019.
- Bundesnetzagentur (2023): SMARD | Marktdaten visualisieren. URL: <https://www.smard.de/home/marktdaten> - Download vom: 09.07.2023.
- Deutsche UNESCO-Kommission (2023a): Agenda Bildung 2030: Bildung und die Sustainable Development Goals. URL: <https://www.unesco.de/bildung/agenda-bildung-2030/bildung-und-die-sdgs> - Download vom: 01.07.2023.
- Deutsche UNESCO-Kommission (2023b): Bildung für nachhaltige Entwicklung. URL: <https://www.unesco.de/bildung/bildung-fuer-nachhaltige-entwicklung> - Download vom: 01.07.2023.
- Deutsches Klima-Konsortium: Was wir heute übers Klima wissen - Basisfakten zum Klimawandel, die in der Wissenschaft unumstritten sind. Deutsche Meteorologische Gesellschaft; Deutscher Wetterdienst; Extremwetterkongress Hamburg [u. a.] (Hrsg.): 2022. URL: <https://www.klimafakten.de/meldung/was-wir-heute-uebers-klima-wissen-basisfakten-zum-klimawandel-die-der-wissenschaft> - Download vom: 15.03.2023.
- Electric Power Research Institute (Hrsg.): Bifacial Solar Photovoltaic Modules / Program on Technology Innovation. 2016. URL: <https://www.epri.com/research/products/00000003002009163> - Download vom: 31.05.2023.
- Felsmann, Clemens; Rühling, Karin; Volmer, V. [u. a.]: Integration Regenerativer Energiesysteme in das Stadtbild: Ergänzendes Grundlagendokument zum Leitfaden für regenerative Energien im Stadtbild / Photovoltaik, Solarthermie, Luft-Wasser-Wärmepumpe. Dresden: 2020.
- Friege, Gunnar; Bresges, André: Technik – ein Thema für Physiklehrkräfte. In: Naturwissenschaften im Unterricht - Physik Jg. Physik&Technik / 2022, Heft 189/190, S. 4–7.

- Frontini, Francesco; Caccivio, Mauro; Renken, Christian: Leitfaden bifaziale Module: Anwendung von bifazialen Solarmodulen – Einsatzmöglichkeiten an Gebäuden, Dimensionierung der Anlagenkomponenten. EnergieSchweiz (Hrsg.): 2019.
- Hanslmeier, Arnold: Einführung in Astronomie und Astrophysik. 4. Auflage., Berlin [Heidelberg]: Springer Spektrum: 2020.
- Hemetsberger, Paul (2023): facies | Übersetzung Latein-Deutsch. URL: <https://dela.dict.cc/?s=facies> - Download vom: 09.07.2023.
- Herrmann, Ulrike: Das Ende des Kapitalismus: Warum Wachstum und Klimaschutz nicht vereinbar sind – und wie wir in Zukunft leben werden. 2. Auflage., Köln: Kiepenheuer & Witsch: 2022.
- IPCC: AR6 Synthesis Report – Summary for Policymakers. Geneva: IPCC: 2023. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> - Download vom: 13.07.2023.
- Kircher, Ernst; Girwidz, Raimund: Physikdidaktik: Theorie und Praxis. 2. Aufl., Häußler, Peter (Hrsg.): Berlin, Heidelberg: Springer: 2010.
- Kost, Christoph (2021): Studie: Stromgestehungskosten erneuerbare Energien - Fraunhofer ISE. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html> - Download vom: 06.07.2023.
- Kultusministerkonferenz: Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife. 2020. URL: <https://www.kmk.org/themen/qualitaetssicherung-in-schulen/bildungsstandards.html> - Download vom: 01.10.2020.
- Mertens, Konrad: Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis. 6. Aufl., München: Hanser: 2022.
- Nickel, Michael (2023): AG Energiebilanzen legt Bericht für 2022 vor. URL: <https://ag-energiebilanzen.de/ag-energiebilanzen-legt-bericht-fuer-2022-vor/> - Download vom: 05.07.2023.
- Sächsisches Staatsministerium für Kultus: Lehrplan Gymnasium / Physik. 2022. URL: <https://www.schule.sachsen.de/lpdb/> - Download vom: 04.05.2023.
- Schecker, Horst; Wilhelm, Thomas; Hopf, Martin [u. a.] (Hrsg.): Schülervorstellungen und Physikunterricht: ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis. Berlin: Springer Spektrum: 2018.
- Schlosser, Viktor; Bartosch, Ilse: Photovoltaik in der Schule unterrichten. In: Plus lucis – Umweltbildung für nachhaltige Entwicklung / 2020, Heft 3, S. 43–48.
- Statistisches Bundesamt (2022): Stromverbrauch der privaten Haushalte nach Haushaltsgrößenklassen. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Tabellen/stromverbrauch-haushalte.html> - Download vom: 24.07.2023.
- Sterner, Michael; Stadler, Ingo (Hrsg.): Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration. 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg: 2017.

- Tran, Ngoc Chat; Kraus, Simon: Einflussfaktoren auf die nutzbare Energieeinstrahlung auf Solarzellen experimentell überprüfen - Ein Schülerprojekt. In: PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Jg. / 2012, Heft 2012: Mainz. URL: <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/338> - Download vom: 24.05.2023.
- TU Dresden: ReKIS WISSEN - Sachsen. URL: <https://rekis.hydro.tu-dresden.de/wissen/sachsen-w/> - Download vom: 22.07.2023.
- Umweltbundesamt (2023a): Erneuerbare Energien in Zahlen. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen> - Download vom: 05.07.2023.
- Umweltbundesamt (2023b): Erneuerbare und konventionelle Stromerzeugung. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/erneuerbare-konventionelle-stromerzeugung> - Download vom: 06.07.2023.
- VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 3780 Technikbewertung - Begriffe und Grundlage. In: VDI-Richtlinien 2000, S. 44.
- Wirth, Harry: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg: Fraunhofer ISE: 2023. URL: www.pv-fakten.de - Download vom: 02.05.2023.
- Wolfrum, Tobias; Fösel, Angela: Erneuerbare Energien im Experiment. In: PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Jg. / 2016, Heft 2016: Hannover. URL: <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/676> - Download vom: 24.05.2023.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe und dass alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, durch Angabe der Quellen als Entlehnung kenntlich gemacht wurden. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsleistung eingereicht.

Dresden, der 3. August 2023

Hiermit nehme ich zur Kenntnis:

Sollte die obige Selbstständigkeitserklärung nicht der Wahrheit entsprechen oder der Versuch einer Täuschung festgestellt werden (bspw. Plagiate), wird die vorliegende Arbeit in der Regel mit der Note:

- „nicht ausreichend“ (5,0) im Sinne einer Täuschung bei Seminararbeiten und anderen entsprechenden schriftlichen Arbeiten oder sonstige Prüfungsleistungen oder
- „ungenügend“ (6,0) bei wissenschaftlichen Arbeiten als Bestandteil der Ersten Staatsprüfung

bewertet werden.